

# Comparison of Hole Quality of Polyamide Materials Produced by Traditional and Additive Manufacturing

## Geleneksel ve Eklemeli İmalat ile Üretilen Poliamid Malzemelerin Delik Kalitesinin Karşılaştırılması

Tuğçe TEZEL <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Akdeniz University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, 07058, Antalya / Turkey

### Abstract

Polyamide, commonly used in engineering plastics, has wear resistance and high strength. In this study, polyamide, which is produced with casting and three-dimensional printer, has been drilled and reamed in numerical controlled machine. Thus, the effect of production technique, machining allowance and tool feed rate on hole surface and dimensional accuracy was investigated. In general, the surface quality of the holes in the polyamide material produced by the two production techniques was directly affected by the machining allowance and the increased feed rate. In addition, the size of the holes created with the three-dimensional printer has reached the desired level after reaming process.

**Keywords:** Polyamide, Additive Manufacturing, Surface quality, Dimensional Accuracy, Hole quality, Reaming

### Öz

Yaygın olarak kullanılan mühendislik plastiklerinden polyamid, yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemete sahiptir. Bu çalışmada, döküm ve üç boyutlu yazıcı ile üretilen polyamide malzemeye, nümerik kontrollü tezgâhta delik delme ve raybalama işlemi yapılmıştır. Böylelikle, üretim tekniğinin, işleme payının ve takım ilerleme hızının delik yüzeyi ve boyut kalitesine etkisi incelenmiştir. Genel olarak her iki üretim tekniğiyle üretilen polyamid malzemedeki deliklerin yüzey kalitesi, işleme payından ve artan ilerleme hızından doğrudan etkilenmektedir. Ayrıca üç boyutlu yazıcı ile oluşturulan deliklerin boyut kalitesi raybalama işlemi sonrası istenilen seviyeye ulaşmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Polyamid, Eklemeli İmalat, Yüzey kalitesi, Boyutsal doğruluk, Delik kalitesi, Raybalama

## I. INTRODUCTION

Additive manufacturing (AM) is described in ASTM as a production process in which the layers are deposited or added to the final shape of the material or the closest to it. In the definition made by ASTM, additive manufacturing is the production technique of adding layer by layer material based on 3D model data. Many materials such as polymers, ceramics, metals and alloys are used by the AM technique [1] The advantages of this method include features such as reducing the weight of parts, design flexibility and contribution to the manufacture of spare parts [2] However, there are advantages as well as disadvantages. In particular, defects in surface quality and dimension tolerance directly affect the quality of the product. In addition, high financial costs, operating costs and materials for AM machines are the biggest challenges to the acceptance of AM [3]. AM is complete opposite with subtractive manufacturing (i.e. grinding, milling, drilling, cutting, etc.) in which the material is cut out to get the final part. Traditional manufacturers, such as machine designer, have recognized the advantages of additive manufacturing as a major obstacle, although they know the advantages of AM [4]. Therefore, the Computer Numerical Control (CNC) process is still a way of overcoming the obstacles in the additive manufacturing process. However, although high flexibility, great precision, high speed and similar features are presented with modern CNC technology, the flexibility of final production reached in CNC machining is relatively low in parallel to the AM process [5].

Polyamide (PA) is one of the most valuable and most chiefly used engineering plastics. It can be produced by casting and injection production as well as additive manufacturing. Various polyamides are produced under various trade names, nylon 6 and nylon 66 are the most produced polyamides. The melting range of Nylon 6 is between 215-228 °C and nylon 66 between 250-265 °C. Polyamides have excellent abrasion resistance and high strength [6]. Due to these properties, polyamide composites are generally used in various engineering areas such as machines, aircraft, automobiles, and robots.

In this paper, traditional-additive manufacturing involves two or more subsequent disconnected processes (e.g. additive manufacturing + drilling/reaming) employed to accomplish the final part properties. This paper focus on the better understanding of the machinability of PA6G with reaming. The effect of production techniques, machinability allowances for reaming and feed rates on surface and dimensional accuracy were investigated.

When the literature is examined, there is no study comparing the surface quality and size tolerance of casting polyamide materials produced by three dimensional printers. For this reason, the literature has been examined under the titles of polyamide processing.

In Kuram's study, PA6 and glass-fibre reinforced PA6 were produced by injection moulding to investigate their ability to micro process. Burr formation, surface roughness, cutting force and tool wear were investigated during micro milling of the material [7]. Rubio et al, used the glass reinforced polyamide to determine the best drilling properties. PA6 and PA66GF30 composites were used to analyse the effects of spindle speed, tool geometry, and feed rate factors on the circularity error, hole mean diameter, and thrust force by using three drill bits with various geometries on composites [8]. Bozdemir, in terms of formation of mean surface roughness values of the casting PA6G samples, the properties such as cutting speed, depth of cut, and feed rate were examined under the same cutting conditions. They also considered the condition of the material to be dry and humidity [9]. Davim et al. investigated the ability of PA66 polyamide to be processed with 30% glass fibre reinforced and untreated. They used four different tool materials by precision turning at different feed rates [10]. Bozdemir and Aykut investigated the surface roughness quality of the Castamide holes prepared in the dry and wet forms processed using the comparable parameters. Artificial neural network modeling technique was advanced with the results acquired from the experiments. In this model, cutting depth, cutting speed and material type parameters are used [11]. As known from the literature, additively manufactured pieces almost require post-processing to improve

surface quality features and relieve residual stresses. There are several studies on this subject. Reviews have been launched empathizing on hybrid manufacturing processes [12], [13]. Lorenz et al. [14] greatly focused and propose alternative additive manufacturing processes [15].

## II. MATERIALS AND METHODS

Polyamide is a significant thermoplastic which is generally used in injection moulded components, with powerful economic benefits due to its low manufacturing cost. Polyamide has superior wear resistance related to other engineering polymers due to its ability to form a thin and uniform transfer film while sliding against steel parts.

In this study, polyamide material produced by three-dimensional printer and casting PA6G were used. The surface and dimensional qualities of these materials, which were produced by different production techniques, were examined by drilling the holes (Figure 1). The polyamide, which is produced by casting technique, is supplied in plate form. However, 3D printed PA holes was firstly designed on computer. The part designed on the computer was transferred to the 3D printer and the production was completed.

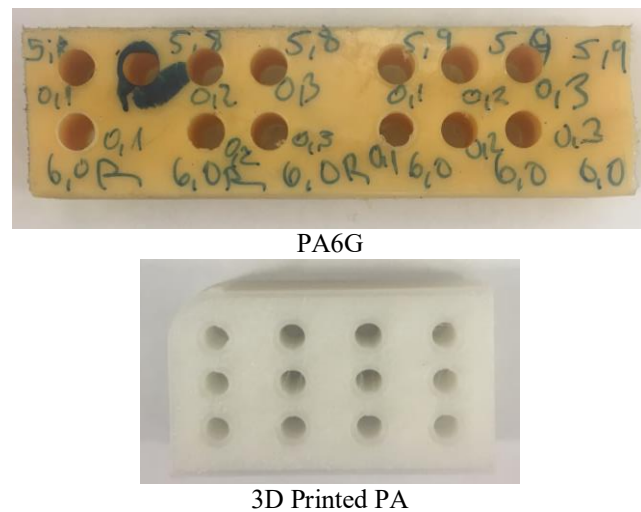


Figure 1. Experimental test samples

Test samples were manufactured by the Zmorph 3D printer. This machine can manufacture a model with size of 250x235x165mm with positioning accuracy of 14µm for X and Y axes and 0,625µm for Z axis. Uniquely processed 3D printing codes are used to fabrication parts so that the entire sample can be produced at 0-90° angles respectively. The test specimens are printed one by one in the centre of the bed so that all values can be fabricated as similar as possible. For test specimen, 3 shells were used around the part and 100% filler was used at the printing edges specified for the inside

of it. The PA material was extruded at 245 °C on a 100 °C heated printing bed at a speed of 2400 mm/min and a layer thickness of 0.2 mm. Production was 5 hours and 23 meters filaments were used.

Triac Denford was used to process holes with a numerically controlled machine (Figure 2). The Triac is a versatile three axes CNC milling machine. The spindle speed was 1592 rpm. The cutting speed was planned as 30 m/min and the feed rate was planned as 0.1, 0.2 and 0.3 mm/rev. Ø5.8, Ø5.9 and Ø6 HSS drilling tools were used. In addition, reaming was done with Ø6H7 HSS reamer.

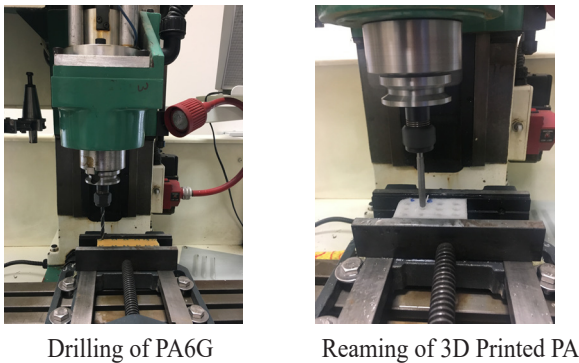
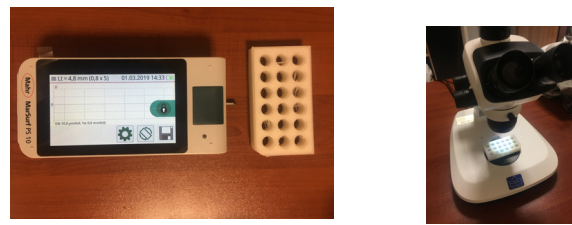


Figure 2. Drilling/reaming of PA/PA6G materials

The milling process is as follows: Firstly, holes of 5.8, 5.9 and 6 mm diameter were drilled in three different feed rates (0.1, 0.2 and 0.3 mm/rev) on the plate produced with the casting. Then all these holes are reamed. In manufacturing with three-dimensional printer, holes are created in the design, sent to the printer. In other words, a material with holes of various diameters has been manufactured. This 3D Printed PA material is only reamed. Each procedure was repeated at least 3 times and the results were determined using the mean values. At the final of the tests, all holes are done Ø6H7.

Surface roughness values were measured at least 3 times before and after reaming. In addition, the post-production and reaming dimensions of the 5.8 and 5.9 mm holes produced by the three-dimensional printer were measured with a stereo microscope. In surface roughness measurements, the device named MAHR (MahrSurf PS-10) was used (Figure 3a). Measured parameters for surface roughness evaluation include Ra, Rz and RSm. The measurement results were displayed on an LCD screen and recorded on the computer. During the operation, the device measured 4 mm in length, the measurement speed was 0.5 mm/sec and the cut off was 0.8 mm.

The dimensions of the holes were measured using the SOIF SZ780-B2/L Trinocular Stereo Zoom Microscope (Figure 3b) The M-SHOT 5.0 MP CMOS microscope image integrated with this microscope was taken from the surfaces examined by the transfer camera and software.



a. Surface quality                      b. Dimensional accuracy

Figure 3. Equipment used for holes quality.

### III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 4 illustrates the changes in the roughness of the surfaces, which are produced by the casting technique, on the reamed surfaces after drilling the holes in various diameters (Ø5.8, Ø 5.9, Ø 6 and Ø 6 without reaming). In the case of 0.1 mm/rev feed rate, the best surface quality is listed as Ø 5.8, Ø 5.9, Ø 6 and Ø 6 without reaming respectively. This order is the same for 0.2 mm/rev. At 0.2 mm/rev, there is a serious improvement in the surface quality of the drill hole with diameters of 5.8 and 6 mm without reaming in particular.

It is known that surface quality decreases with increasing feed rate in drilling operations. It should be noted that although the results obtained in Figure 4. When literature is reviewed for reaming process after hole drilling, for hole quality, higher feed rates are usually recommended for reaming than for drilling operations. When Figure 4 are evaluated in this way, the results of reaming after hole drilling are consistent with the literature [16,17]. It should be noted that there are many variables in this more complex machining process. This processes is linked to the dynamic stability of the drilling-reaming process rather than to increasing or decreasing feed rate, spindle speed, cutting speed or cutting depth. Furthermore, the selection of the correct reaming parameters depending on the reaming material also affects the quality of the reamed surface [18]. These effects should be considered for Figure 4, Figure5 and Figure 6.

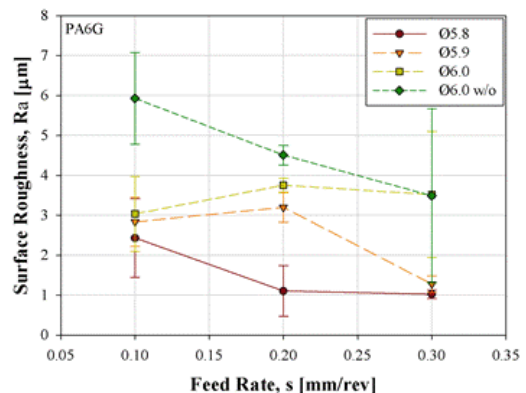


Figure 4. Surface roughness of PA6G

With increasing feed rate ( $s = 0.3 \text{ mm/rev}$ ), the surface quality of all hole treatments has increased. At this feed rate, after the reaming of the holes with diameters of 5.8 and 5.9 mm, the surface roughness values which are very close to each other were obtained. A similar situation is also possible for a 6 mm diameter reamed hole. The surface quality of the non-reaming hole with a diameter of 6 mm and the surface quality of the reamed hole of 6 mm diameter are the same with the increasing of feed rates in the polyamide produced by the casting technique. This result indicates that the results obtained from the experimental study support each other. When the surface quality of the holes with different diameters in the polyamide material produced by the casting technique is reamed to the same hole diameter, it is understood that the machining allowance for the reamer affects the surface quality at low feed rates. It is observed that the increasing of the feed rates, machining allowance for reaming has no effect.

After the reaming of the holes in the polyamide material produced by the three-dimensional printer, the surface roughness values obtained according to the feed rate are given in Figure 5. At 0.1 mm/rev feed rate, the best surface quality is achieved by reaming the hole with a diameter of 5.9, while a 0.2 mm/rev feed rate is at Ø5.8. With the increasing in feed rate ( $s = 0.30 \text{ mm/rev}$ ), all surface qualities are close to each other. In polyamide materials produced by three-dimensional printers, the effect of raised feed rate on the surface roughness is

almost non-existent. However, at low feed rates, machining allowance for the reamer increases the surface quality.

Figure 6 presents surface roughness values after Ø6H7 reaming applied to holes of different diameters (Ø5.8, Ø5.9, Ø6) In various feed rates, the effect of the allowance for the reaming process on the surface roughness is evident. In general, the surface quality obtained by reaming the holes in the plate produced by the casting technique is better than the surface after the reaming process applied to the perforated plate produced by the three-dimensional printer. In a three-dimensional printer, high surface quality is achieved by producing the hole with the desired diameter and reaming in high feed rate.

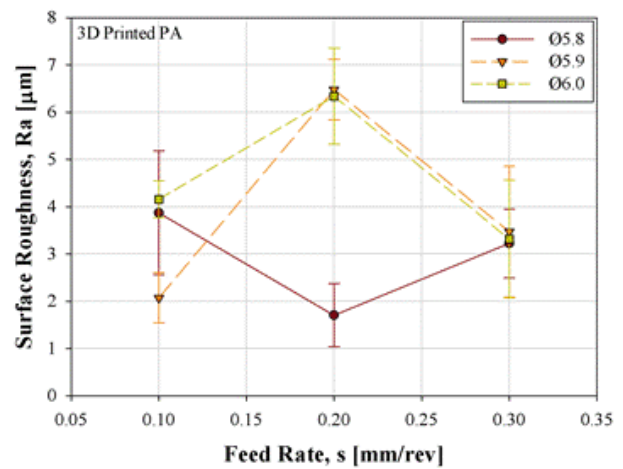


Figure 5. Surface roughness of 3D Printed PA

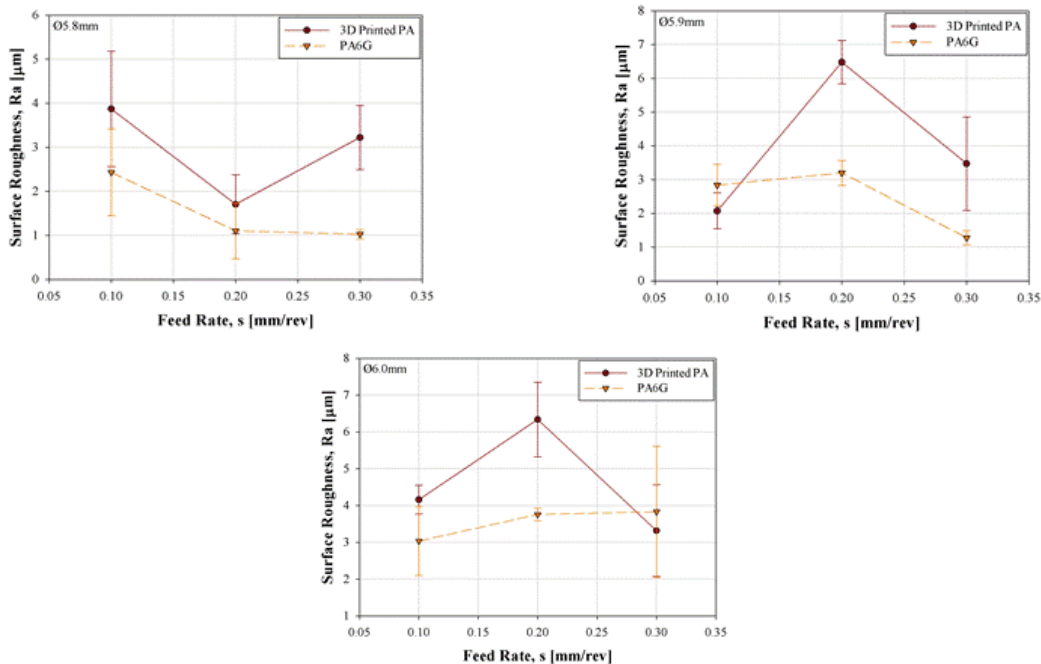


Figure 6. Effect of production technique on surface roughness

As it is known from the literature, one of the most important 3D printer production parameters is size tolerance. For this reason, in the scope of this study, dimensions of the holes, produced by three-dimensional printers, measured before and after reaming process. Considering the surface quality data, the dimensions of the holes with diameters of

5.8 and 5.9 mm were taken, and their size tolerances were examined. Three different diameter values obtained during the design of the hole, which is determined as Ø5.8 in the computer during the design with three-dimensional printer, are given in Figure 7.

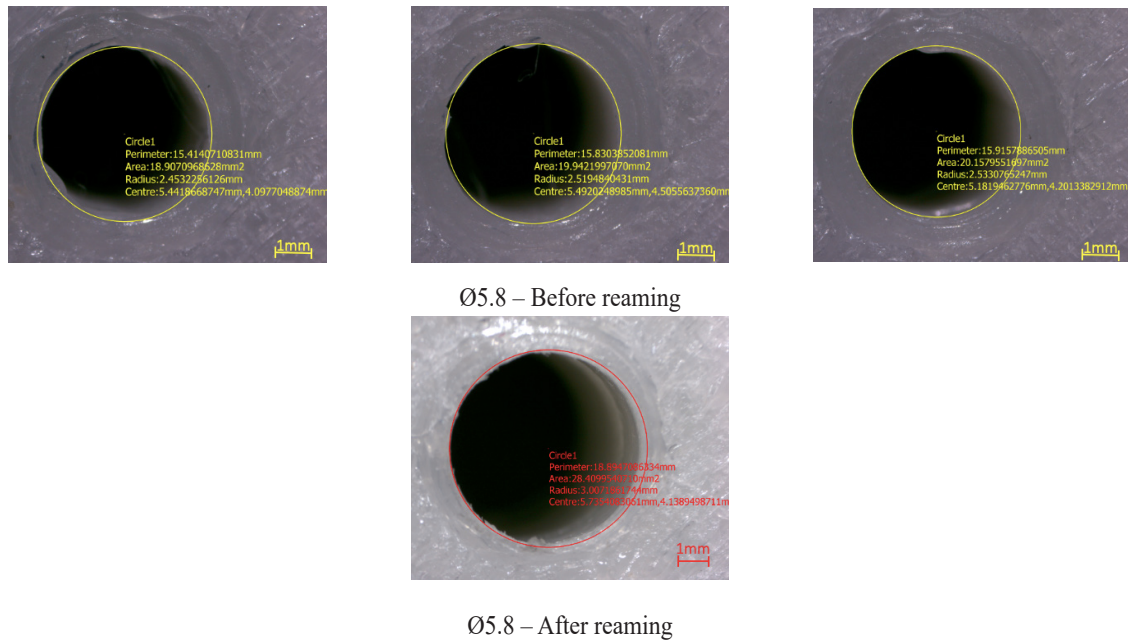


Figure 7. Sizes of 5.8 diameter holes produced by 3D printers before and after reaming

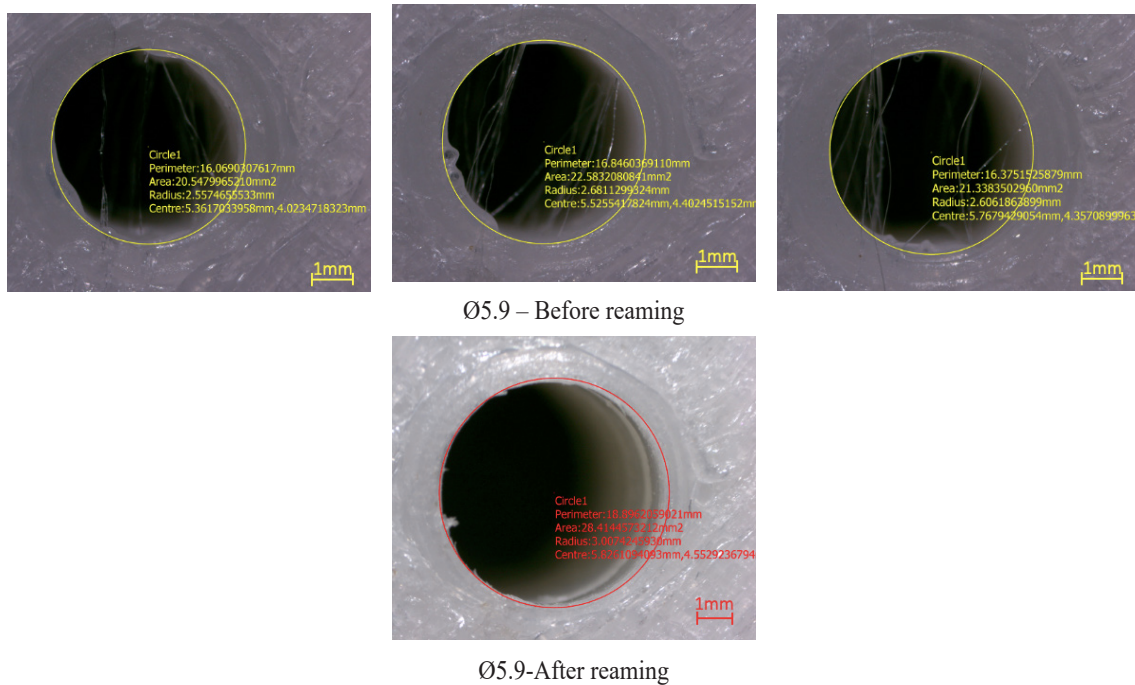


Figure 8. Sizes of 5.9 mm diameter holes produced by 3D printers before and after reaming

Datas of circles such as perimeter, area, radius and centre are given in Figure 7 and Figure 8. These data were obtained by means of software integrated to the microscope and these graphs were created. When the data is carefully examined, it will be understood that the exact dimensions of the circles given in the figure are examined. Figure 7 illustrates three different diameter values, produced as 4.9 mm, 5.02 mm and 5.06 mm, respectively. The diameter value, which is designed as 5.8 mm in computer, can be obtained with an average diameter of 4.99 mm. However, as can be seen in Figure 7, 6 mm diameter was obtained after reaming.

Similar data were repeated in Figure 8 for 5.9 mm diameter. The holes designed as 5.9 mm in the computer are manufactured in a three-dimensional printer. The post-production diameter values are 5.1, 5.36 and 5.2 mm and the average is 5.22 mm. After reaming, the diameter is 6.00.

#### IV. CONCLUSION

Designing and manufacturing of new polymer technologies are advanced day by day. Especially the using of polyamide materials is known to be quite large. Dimensional accuracy and surface quality, which are important subjects of design and manufacturing, continue to be investigated for various materials. Using of new production techniques, such as additive manufacturing, together with modern numerical controlled machines has led to a relatively new way of manufacturing. In this context, this study will help designers, for polyamide material, about production technique planning and size-surface quality of holes.

In this study, two different production techniques were used to drill holes depending on various parameters. It has been demonstrated whether the holes produced by additive manufacturing can achieve the quality of the drilled / reamed holes produced by conventional methods after a process such as reaming by means of PA produced by additive manufacturing and PA6G, a casting product of conventional production techniques.

The results show that the reaming process at high feed rates the holes manufactured by the three-dimensional printer, significantly increases the surface quality. Even better results have been obtained from the polyamide material produced by casting. The surface quality of casting polyamide is improved with an optimum proportion of machining allowance for reaming. The quality of the holes produced by the three-dimensional printer is quite low and reaming is definitely needed. It is possible to obtain better hole surfaces by using different three-dimensional printing parameters.

#### REFERENCES

- [1] ASTM F2792-12, (2012). Standard terminology for additive manufacturing Technologies, ASTM International.
- [2] Guo N., Leu M.C., (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*; 8(3): 215-243.
- [3] Wohlers T., (2016). Wohler's Report 2016, Wohlers Associates, Inc.
- [4] Petrick I.J., Simpson T.W., (2013). 3D printing disrupts manufacturing: how economies of one create new rules of competition. *Research-Technology Management*, 56(6): 12-16.
- [5] Amanullah A.N.M., Murshiduzzamana, S.T., Khana R., (2017). Design and development of a hybrid machine combining rapid prototyping and Cnc milling operation. *Procedia Engineering*, 184: 163 – 170.
- [6] Deopura B.L., Lagirusamy R., Joshi M., Gupta B., (2008). Polyesters and polyamides. Cambridge, England.
- [7] Kuram E., (2016). Micro-machinability of injection molded polyamide 6 polymer and glass-fiber reinforced polyamide 6 composite. *Composites Part B: Engineering*, 88 : 85-100.
- [8] Rubio J.C.C., Dasilva L.J., Leite W.D.O., Panzera T.H., Filho S.L.M., Davim J.P. (2013). Investigations on the drilling process of unreinforced and reinforced polyamides using Taguchi method. *Composites Part B: Engineering*, 55 :338-344.
- [9] Bozdemir M., (2017). The effects of humidity on cast PA6G during turning and milling machining. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2017, Article ID 5408691.
- [10] Davim J.P., Silva L.R., Festas A., Abrão A.M. (2009). Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing. *Materials & Design*, 30 (2): 228-234.
- [11] Bozdemir M., Aykut Ş., (2012). Optimization of surface roughness in end milling Castamide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62 (5): 495–503.
- [12] Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T., (2013). A review of hybrid manufacturing processes state of the art and future perspectives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26 (7): 596–615.
- [13] Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mcintosh D., (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annual. Manufacturing Technology*, 63, 2: 561–583.
- [14] Lorenz K.A., Jones J.B., Wimpenny D.I., Jackson M.R., (2015). A Review of hybrid manufacturing. *Solid Freeform Fabrication Conference Proceedings*, 53.
- [15] Flynn J.M., Shokrani A., Newman S.T., Dhokia V., (2016). Hybrid additive and subtractive machine tools – research and industrial developments. *International Journal Of Machine Tools and Manufacture*, 79-101.
- [16] Bezerra A.A., Machado A.R., Souza A.M., Ezugwu E.O., (2001). Effect of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 112 :185-198.

- [17] Soratgar M.S., (1987). An analysis of the effectiveness of reaming as a secondary operation for hole production. Ph.D. Thesis. Texas Technology University, USA.
- [18] ASM Metal Handbook Volume 16: Machining. (1989) ASM International.

# Predictive Modeling of the Syngas Production from Methane Dry Reforming over Cobalt Catalyst with Statistical and Machine Learning Based Approaches

## İstatistiksel ve Makine Öğrenmeye Dayalı Yaklaşımlarla Kobalt Katalizör Üzerinden Metan Kuru Reformundan Elde Edilen Sentez Gazının Tahmini Modellemesi

Furkan ELMAZ<sup>1</sup> , Özgün YÜCEL<sup>2</sup> , Ali Yener MUTLU<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> İzmir Kâtip Çelebi University, Electrical and Electronics Engineering, Çiğli, İzmir, Turkey

<sup>2</sup> İzmir Kâtip Çelebi University, Environmental Engineering, Çiğli, İzmir, Turkey

### Abstract

Dry reforming of methane is a promising method to reduce the emission of CO<sub>2</sub> and to use it in various type of Fischer–Tropsch synthesis and production of syngas. In order to obtain desirable products efficiently, the effect of reactants on the products must be known precisely. For this purpose, several studies have published for modeling the dry reforming of methane process with artificial intelligence-based data-driven prediction models. Due to lack of investigating overfitting problem and deficient and/or biased performance evaluations, actual potential of proposed methods have not been revealed for predicting certain outputs of the process. In this paper, we employed three regression methods, i.e., artificial neural networks, support vector machine and polynomial regression to develop prediction models using a dataset with 57 observations. Performance evaluations of the models are performed with 10-fold cross-validation to ensure unbiased results. Proposed methods' both training and testing performances are separately investigated, further applicability is discussed.

**Keywords:** methane, dry reforming, support vector machine, artificial neural networks, polynomial regression, cross-validation

### Öz

Metanın kuru reformlanması, CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak ve çeşitli Fischer-Tropsch sentezlerinde ve sentez gazlarının üretiminde kullanmak için umut verici bir yöntemdir. İstenen ürünleri verimli bir şekilde elde etmek için, reaktantların ürünler üzerindeki etkisi kesin olarak bilinmelidir. Bu amaçla, yapay-zeka bazlı veri odaklı tahmin modelleri ile metan kuru reformunun modellenmesi için çeşitli çalışmalar yayınlanmıştır. Önerilen yöntemler, aşırı uyum probleminin araştırılmamasından, eksik ve/veya yanlış performans değerlendirmelerinden dolayı, sürecin belirli çıktılarını tahmin etmek için yetersiz kalmıştır. 57 örnek içeren bir veri seti kullanarak destek vektör makineleri, yapay sinir ağları ve polinom regresyonu olmak üzere üç regresyon yöntemi kullandık ve tahmin modelleri geliştirdik. Modellerin performans değerlendirmeleri, tarafsız sonuçlar elde etmek için, 10 katlı çapraz doğrulama ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemlerin hem eğitim hem de test performansları ayrı ayrı incelenmiş ve pratikte uygulanabilirliği tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** metan, kuru reformlama, destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, polinom regresyon, çapraz-doğrulama

## I. INTRODUCTION

Due to the excessive use of fossil-based fuels and urbanization, CO<sub>2</sub> emissions which is the main cause of global warming have increased significantly [1]. With growing awareness about climate change, researchers put effort to develop effective methods to reduce the emission rate. Thus, dry reforming of methane has been proposed as a promising technique to not only reduce CO<sub>2</sub> emission but utilize it to produce syngas which can be processed into useful products such as electricity. Even though there are several catalysts that can be used during the dry reforming of methane such as Ni, Pt, Rh, Ru, Pd and Ir [2–4], cobalt catalyst gained popularity due to its wide availability and cost efficiency [5]. Certainly, the dry reforming processes must be handled carefully by using precise models to obtain optimal efficiency. Therefore, several studies are published which focusing on kinetic modeling of dry reforming of methane [6] and to best of our knowledge there are limited studies focusing on using artificial intelligence based methods. In Hossain et.al. [7], authors performed dry reforming of methane with Ni/CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst and obtained a data set with 24 observations to create an artificial neural network model, they



used feed ratio reaction temperature and metal loading as features and tried to predict CH<sub>4</sub> conversion, CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield and CO yield. They split the dataset into training, testing and validation sets during the training of the model. Even though they obtained satisfactory results, with the use of data set with an extremely low number of observations and a low number of features resulted with inadequacy to explain proposed methods' true potential and generalization ability of the process. In Amin et. al. [8], authors did methane reforming with Rh/MgO catalyst experiment and used their results to develop an artificial neural network model. But the authors used all of the data for training the model and evaluated the performance of the model using the same data set. Thus, the generalization ability of the model is not investigated and proper performance evaluation is not achieved. In Al Ayodele et. al [2] performed methane dry reforming over ceria-supported cobalt catalyst and gathered a data set with 57 observations, they used CH<sub>4</sub> partial pressure, CO<sub>2</sub> partial pressure CH<sub>4</sub> to CO<sub>2</sub> ratio and reaction temperature as features to create an artificial neural network model in order to predict H<sub>2</sub> and CO production rates as well as CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> conversion percentages. They also split the dataset into training, testing and validation folds but they only shared the training performance of the model and used a small number of error metrics for evaluation. Due to the lack of test and validation scores and investigation of overfitting, the study wasn't able to explain the accuracy and practical usability of the proposed method. There are limited number of studies have been reported in the literature in order to improve catalyst for dry reforming of methane using artificial neural networks [9,10]. However, prediction error was not given in these studies. Recently, Şener et. al [11] were analyzed the effect of catalyst type, support, preparation method and tried to find the best catalyst for optimum methane conversion. They used 4-fold cross validation method (reserving one fourth of data for testing and repeating this procedure four times to cover entire range) and found RMSE in the range of 4.52 to 8.59. In Huang et. al. [12], authors employed artificial neural networks and genetic algorithm in hybrid fashion. Although their training error was quite low, experimental results had up to %28 error with the predicted values, thus, proposed model showed unreliability in practical applications.

In this paper, we used the same dataset published in [2] to create artificial intelligence-based prediction models. We employed three methods, i.e. polynomial regression, artificial neural networks and support vector regression methods to predict outputs of the dry reforming of methane with a ceria-supported cobalt catalyst. As a contrary to previous studies, performance evaluation of the employed methods is performed with 10-fold cross-validation technique. This approach not only enabled us to explore each methods' generalization performances, also allowed us to make

comparison between the employed machine learning methods in unbiased manner. All methods' training and testing performances, as well as further usability, are discussed.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 2.1 Dataset Acquisition

In this study, dataset published in [2] is used. The dataset contains 57 observations and four numerical features ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  referred to as, CH<sub>4</sub> partial pressure (kPA), CO<sub>2</sub> partial pressure (kPA), CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> ratio, Reaction Temperature (°C), respectively. These features are utilized to develop models to predict four numerical outputs,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ ,  $y_4$  i.e.,  $r_{h_2}$  (mmol/min/g catalyst),  $r_{CO}$  (mmol/min/g catalyst), CH<sub>4</sub> conversion (%), CO<sub>2</sub> conversion (%).

### 2.2 Polynomial Regression

Polynomial regression is one of the regression techniques which represents the relationship between the independent variables (features) and the dependent variable (output) with an  $n^{\text{th}}$  ( $n = 2, 3 \dots$ ) degree polynomial equation. The goal of polynomial regression is to find optimal coefficients that can make satisfactory predictions of the output variable in terms of features used in a data set, i.e. good generalization and prediction performance. The choice of the degree and type of the polynomial equation is differing according to the problem which one would like to develop a solution for. In the present paper, the quadratic equation (Equation (1)) is determined to be the most appropriate polynomial equation to apply to the dataset used

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij} * x_i * x_j + \sum_{k=1}^n \alpha_k * x_k \quad (1)$$

where,  $\hat{y}$  is the prediction of the output variable,  $n$  is the number of features,  $\beta_{ij}$  and  $\alpha_k$  are the coefficients of the polynomial equation. While developing a regression model, a cost function which indicates the prediction accuracy must be selected and minimized during the training phase. For this purpose, commonly used convex cost function, i.e. sum of square errors is selected and used in the present paper. In order to prevent model from learning excessively, which reduces the generalization performance of the proposed method [13], also referred to as overfitting, we add a regularization term to the cost function  $J$  (Equation (2)). Minimization of the cost function is performed with Gradient-Descent iterative optimization method [14],

$$J = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 + \lambda \left( \sum_{j=1}^n \sum_{k=j}^n \beta_{jk}^2 + \sum_{t=1}^n \alpha_t^2 \right) \quad (2)$$

where,  $\lambda$  is the regularization parameter.

### 2.3 Artificial Neural Networks (ANN)

ANN is a machine learning methodology inspired by the human brain and its information processing structure [15]. ANN has found widespread usage across different type of problems in various disciplines due to its proven success for predicting both continuous and discrete variables. ANN consist of neurons which are the primary processing elements, and neuron clusters which are called as layers. Neurons receive inputs from neurons in the previous layer, process the information with its activation function and transmit output for the neurons in next layer [16], this transmitting process starts with input layer and continuous until the neurons in the output layer produces outputs. Every layer between input and

output layers are called hidden layer, the number of hidden layers and number of neurons on each hidden layer is hyper-parameters which must be determined beforehand. Training of a neural network is performed by adjusting the weights between each connection which minimizes the difference between predictions and the actual output and widely used backpropagation algorithm is used for training phase [17]. One of the most unique features of the ANNs is the capability of predicting multiple output variable with the same model, because the dataset used in this paper consists of four features and four output variables. We developed a single ANNs model to predict all of the outputs with two hidden layers and nine neurons for each hidden layer as shown in Fig. 1. Sigmoid activation function and linear activation function is used in hidden layers and output layer, respectively.

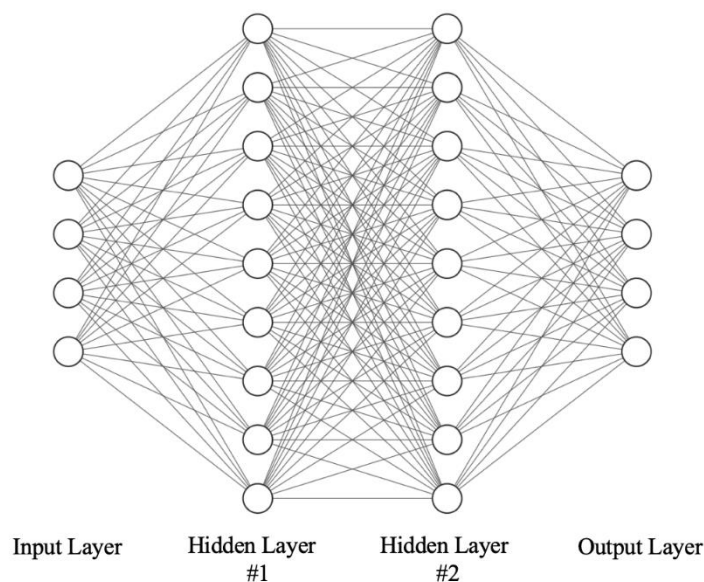


Figure 1. Developed ANNs structure

### 2.4 Support Vector Regression

Support Vector Machines (SVM) is a popular machine learning technique due to its non-parametric structure and usage of kernel functions. Support Vector Regression (SVR) is a specific type of Support Vector Machines (SVM) technique which is used to predict continuous type variables. Contrary to polynomial regression and ANNs, SVR models are trained by minimizing the generalization error bound instead of prediction error [18]. Therefore, SVR models try to achieve the best generalization performance. The principle of SVR is to transform data to a higher dimensional feature space with a kernel function and to find an optimal hyperplane which minimizes the selected cost function [19]. Therefore, SVR performs a linear regression in higher dimensions by using a kernel function (K) as shown in Eq. (3)

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n \beta_i * K(x_i, x) + c \tag{3}$$

where,  $\beta_i$  and  $c$  are the constant coefficients,  $K(x_i, x)$  is the kernel function. In this paper, we used a second-degree polynomial kernel function (Eq. 4). The reason why we selected this kernel function is, linear and gaussian kernel functions were not able to grasp the complexity of the problem, thus, poor prediction performance is obtained by those kernels. When third or higher degree polynomial kernels are used, computational expense significantly increased and performance improvement was negligible and didn't justify the model's enormous training time. During the

training phase of the models, epsilon-insensitive cost function (Eq. 5, Eq. 6) is used and minimized.

$$K(x_i, x) = (x_i'x + 1)^2 \tag{4}$$

$$L_\epsilon = \begin{cases} 0 & \text{if } |y - \hat{y}| \leq \epsilon \\ |y - \hat{y}| - \epsilon & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

$$J = \sum_{i=1}^n L_\epsilon(\hat{y}_i, y) + \frac{\lambda}{2} |w|^2 \tag{6}$$

### III. RESULTS AND DISCUSSION

Development and performance evaluation of the proposed methods are performed in MATLAB environment. Due to the small size of the data set, we implemented 10-fold cross validation technique for and testing. Feature normalization on the data set is performed to prevent suppressing of a feature due to another feature with high magnitude. Prediction models for polynomial regression and SVR develop to predict single output variable, for ANNs all outputs predicted at once. Correlation Coefficient ( $R^2$ ), Adjusted Correlation Coefficient ( $Adj.R^2$ ), Root-Mean-Square-Error (RMSE) and Normalized Root-Mean-Square-Logarithmic-Error (RMSLE) metrics are used to show the prediction accuracy of the proposed methods. Each methods' training and test scores of 10-fold cross validation are given in Table 1 and Table 2, respectively.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \tag{7}$$

where  $w$  is the weight matrix.

each method to ensure unbiased performance evaluation [16,17], the data set was split into ten folds and model is trained with nine of the folds and tested on the remaining one. This process is repeated for each fold, so that, all of the data is used for both training

$$Adj.R^2 = 1 - \left[ \frac{(1 - R^2) * (m - 1)}{m - n - 1} \right] \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}} \tag{9}$$

$$RMSLE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [\log(y_i + 1) - \log(\hat{y}_i + 1)]^2}{m}} \tag{10}$$

**Table 1.** Training performances of proposed methods

Output s	Polynomial Regression				ANNs				Support Vector Regression			
	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE
$y_1$	0.87	0.84	0.797	0.294	0.7	0.61	1.253	0.334	0.73	0.64	1.191	0.351
$y_2$	0.96	0.95	0.365	0.073	0.76	0.69	0.975	0.199	0.95	0.94	0.426	0.097
$y_3$	0.87	0.83	5.24	0.108	0.94	0.92	3.505	0.079	0.82	0.77	6.067	0.119
$y_4$	0.78	0.72	8.323	0.179	0.9	0.87	5.555	0.122	0.71	0.66	9.854	0.259

**Table 2:** Test performances of proposed methods

Output s	Polynomial Regression				ANNs				Support Vector Regression			
	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE	$R^2$	$Adj.R^2$	RMSE	RMSLE
$y_1$	0.8	0.73	1.025	0.295	0.61	0.54	1.416	0.428	0.55	0.39	1.554	0.412
$y_2$	0.94	0.92	0.501	0.073	0.72	0.64	1.065	0.229	0.91	0.89	0.562	0.127
$y_3$	0.57	0.47	9.692	0.182	0.67	0.56	8.462	0.184	0.65	0.54	8.672	0.165
$y_4$	0.61	0.52	11.21	0.222	0.42	0.24	13.68	0.287	0.46	0.3	13.15	0.287

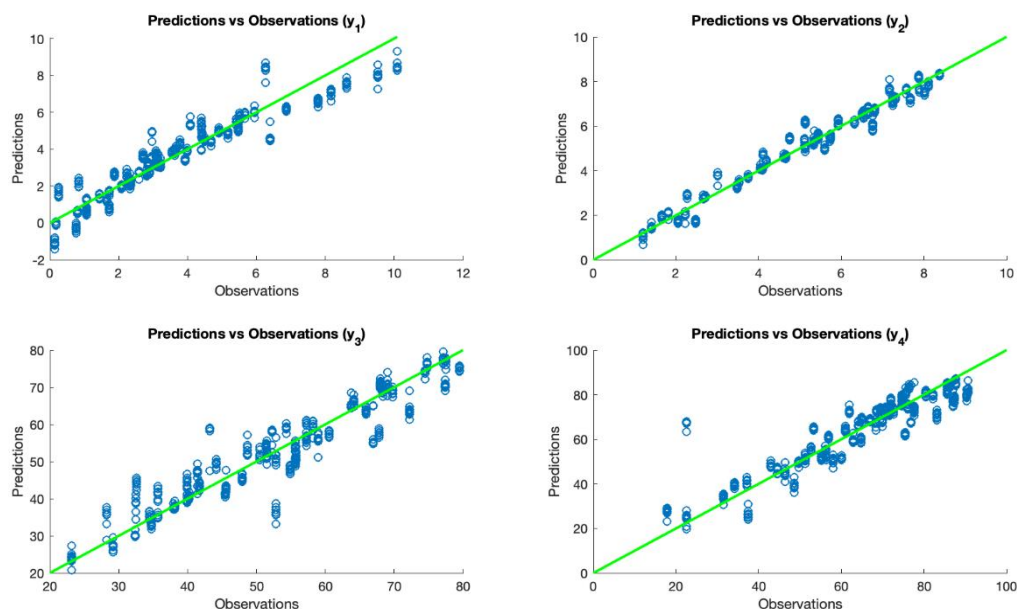
One can see that the overall prediction performance of polynomial regression was better compared to other methods in both training and test phases. For output labeled as  $y_1$ , all methods performed reasonably in the

training phase. In the testing phase, only polynomial regression models were able to make predictions close to its training performance. For output  $y_2$ , the performance of polynomial regression and SVR

methods was similar and satisfactory in both training and test phases, but the performance of ANN was significantly lower. For outputs  $y_3$  and  $y_4$ , all of the methods showed a major performance decline in the testing phase compared to training. This situation usually indicates overfitting, but during developments of the models, different regularization term constants have been tested for each method to overcome overfitting while avoiding underfitting. Moreover, this performance reduce was due to the low number of observations in the data set which means methods were not able to ‘understand’ the dynamics of the process with the given number of training data. Therefore, it can be concluded that more observation is required for proposed techniques to make predictions, which can show the true nature of the process. In addition, it should be stated that training performance can be highly inaccurate in the evaluation of the machine

learning models. Extremely high performance in the training phase, as shared in [2], can be misleading and developed models may perform unexpectedly worse when models encounter with data they have never seen before, as can be seen in the present paper.

In order to visualize performance evaluations and to have a better understanding of predictions made by polynomial regression, which is the best performing method in this paper, prediction vs actual value graphs are plotted for both training and test phases (Fig. 2 and Fig. 3). Graphs are plotted with a reference line which starts from zero and has slope equals to one. Therefore, any point stays on the reference is predicted correctly, and length between unsuccessful predictions and reference line indicates the prediction error.



**Figure 2.** Prediction performance of polynomial regression in training phase

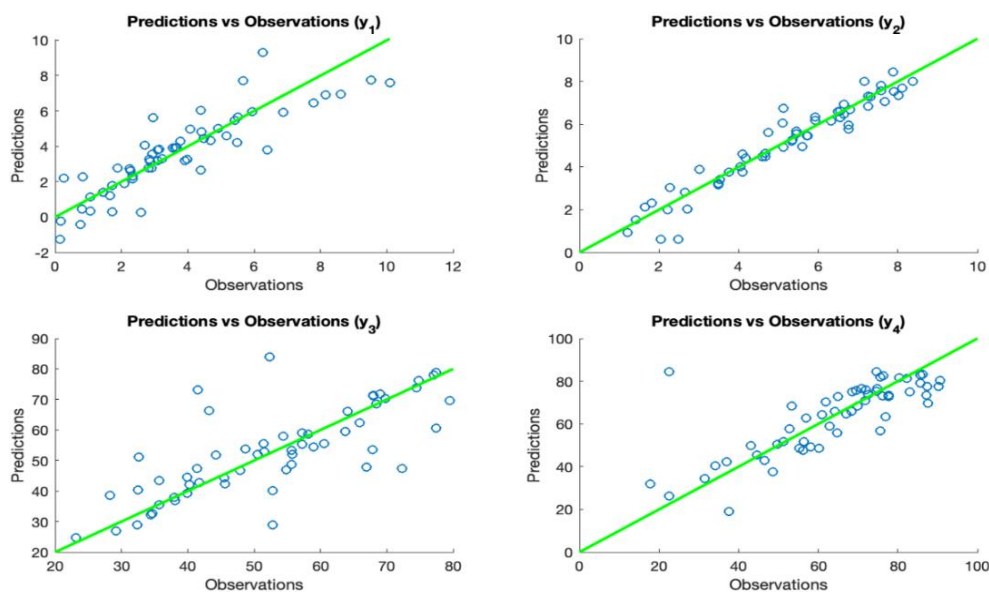
As one can see, a total of 513 data points (57\*9) for the training set and 57 data points for the test set are shown in the Figure 2 and Figure 3, respectively. The reason why 513 data points are presented in Figure 2 is due to the nature of 10-fold cross-validation. Every fold is used nine times in the training phase and used as test set once. Therefore, in Fig. 2, every data point which shares the same value in ‘Observations’ axis is the same prediction of the corresponding observation made by different folds. The small distance between them shows that the desired attributes such as high stability and low variance between folds are achieved in the training phase. When Fig. 3 is examined, predictions follow close to the identical pattern obtained Fig. 2 for outputs  $y_1$  and  $y_2$ , which means developed models are successfully avoid overfitting

and learned enough information from training data to make accurate predictions. For outputs  $y_3$  and  $y_4$ , even the prediction patterns are similar, some of the points are predicted extremely inaccurate which resulted in low prediction accuracy overall. In essence, one can observe polynomial regression and SVR predicted the  $H_2$  and  $CO$  production rates with high accuracy in both training and testing phases, on the other hand, ANNs failed to make satisfactory predictions for these outputs. Even though all of the methods performed well in during training phase for  $CH_4$  conversion and  $CO_2$  conversion outputs, they performed significantly worse in the testing phase due to the low number of observations in the dataset. Although ANNs method didn’t perform as good as other proposed ones, its performance may increase with the use of different

architectures and hyper-parameters, but when the requirement of high development time and computational resource of ANN is concerned, it may not be the best choice of method for predicting outputs of dry reforming processes. Even though SVR performed better, slightly worse than polynomial regression, it can be considered an overkill due to high memory and computational requirement of the method. Present study shows that polynomial regression's overall performance was best among the proposed methods and with low computational cost of polynomial regression in mind, it can be a good candidate to simulate and make predictions for dry reforming processes with cobalt catalyst especially with larger data sets efficiently.

When the results obtained in this study are compared to similar studies in literature; In [2], authors only provided training error of their proposed prediction

models. This practice not only prevent showing the true potential of the methods by not feeding and testing the - unseen data (test or validation data), it also fails to investigate models' generalization ability. In [11], authors evaluated the performance of their models by 4-fold cross validation, even though 10-fold cross validation would be more suitable due to high sample size of the data set they used, generalization ability of proposed models are deeply investigated. They calculated RMSE values between 4.52 to 8.59 which is slightly worse performance compared to this study as shown in Table 2. In [12], authors not only used any kind of cross-validation methods, also they obtained overfitted model with test results up to %28 error shown in the paper. This significantly worse than what we achieved in this paper. As similar studies, in [9] and [10], authors did not provide any kind of error metrics other than cost function of the ANN which does not offer any kind of insight about the prediction ability of the proposed models.



**Figure 3.** Prediction performance of polynomial regression in testing phase

#### IV. CONCLUSION

In this paper, polynomial regression, ANNs, and SVR are used to predict four outputs of methane dry reforming processes with cobalt catalyst using four features. It is observed that ANN failed to make accurate predictions compared polynomial regression and SVR. Polynomial regression's performance showed that it is a strong candidate to create prediction models for such problem when the overall accuracy and computational costs are taken into the account. Although, performance of the polynomial regression was better among all proposed methods, still, highly robust predictive models could not be developed for prediction of CH<sub>4</sub> conversion, CO<sub>2</sub> conversion outputs

due to the low sample size of the data set used. For future work, we'll focus on implementing the proposed machine learning algorithms on larger datasets and use statistical techniques to determine the impact of each feature which may improve performance of the machine learning methods for the methane dry reforming processes with cobalt catalyst.

#### References

- [1] Florides, G. A. and Christodoulides, P. (2009). "Global warming and carbon dioxide through sciences," *Environ. Int.*, vol. 35, no. 2, pp. 390–401.
- [2] Ayodele, B. V. and Cheng, C. K. (2015).

- “Modelling and optimization of syngas production from methane dry reforming over ceria-supported cobalt catalyst using artificial neural networks and Box-Behnken design,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, pp. 246–258.
- [3] Yücel, Ö. and Hastaoglu, M. A. (2016). “Comprehensive Study of Steam Reforming of Methane in Membrane Reactors,” *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 138, no. 5, p. 052204.
- [4] Luisetto, I., Tuti, S., and Di Bartolomeo, E. (2012). “Co and Ni supported on CeO<sub>2</sub> as selective bimetallic catalyst for dry reforming of methane,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 21, pp. 15992–15999.
- [5] Guo, J., Lou, H., and Zheng, X. (2007) “The deposition of coke from methane on a Ni/MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalyst,” *Carbon N. Y.*, vol. 45, no. 6, pp. 1314–1321.
- [6] Maestri, M., Vlachos, D. G., Beretta, A., Groppi, G., and Tronconi, E. (2008). “Steam and dry reforming of methane on Rh: Microkinetic analysis and hierarchy of kinetic models,” *J. Catal.*, vol. 259, no. 2, pp. 211–222.
- [7] Hossain, M. A., Ayodele, B. V., Cheng, C. K., and Khan, M. R. (2016). “Artificial neural network modeling of hydrogen-rich syngas production from methane dry reforming over novel Ni/CaFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> catalysts,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 26, pp. 11119–11130.
- [8] Saidina Amin, N. A., Mohd. Yusof, K., and Isha, R. (2013). “Carbon Dioxide Reforming of Methane to Syngas: Modeling Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Network,” *J. Teknol.*, vol. 43, no. 1.
- [9] Omata, K., Nukui, N., and Yamada, M. (2005). “Artificial Neural Network Aided Design of a Stable Co–MgO Catalyst of High-Pressure Dry Reforming of Methane,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, no. 2, pp. 296–301.
- [10] Omata, K., Kobayashi, Y., and Yamada, M. (2009). “Artificial neural network aided screening and optimization of additives to Co/SrCO<sub>3</sub> catalyst for dry reforming of methane under pressure,” *Energy and Fuels*, vol. 23, no. 4, pp. 1931–1935.
- [11] Şener, A. N., Günay, M. E., Leba, A., and Yıldırım, R. (2018). “Statistical review of dry reforming of methane literature using decision tree and artificial neural network analysis,” *Catal. Today*, vol. 299, pp. 289–302.
- [12] Huang, K., Zhan, X. L., Chen, F. Q., and Lü, D. W. (2003). “Catalyst design for methane oxidative coupling by using artificial neural network and hybrid genetic algorithm,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 1, pp. 81–87.
- [13] Davidson, J. W., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2003). “Symbolic and numerical regression: Experiments and applications,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 150, no. 1–2, pp. 95–117.
- [14] Bottou, L. (2010). “Large-scale machine learning with stochastic gradient descent,” in *Proceedings of COMPSTAT 2010 - 19th International Conference on Computational Statistics, Keynote, Invited and Contributed Papers*, pp. 177–186.
- [15] Jain, A. K., Mao, J., and Mohiuddin, K. M. (1996). “Artificial neural networks: A tutorial,” *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 29, no. 3, pp. 31–44.
- [16] Detection, T. (1994). “Neural Networks (and more!),” *Sci. Eng. Guid. to Digit. Signal Process.*, vol. 171, no. 1, pp. 13–18.
- [17] Hecht-Nielsen, R. (1988). “Theory of the backpropagation neural network,” *Neural Networks*, vol. 1, no. 1, p. 445.
- [18] Smola, A. J. and Schölkopf, B. (2004). “A tutorial on support vector regression,” *Stat. Comput.*, vol. 14, no. 3, pp. 199–222.
- [19] Evgeniou, T., Pontil, M., and Poggio, T. (2000). “Regularization Networks and Support Vector Machines,” *Adv. Comput. Math.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–50.
- [20] Elmaz, F., Yücel, Ö., and Mutlu, A. Y. (2019) “Evaluating the Effect of Blending Ratio on the Co-Gasification of High Ash Coal and Biomass in a Fluidized Bed Gasifier Using Machine Learning,” *Mugla J. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–15.
- [21] Mutlu, A. Y. and Yucel, O. (2018). “An artificial intelligence based approach to predicting syngas composition for downdraft biomass gasification,” *Energy*, vol. 165, pp. 895–901.

# Effects of Climate Change on the Wildfires in the Mediterranean Basin

## İklim Değişikliğinin Akdeniz Havzası'ndaki Orman Yangınlarına Etkisi

Burcu CALDA <sup>1,2</sup> , Nazan AN <sup>1,2</sup> , Mustafa Tufan TURP <sup>1,2</sup> , Mehmet Levent KURNAZ <sup>2,3</sup> 

<sup>1</sup> Boğaziçi Üniversitesi, Çevre Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, 34342, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup>Boğaziçi Üniversitesi, İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, 34342, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup> Boğaziçi Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 34342, İstanbul, Türkiye

### Öz

İklim değişikliği ile birlikte son yıllarda Akdeniz Havzası'nda orman yangınlarının sayısında ciddi bir artış gözlenmiştir. Gerçekleşen bu yangınlar ormanlara doğal felaketlerden daha çok zarar vermektedir. Çıkan yangınların bir kısmı artan kurak hava koşulları nedeniyle doğal yollardan meydana gelirken, diğer bir kısmı ise ihmal ya da kasit sonucunda oluşan ve büyük ölçüde iklim elemanlarının (sıcaklık, yağış, rüzgâr, nem vb.) etkisiyle büyüklüğü değişen yangınlar olarak ortaya çıkmaktadır. Orman yangınlarının öngörülmesinde kuraklık ile orman yangınları arasındaki ilişkiyi ele alan farklı indisler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, olası orman yangınlarını öngörmek amacıyla yaygın olarak kullanılan yangın indislerinden; Haines İndisi (HI), Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI), Keetch-Byram Kuraklık İndisi (KBBDI), F İndisi detaylı olarak, Entegre Yangın İndisi (IFI), McArthur Mark 5 (Mk5) Orman ve Mark 4 (Mk4) Otlak Yangın Tehlike İndisi (McArthur Mark 5 (Mk5)), Fosberg Yangın Hava İndisi (FFWI), Nesterov İndisi (NI) ve Angström İndisi (AI) kısaca ele alınmıştır. İklim değişikliğinin orman yangınlarına etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar kapsamında Antalya, Çanakkale ve Muğla Orman Bölge Müdürlüklerine bağlı orman arazilerinde 2008 ve 2009 yıllarında çıkan yangınlar Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar 2008 ve 2009 yılı yangın verileri ile tutarlılık göstermiştir ve FWI değerleri bu yıllar için yangın riskini öngörmeye başarılı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Türkiye, Akdeniz Havzası, Haines İndisi (HI), Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI), Keetch-Byram Kuraklık İndisi (KBBDI), F İndisi

### Abstract

Along with climate change, there has been a significant increase in the number of forest fires in the Mediterranean Basin in recent years. These fires cause more damages to forests than natural disasters. While some of the fires are caused by natural due to increasing arid weather conditions, the other part emerges as a result of negligence or intent and it appears to be that the fires vary in size because of the effects of climate elements (temperature, precipitation, wind, humidity etc.). In order to predict forest fires, different indices are used to address the relationship between drought and forest fires. In this study, widely used fire indices to predict possible forest fires; Haines Index (HI), Canada Forest Fire Weather Index (FWI), Keetch-Byram Drought Index (KBBDI), F Index in detail and Integrated Fire Index, McArthur Mark 5 (Mk5) Forest and Mark 4 (Mk4) Grassland Fire Danger Index, Fosberg Fire Weather Index, Nesterov Index are briefly reviewed. In the light of studies about the impact of climate change on forest fires, the fires in 2008 and 2009 in the forest areas of Antalya, Çanakkale and Muğla Regional Forest Service have been examined by using the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI). The results have been consistent with fire data for 2008 and 2009 and FWI values have been successful in predicting fire risk for these years.

**Keywords:** Turkey, the Mediterranean Basin, Haines Index (HI), Canadian Forest Fire Weather Index (FWI), Keetch-Byram Drought Index (KBBDI), F Index

## I. GİRİŞ

Orman yangınları ağaçlara ve bitki örtüsüne parazitlerden, böceklerden, sert hava şartları ve benzeri doğal felaketlerden daha çok zarar vermektedir [1]. Yıllardır büyük orman yangınları ile ilgili yapılan çalışmalar bu yangınların nedenlerinin atmosferik kararsızlık ve kuruluk ile ilgili olduğunu göstermektedir [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. İklim değişikliği ile birlikte sıcaklığın yükselmesi, kuraklığın artması, sürekli olan sıcaklık dalgaları gibi meteorolojik ve iklimsel koşullar orman yangınlarını ve yangınlara maruz kalan bölgelerin sayısını arttırmaktadır [1, 9]. Akdeniz Havzası'nda, orman yangınları özellikle yaz aylarında, kurak sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde sıklıkla görülmektedir. Bu durum gün geçtikçe önemi artarak büyüyen ekolojik bir problemdir [1].

Kurak ve sıcak iklim koşulları orman yangınlarını arttırmakla birlikte, yangının başlaması için iklim koşulları yeterli değildir. Yangın ortamdaki oksijen, sıcaklık ve yakıtın (genellikle ölü yanıcı madde olarak tanımlanan yüzeydeki otsu veya ince yanıcı materyaller) belli bir oranda bir araya gelerek yanma reaksiyonu oluşturması ile başlamaktadır ve bu üç unsur yangın üçgeni olarak adlandırılır. Bir orman yangının başlaması için gerekli olan faktörler; yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem, şiddetli rüzgarlar ve kısa süreli şiddetli yağış ile oluşan ani fırtınalar gibi giderek sıklaşmaya başlayan sert hava koşullarıdır [1, 10]. Bu durum, orman yangınlarının önceden daha iyi öngörülebilmesi için, yangın-iklim ilişkisini daha iyi anlama ve daha güvenilir modellerin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymuştur [11]. Kuraklık ile orman yangınları arasındaki ilişki birçok ülke tarafından farklı indisler kullanılarak değerlendirilmektedir. ABD, Kanada ve Rusya gibi ülkelerde orman yangınları ile kurak koşullar arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılan çok sayıda indis bulunmaktadır. Keetch-Byram Kuraklık İndisi (KBDI), Kanada Orman Yangın İndisi (Canadian Forest Fire Weather Index) (FWI), Haines İndisi (Haines Forest Fire Weather Index) ve Nesterov Tutuşma İndisi bunlardan bazılarıdır [12, 13, 14, 15].

Orman yangınları ile iklim ilişkisini ele alan farklı bölgelerde yapılmış birçok çalışma, iklim değişikliği ve artan sıcaklıkların etkisine dikkat çekmektedir [6, 4, 17, 16]. Akdeniz ikliminin görüldüğü Avrupa Birliğinde bulunan 5 güney Avrupa ülkesi; Portekiz, İspanya, Güney Fransa, İtalya ve Yunanistan (EUMED, the southern countries of the European Union) çıkan bütün orman yangınları ile Amerika, Pasifik kıyı bölgelerinde Kaliforniya ve Oregon, (PWUSA, the Pacific western coast of the USA) çıkan ulusal orman yangınları sayısının sıcaklığın yüksek olduğu ve kurak olduğu yaz dönemlerinde bir artış gösterdiği kaydedilmiştir [18]. Kanada'da her yıl ortalama 2 milyon hektar ormanlık alan

büyük orman yangınları nedeniyle yok olmaktadır. Yangınlar sıcaklığın arttığı yaz sezonunda (Mayıs-Ağustos) gerçekleşmektedir [19, 20]. İklim değişikliğinin, son yıllarda Kanada'da çıkan orman yangınları üzerinde etkisi olduğu görülmüştür [21, 22]. İklim değişikliği ile birlikte orman yangınlarının sayısının artış gösterdiği bölgelerden birisi de Lübnan sedir ormanlarıdır. Araştırmalar çıkan büyük orman yangınlarının %43,46'sının iklim değişikliği nedeniyle çıktığını göstermektedir [23]. Yapılan araştırmalar gelecekte çok sıcak iklim koşulları altında, yangın sezonlarının uzayacağını ve orman yangınlarının artacağını göstermektedir [21, 24].

Köppen – Geiger iklim sınıflandırmasında, nemli orta enlem iklimleri (ılıman), 25° – 60° enlemleri aralığında bulunan bölgelerde görülmektedir. Bu bölgeler arasında Akdeniz Havzası da yer almaktadır. Orman yangınlarının sık gözlemlendiği Akdeniz Havzası, Köppen-Geiger iklim sınıflandırması Cs grubunda yer alan ve genel olarak kışları ılıman ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak iklim tipine sahiptir [25, 26, 27]. Akdeniz iklimi, Csa (Yazları çok sıcak ve kurak) ve Csb (Yazları sıcak ve kurak) olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Bu iklimlerin görüldüğü yerler; Fransa, İtalya, Yunanistan, Türkiye, Portekiz, İspanya, Kuzey Afrika (Fas, Tunus, Cezayir), Lübnan ve İsrail'dir. Ayrıca Akdeniz iklimi İran'ın kuzeyinde, Kaliforniya'da, Şili'de, Avustralya'da, Yeni Zelanda'da ve Güney Afrika'da da görülmektedir [1].

Akdeniz Havzası, kurak iklimler (B grubu) ve nemli karasal iklimlerin (D grubu) görüldüğü bölgeleri de kapsamaktadır [1, 27,28]. Kurak iklimler (B grubu) yıllık buharlaşmanın yıllık yağıştan daha fazla olduğu ve buna bağlı olarak sürekli olarak bir su yetersizliğinin görüldüğü iklimler olarak ifade edilir. Çöl (BW) ve Step (BS) iklimi olmak üzere iki alt gruba ayrılır [26]. Step iklimi ağırlıklı olarak İber ve Anadolu yarımadaalarında, Hazar Denizi'nin çevresinde ve Kuzey Afrika'da Sahel bölgesinde (Sahra'nın güney sınırında) görülmektedir. Akdeniz Havzası'nda, çöl ikliminin (BW) baskın olarak görüldüğü yerler ise Kuzey Afrika, Orta Doğu, Arap yarımadaalarının bulunduğu bölgelerdir. Nemli soğuk orta enlem iklimleri (D grubu), Akdeniz Havzası'nın kuzeyinde, Kafkasya'da, Balkanlar, İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde görülmekte ve genel olarak nemli ve kışları şiddetli geçen iklimler olarak adlandırılmaktadır [1, 26, 27].

Akdeniz ekosistemleri, orman yangınlarının baskın olarak görüldüğü ekosistemlerdir. 1950-2000 yılları arasında Doğu İber Yarımadası'nda gerçekleşen orman yangınları ile iklim arasındaki ilişkiyi ele alan bir çalışmada, 350 meteoroloji istasyonundan alınan sıcaklık ve yağış verileri ile çıkan yangın sayısı incelenmiştir. Bu yıllar arasında bu



ekosistemlerde gerçekleşen orman yangınlarının sayısında ciddi bir artış gözlenmiştir ve bu artışın iklimsel faktörlerle ilişkili olduğu kaydedilmiştir [17]. Yazların kurak ve sıcak geçmesi bu artışta önemli bir etkidir. Akdeniz ikliminin görüldüğü bölgelerde iklim değişikliği ile birlikte sıcaklığın arttığı ve bu sıcaklık artışı ile birlikte orman yangınlarının sayısında bir artış olduğu kaydedilmiştir [29, 30, 31]. Bu bilgilere dayanarak sıcaklığın, orman yangınlarının artmasında önemli bir faktör olduğu söylenebilir. Yangınların çıkmasında ve yayılmasında etkili olan diğer faktörler ise yakıt ve nem oranıdır [19].

Topraktaki yüksek nem içeriği bitkilerin stabil bir şekilde büyümesini sağlamak ve topraktaki nemin azaldığı alt katmanlara kadar orman yangınlarının genişlemesini engelleyerek bariyer görevi görmektedir [32]. Bu nedenle toprağın ve yakıtın nem içeriğinin, durdurulamayan büyük orman yangınları üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır [33, 34, 35, 36]. Akdeniz Havzası'nda yer alan İspanya' da 1970-2007 yılları arasında yaz aylarında gerçekleşen ve önlenemeyen orman yangınlarının iklim değişikliği ile orman yangınlarının sayısı ve yangının çıktığı bölgelerdeki iklim koşullarına bağlı olarak ilişkili olduğu görülmüştür. Bölgesel İklim Modelleri (RCMs) kullanılarak SRES A1B iklim değişikliği senaryosu (enerji kaynaklarının dengeli kullanımı) altında, iklim değişikliğinin sıcaklığı arttırdığı ve özellikle yaz aylarında havadaki bağıl nem oranını düşürdüğü gözlenmiştir [37]. Bu durum, artan sıcaklıkla birlikte yakıtta azalan nem içeriğinin yakıtın tutuşabilirliğini arttırdığı ve buna bağlı olarak yangının çıkmasına neden olduğunu göstermektedir [37, 38, 39].

Orman yangınları Akdeniz ekosistemlerinin önemli bir parçasıdır. Batı Akdeniz Bölgesi'nde (Valensiya Bölgesi) son yüzyıl boyunca gerçekleşen orman yangınları ve çıkış nedenlerini ele alan bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, orman yangınlarının şehirleşmeyle birlikte kırsal nüfusun azalmasına bağlı olarak yakıt miktarının ve sürekliliğinin artması (çiftlikler terk edildikten sonra bitki örtüsü ve yakıt artışı) nedeniyle mi yoksa iklim değişikliğinden dolayı mı çıktığını anlamak için kırsal nüfus ve iklimsel verilere bakılmıştır. 1970 yılından önce iklim koşullarının orman yangınlarında düşük bir etkiye sahip olduğu, 1970 yılından sonra çıkan orman yangınlarında ise iklimin önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Son yıllarda çıkan orman yangınlarında kurak hava koşullarının yangınların çıkışında önemli bir faktör olduğu ve bu durumun iklim değişikliği nedeniyle artan sıcaklıklar sonucunda daha da sık görülebileceği ifade edilmiştir [36].

Akdeniz iklim kuşağı içinde yer alan Türkiye'de, özellikle Batı Toroslar, yüzlerce orman yangınının meydana

geldiği bir bölgedir. Muğla yöresi orman yangınları açısından Türkiye'nin en hassas olduğu alanlardan biridir [40, 41]. Bu yangınların bir kısmı iklim değişikliğiyle birlikte artan kuraklık nedeniyle doğal yollardan meydana gelirken, diğer kısmı ise ihmal sonucu ya da kasıtlı çıkarılan ve büyük ölçüde iklim elemanlarının (sıcaklık, yağış, rüzgâr, nem vb.) etkisinde büyüklüğü değişen yangınlardır. Bu nedenle bölgenin iklim faktörüne bağlı doğal yangın risk haritasını belirlemek için yapılan çalışmada Keetch-Byram Kuraklık İndisi kullanılarak orman yangınlarının yaz aylarında artan kuraklık ile ilişkisine bakıldığında, Temmuz'dan Kasım'a kadar olan dönemde, kuraklık arttığında meteorolojik koşullara bağlı olarak çıkan değerler de artmaktadır [40]. Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde, meteorolojik kökenli yangın riskinin özellikle Ağustos ve Eylül aylarında yükseldiği ifade edilmektedir [40, 42].

Orman yangınları bitki örtüsüne zarar vermekle kalmayıp karasal ekosistemleri ve karbon döngüsünü de küresel boyutta etkilemektedir [43]. Gelecekte Akdeniz Bölgesi'nin büyük bir kısmında ve Kuzeydoğu Avrupa Bölgesi'nde gerçekleşmesi olası orman yangınları, havada bulunan CO<sub>2</sub> miktarını arttıracak için hava kirliliğinin temel kaynağını oluşturacağı öngörülmektedir. Bu durumu iklim değişikliği ile birlikte artan hava sıcaklığı olumsuz yönde etkileyeceği ifade edilmektedir [44]. İklim değişikliği nedeniyle artan sıcaklık ve kuraklık, Akdeniz iklim kuşağında bulunan ve subtropikal Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgelerde yaz aylarında, kurak sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde yangın riskini arttıracak belirtilmiştir [1].

Önlenemeyen büyük orman yangınlarının çıkış nedenleri ele alındığında, yangınların bir kısmı iklimsel koşullardan dolayı başlarken diğer kısmının insan kaynaklı olarak başladığı gözlenmiştir [45, 46]. Bu durumu ele alan bir araştırmaya göre, İtalya'nın Sardinya Adası ve Fransa'nın Korsika Adası'nda engellenemeyen orman yangınlarının çıkış nedenleri ve yangınların büyüklüklerinin çoğunlukla arazi kullanımı ve kasten yangın çıkarma ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Orman yangınlarının iklim ile ilişkisi ise Fire Weather Index (FWI) kullanılarak bakılmıştır. Orman yangını sezonu (Mayıs-Ekim) boyunca FWI değerlerinin 30'dan 60'a yükseldiği tespit edilmiştir. FWI>40 olduğu günler ile orman yangınlarının çıktığı günler arasında bir ilişki olduğu görülmüştür [46].

## II. VERİ VE METODOLOJİ

### 2.1. Haines İndisi (HI)

Donald A. Haines 1988 yılında önlenemeyen büyük orman yangınlarının hava olayları ile ilişkisini bir indis ile

göstermiştir. Haines, bu indisi Düşük Atmosfer Şiddeti İndisi (Lower Atmospheric Severity Index) olarak adlandırmış, ancak zaman içerisinde bu indise Haines İndisi (HI) denmiştir. HI, dikey konvektif hava hareketleri yatay rüzgârlardan daha önemli olduğunda, potansiyel orman yangınlarını belirten önemli bir göstergedir [47]. HI ile havadaki nem oranı, çiy noktası sıcaklığı hesaplanabilmektedir. HI üç jeopotansiyel yükselti aralığında hesaplanmaktadır: alçak yükselti (950 – 850 hPa), orta yükselti (850-700 hPa) ve yüksek rakım (700-500hPa) [1, 48]. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak, orman yangınlarının nasıl gerçekleştiği ve yangının büyüklüğü konusunda bilgiler elde edilmektedir. HI, Kanada Orman Yangın Hava İndisi ve Keetch-Byram Kuraklık İndisi ile birlikte çok yaygın olarak kullanılan indislerden biridir [1,2, 3, 4, 5, 8]. Tatlı & Türkeş (2014) tarafından HI kullanılarak, Akdeniz Havzası ve Türkiye orman yangın risk değerlendirilmesinin yapılmıştır. Çalışma sonucunda HI'nin büyük orman yangınlarını gözlemlemek için kullanılabilir önemli bir indis olduğu ifade edilmiştir.

Bu indis ile ilgili hesaplamalar aşağıdaki gibi yapılmaktadır [1]:

-Doyma (çiylenme) sıcaklığı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$T_d = \left[ 237.3 \times \ln \frac{e}{6.1078} \right] / \left[ 17.27 - \ln \frac{e}{6.1078} \right] \quad (1)$$

Formülde yer alan  $e$  (gerçek buhar basıncı) ile ilgili veri olmadığı için bu değer bağıl nem (RH) ve sıcaklık (T) verileri kullanılarak önce doymuş buhar basıncı ( $e_s$ ) daha sonra gerçek buhar basıncı Clausius-Clapeyron eşitliği kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$e_s = e_0 \cdot \exp \left[ \frac{L}{R_v} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

0 °C' de  $e_0$  (0.611 kPa) referans buhar basıncı ve  $T_0$  (273.15K) referans hava sıcaklığı formüldeki sabit değişkenlerdir. Denklemde L ( $2.5 \times 10^6$  J/kg) buharlaşma gizli ısı ve  $R_v$  ( $461 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) ise nemli havanın gaz sabitidir [26].

$$e = \frac{RH}{100} e_s \quad (3)$$

HI = A (kararlılık terimi) + B (nem terimi) formülü ile hesaplanır. Hesaplama kullanılan doyma noktası sıcaklığı ( $T_d$ ) ve sıcaklık (T) değerleri ise aşağıdaki tablolarda gösterildiği gibi hesaplanarak formüldeki yerine yazılır.

**Tablo 1.** Haines İndisi kararlılık (A) bileşen kategorisine göre hesaplama adımları

Yükseklik	Alçak $\Delta TA = T950 - T850$	Orta $\Delta TA = T850 - T700$	Yüksek $\Delta TA = T700 - T500$
Kararlılık (A) Bileşen Kategorisi	A = 1 ise $\Delta TA < 4^\circ\text{C}$	A = 1 ise $\Delta TA < 6^\circ\text{C}$	A = 1 ise $\Delta TA < 18^\circ\text{C}$
	A = 2 ise $4^\circ\text{C} \leq \Delta TA \leq 7^\circ\text{C}$	A = 2 ise $6^\circ\text{C} \leq \Delta TA \leq 10^\circ\text{C}$	A = 2 ise $18^\circ\text{C} \leq \Delta TA \leq 21^\circ\text{C}$
	A = 3 ise $\Delta TA > 7^\circ\text{C}$	A = 3 ise $\Delta TA > 10^\circ\text{C}$	A = 3 ise $\Delta TA > 7^\circ\text{C}$

**Tablo 2.** Haines İndisi nem (B) bileşen kategorisine göre hesaplama adımları

Yükseklik	Alçak $\Delta TB = T950 - Td950$	Orta $\Delta TB = T850 - Td850$	Yüksek $\Delta TB = T700 - Td700$
Nem (B) Bileşen Kategorisi	B = 1 ise $\Delta TB < 6^\circ\text{C}$	B = 1 ise $\Delta TB < 6^\circ\text{C}$	B = 1 ise $\Delta TB < 15^\circ\text{C}$
	B = 2 ise $6^\circ\text{C} \leq \Delta TB \leq 9^\circ\text{C}$	B = 2 ise $6^\circ\text{C} \leq \Delta TB \leq 12^\circ\text{C}$	B = 2 ise $15^\circ\text{C} \leq \Delta TB \leq 20^\circ\text{C}$
	B = 3 ise $\Delta TB > 9^\circ\text{C}$	B = 3 ise $\Delta TB > 12^\circ\text{C}$	B = 3 ise $\Delta TB > 20^\circ\text{C}$

HI değerleri 2 ile 6 arasında değişmektedir. HI büyük orman yangınlarının gerçekleşme olasılığı: 6 en yüksek, 5 ortalama, 4 düşük ve 4 ün altı ise çok düşük olasılık olarak belirtilmektedir (Tablo 3).

**Tablo 3.** HI aralık değerlerinin risk sınıfı olarak gösterilmesi

Risk Sınıfı	HI Aralığı
Yüksek	6
Orta	5
Düşük	4
Çok Düşük	2-3

Tatlı ve Türkeş (2014) tarafından yapılan bir araştırmada, Akdeniz Havzası'nda olası yangın riski HI kullanılarak değerlendirilmiş ve Köppen – Geiger İklim Sınıflandırmasından da yararlanılarak şu sonuçlara ulaşılmıştır: Türkiye'nin güney ve batı bölgeleri, Yunanistan, Arnavutluk, Makedonya, Güney Fransa, İtalya, Slovenya, Fas, Tunus astropikal iklim bölgeleridir ve yazları kurak geçer HI'ne göre bu bölgeler orta dereceli (HI, 5) risk alanlarıdır. Çöl iklimine sahip olan bölgeler yüksek risk alanlarıdır. HI bu bölgelerde 4, 5 ve 6 değerlerini göstermektedir. Yangın riskinin yüksek olduğu bu bölgeler, Sahra, Libya ve Ortadoğu ve Hazar Denizi Havzası'dır.

HI kullanılarak alçak (950 – 850 hPa), orta (850-700 hPa) ve yüksek (700-500hPa) olmak üzere üç farklı jeopotansiyel yükselti aralığında yangın riski Valensiya Bölgesi (Batı Akdeniz Bölgesi) için değerlendirilmiştir. 1980 – 2008 yılları arasındaki iklim verileri kullanılarak yapılan çalışmada, yüksek HI değerleri yaz mevsiminde (Haziran, Temmuz ve Ağustos) gözlenmektedir. HI değerleri, alçak yükselti (950 -850 hPa) için ortalama 4.1, orta yükselti (850-700 hPa) için 4.4 ve 5 arasında ve yüksek rakım(700-500hPa) için ise 2.8 ile 3.5 arasındadır. 29 yıllık bir periyodu ele alan bu çalışmada, yıllık ortalama HI değerlerinde ve yıllık ekstrem (5 ve 6) değerlerde bir artış olduğu gözlenmiştir. En yüksek HI değerleri orta yükselti için kaydedilmiş olsa da diğer yükselti değişkenlerinde de (alçak ve yüksek yükselti) ekstrem HI değerlerine rastlanmaktadır [8].

## 2.2. Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI)

Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI), orman yangınları ile ilgili yapılan araştırmalarda sıkça kullanılan orman yangını indislerinden biridir ve olası orman yangınlarını tahmin etmede başarılı bulunmaktadır [49, 50, 51, 52]. FWI ilk olarak 1970 yılında, Kanada Orman Servisi (The Canadian Forestry Service) tarafından daha öncesinde yapılan birtakım araştırmalar sonucu ortaya çıkarılmıştır. Bu indis kendinden önceki orman yangın riski indislerinin (Initial Spread Index (ISI) ve Build-Up Index (BUI)) birleşimi ile oluşturulmuştur [53]. FWI, orman tabanındaki farklı toprak katmanlarındaki nem değişimlerini dikkate almaktadır. İndis, yakıt nem değerleri ile güncel hava koşullarını birlikte değerlendirerek olası orman yangınlarını hesaplamaktadır [54].

FWI sistemi altı bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan ilk üç tanesi FFMC, DMC ve DC nem kodlarıdır:

Orman altı yüzeyini kaplayan ölü organik örtüden (dal, yaprak, kabuk vb. organik döküntü ve artıklar) oluşan ince katmanın nem içeriği kodu (Fine Fuel Moisture Code) (FFMC): Orman tabanında 0-1,2 cm derinlikte bir alanda bulunan (0,25 kg/m<sup>2</sup>) kuru otlar ve diğer yanıcı materyallerin nem oranını göstermektedir. FFMC hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

**Tablo 4.** FFMC hesaplamasında kullanılan parametreler ve çıkış aralığı

Girdiler (Inputs)	Başlangıç Durumu (Initial Condition)	Çıkış Aralığı (Output Range)
Sıcaklık (T) (°C) Bağıl Nem (RH) (%) Rüzgâr Hızı (WS) (km/h) Yağış (mm)	Önceki FFMC	0 – 101

$$FFMC = \frac{59.5(250-m)}{147.2+m} \quad (4)$$

$$m = \frac{147.2(101-FFMC)}{59.5+FFMC} \quad (5)$$

m= nem içeriği (moisture content)

Kuru:

$$k_0 = 0.424 \left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^{1.7}\right) + 0.0694\sqrt{WS} \left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^8\right) \quad (6)$$

Islak:

$$k_0 = 0.424 \left(1 - \left(\frac{100-RH}{100}\right)^{1.7}\right) + 0.0694\sqrt{WS} \left(1 - \left(\frac{100-RH}{100}\right)^8\right) \quad (7)$$

k değeri  $\log\left(\frac{m}{gün}\right)$  hesabına göre değişebilir:

$$k = k_0(0.581e^{0.0365T}) \quad (8)$$

$$E_{kuru} = 0.942RH^{0.679} + 11e^{\frac{RH-100}{10}} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115RH}) \quad (9)$$

$$E_{islak} = 0.618RH^{0.753} + 11e^{\frac{RH-100}{10}} + 0.18(21.1 - T)(1 - e^{-0.115RH}) \quad (10)$$

$$m = E_{kuru} + (m_0 - E_{kuru}) \times 10^{-k_{kuru}} \quad (11)$$

$$m = E_{islak} + (E_{islak} - m_0) \times 10^{-k_{islak}} \quad (12)$$

Organik yüzey artık ve döküntülerinin altında, daha derinde bulunan ayrılmış organik maddenin nem içeriği kodu (Duff Moisture Code) (DMC): Orman tabanında 1,2 – 7 cm derinlikte bulunan (5 kg/m<sup>2</sup>) çürüyen (decomposing) organik materyallerin nem içeriğini göstermektedir. DCM hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmaktadır:

**Tablo 5.** DMC hesaplamasında kullanılan parametreler ve çıkış aralığı

Girdiler (Inputs):	Başlangıç Durumu (Initial Condition)	Çıkış Aralığı (Output Range)
Sıcaklık (T) (°C) Bağıl Nem (RH) (%) Yağış (mm)	Önceki DMC	MAX = %300 EQ = %20

$$DMC = 244.72 - 43.43 \ln(m - 20) \quad (13)$$

Kuraklık kodu (Drought Code) (DC): Orman tabanında 7+ cm derinlikte bulunan (25kg/m<sup>2</sup>) organik nem içeriğini göstermektedir.

**Tablo 6.** DC hesaplamasında kullanılan parametreler ve çıkış aralığı

Girdiler (Inputs):	İlk Durum (Initial Condition):	Çıkış Aralığı (Output Range):
Sıcaklık (T) (°C) Yağış (mm)	Önceki DC	MAX= %400

$$D=400\ln(800/Q) \quad (14)$$

D= şimdiki DC (current DC)

Q= m equivalent

FFMC, DMC ve DC nem kodlarına rüzgâr hızı değerleri de eklenecek İlk Yayılma İndisi (Initial Spread Index) (ISI) ve Arttırma İndisi (Build-Up Index) (BUI) oluşturulmuştur FWI sisteminin diğer iki bileşeni olan bu iki indisin bileşimi ile son bileşen olan FWI (Şekil-1) elde edilmiştir [53, 54]. FWI hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılmaktadır [54]:

ISI:

**Girdiler:** WS(km/h), FFM

$$\text{Rüzgar (W) denklemleri: } f(W)=e^{0.0503W} \quad (15)$$

$$\text{FFM denklemleri: } f(F) = e^{-0.1386m} \left(1 + \frac{m^{5.31}}{4.93 \times 10^7}\right) \quad (16)$$

$$ISI=0.208f(W)f(F) \quad (17)$$

BUI:

**Girdiler:** DMC, DC

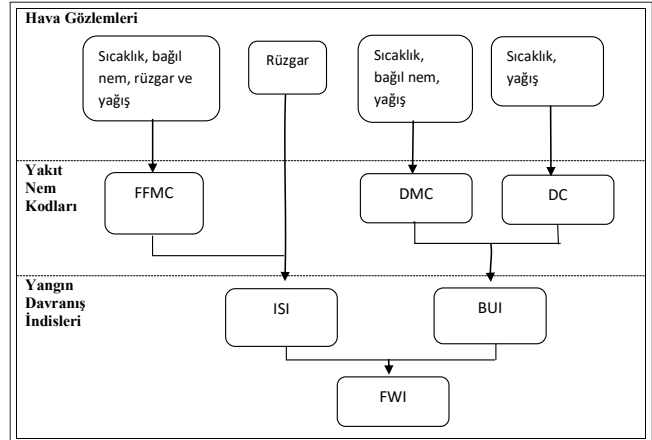
$$BUI = \frac{0.8(DMC)(DC)}{(DMC+0.4DC)} \quad (18)$$

$$BUI < 80 \quad f(D)=0.626BUI^{0.809}+2 \quad (19)$$

$$BUI > 80 \quad f(D) = \frac{1000}{25+108,64e^{-0.023BUI}} \quad (20)$$

$$\ln(FWI) = 2.72 \quad (21)$$

Eğer  $(0,1 \text{ ISI } f(D)) < 1$  olursa  $FWI = (0,1 \text{ ISI } f(D))$  şeklinde hesaplanır.

**Şekil 1.** FWI ve alt bileşenleri

FWI, yangının çıkma olasılığı çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek ve ekstrem olmak üzere altı kategoriye ayrılır ve değer aralığı Tablo-7'deki gibidir [53]:

**Tablo 7.** FWI aralık değerlerinin risk sınıfı olarak gösterilmesi

Risk Sınıfı	FWI Aralığı
Ekstrem	30+
Çok Yüksek	17 – 29
Yüksek	9 – 16
Orta	5 – 8
Düşük	2 – 4
Çok Düşük	0 – 1

Akdeniz ikliminin görüldüğü İtalya ve Yunanistan'da yangın riski, FWI kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada yangın riskini öngörmek amacıyla, İtalya için 1984 – 1995 yılları arasında Nisan – Kasım aylarını kapsayan iklim ve yangın verileri kullanılırken, Yunanistan için 1983 – 1990 yılları arasındaki meteorolojik verilerden ve günlük yangın verilerinden yararlanılmıştır. Çalışmada, FWI değeri 15 ya da daha yüksek değerler için yangın riski yüksek olarak ifade edilirken, FWI değeri 45 ya da daha yüksek değerler için ekstrem olarak ifade edilmiştir. Araştırma sonucunda bu iki FWI değerlerinin (15, 45) eşik değerleri olarak seçilmesinin, hesaplanan FWI değerleri ile gözlemlenen yangınlar arasındaki ilişkiyi göstermek için uygun olduğu ifade edilmiş ve bu bilginin diğer analizlerle birlikte kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Araştırma, FWI'nin yangın riskini öngörmedeki başarısı orman altı yüzeyini kaplayan ölü organik örtüden (dal, yaprak, kabuk vb. organik döküntü ve artıklar) oluşan ince katmanın nem içeriğinden kaynaklıdır. İnce katmanın nem içeriğinin tutuşturma (ignition) potansiyelinin bir göstergesi olması bunun nedeni olarak gösterilmektedir. Araştırma sonucunda, Akdeniz ikliminin görüldüğü

İtalya ve Yunanistan'da yangın riski öngörmede FWI'nin yararlı olduğu ifade edilmiştir [55].

Doğu Akdeniz Havzası'nda yer alan Yunanistan'ın (Girit) birbirini takip eden iki yangın sezonu dikkate alınarak FWI bu bölge için yangın riskini değerlendirmedeki potansiyeline bakılmıştır. Çalışmada, FWI yangın risk sınıflarını ifade etmek amacıyla kullanılan aralık değerlerini Akdeniz iklimine uygun hale getirmek amacıyla lojistik regresyon uygulanmıştır. Değer aralıkları 0–38 Düşük, 39–48 Orta, 49–59 Yüksek, > 60 Ekstrem şeklinde yeniden düzenlenmiştir. Araştırmada yeni sınıflandırmanın gerekliliği, mevcut Kanada yangın risk sınıflarının Girit'teki kuru ve aşırı yangına eğilimli Doğu Akdeniz iklimi için uygun olmamasıyla açıklanmıştır. Değişiklikten sonra, FWI değerlerinin yangın riskini öngörmede daha başarılı olduğu ve doğruluğunun orman yangınları verileri ile kıyaslanarak kanıtlandığı ifade edilmiştir. Araştırma sonucunda yeni FWI yangın risk sınıflarının, Doğu (kuru) Akdeniz Bölgesi'nde yangın riski değerlendirmesi için bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, gelecekteki araştırmalar için FWI'nin Akdeniz ikliminin görüldüğü bölgelerde uygulanabilirliği konusunda daha net olmak için geniş ölçekte ve daha uzun bir süre boyunca benzer çalışmalar yapılması gerektiği belirtilmiştir [50].

### 2.3. Keetch – Byram Kuraklık İndisi

Keetch-Byram Kuraklık İndisi (KBDI), 1968 yılında John J. Keetch ve George M. Byram tarafından potansiyel orman yangınlarını hesaplamak amacıyla geliştirilmiştir. İndis, toprak nemi ile iklim koşullarına bağlı olası kuraklığı tahmin etmek için kullanılan bir kuraklık indisidir [41]. KBDI, toprak nem içeriği, maksimum hava sıcaklığı, potansiyel evapotranspirasyon ve yağış değerlerini kullanarak iklim faktörüne bağlı doğal yangın risk haritasını belirlemek için kullanılmaktadır [40, 41, 56]. KBDI aşağıdaki varsayımlara dayanılarak kurulmuştur [41, 56]:

Bir ormanlık alandaki nem kaybı oranı o bölgedeki bitki örtüsünün yoğunluğuna bağlıdır.

Vejetasyonun terleme ile kaybettiği nem yıllık yağış miktarını etkiler. Bu duruma bağlı olarak vejetasyondaki azalma nem oranının azalmasına neden olduğundan yıllık yağışın da azalmasına neden olur.

Buharlaşma-terleme (evapotranspirasyon) miktarı artıkça topraktaki nem azalır. Bu nedenle toprak nem oranı buharlaşma-terleme ilişkilerine bağlıdır.

Toprak nem miktarının zamanla azalması, en küçük nem düzeyi olarak kullanılan bitkinin kuruma noktası nemine denk gelir. Benzer koşullar altında belirli bir zamanda

toprağın kuruma noktası nemi toprak tabakasındaki su miktarı ile doğru orantılıdır.

Kuraklığın oluştuğu toprak tabakasının derinliği 20 santimetrelilik tarla kapasitesine denk gelir. Bu değer 20 santimetre olması zorunlu olmamakla birlikte orman yangınlarının kontrolü açısından bu değer uygundur. Bunun nedeni ise birçok bölgede bitki örtüsünün yaz boyunca terleme ile çok su kaybetmesi olasılığındadır.

Yangın çıkma olasılığı hesaplanırken sıcaklık (T) ve yağış (P) değerleri kullanılarak aşağıdaki denklemler kullanılır:

1. Durum: Eğer  $P=0$  mm ve  $T_{max} \leq 6.78$  °C  $I(t)=I(t-1)$
2. Durum: Eğer  $P=0$  mm ve  $T_{max} > 6.78$  °C  $I(t)=I(t-1)+kf(t)$
3. Durum: Eğer  $P > 0$  mm ve  $\sum P \leq 5.1$  mm  $I(t)=I(t-1)+kf(t)$
4. Durum: Eğer  $P > 0$  mm ve  $\sum P > 5.1$  mm

$$kf(t) = \frac{[800 - I(t-1)] \cdot [(0.968 \cdot \exp(0.0875 \cdot T_{max}) + 1.5552) - 8.3]}{1000} \quad (22)$$

Denklemden yer alan P, kuraklık etmenidir ve yağış miktarı mm olarak hesaplanır.  $T_{max}$ , günlük maksimum hava sıcaklık değerini ifade eder ve °C olarak hesaplanır.

**Tablo 8.** Keetch - Byram İndisine göre yangın olasılıkları [41]

Sınıf	İndis Değeri	Yangın Olasılığı
0	0 – 99	Yok
1	100 – 199	Düşük
2	200 – 299	Orta düzeyde
3	300 – 399	Yüksek düzeyde
4	400 – 499	Oldukça yüksek düzeyde
5	500 – 599	Oldukça yüksek düzeyde
6	600 – 699	Kesin yangın çıkar
7	700 – 799	Kesin yangın çıkar

KBDI ile iklim faktörlerine bağlı olarak çıkabilecek orman yangını ihtimali hesaplanabilmektedir. Yangın çıkma olasılığının büyüklüğüne Tablo 8 'de yer alan değerlere göre karar verilmektedir. Orman yangınları açısından Türkiye'nin en hassas bölgelerinden biri olan Muğla ili için KBDI kullanılarak yapılan hesaplamalar, indisin orman yangınlarını yakalama yüzdesinin yüksek sonuçlar verdiğini göstermiştir. KBDI değerlerine göre yılın ilk dört ayı 100'ün altındadır. Bu nedenle yılın ilk dört ayı yangın riskinin görülmediği dönem olarak ifade edilmiştir. Muğla Orman Bölge Müdürlüğü (OBM) sınırları içerisinde 2008 yılında çıkan orman yangınlarının değerlendirildiği araştırma da KBDI'nin

orman yangınlarını, yangının çıkışı, yayılması ve büyümesine uygun hava ve iklim koşullarını öngörmeye başarılı olduğu ifade edilmiştir [41].

Batı Toroslar, Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye'nin orman yangınları açısından çok etkilenen bölgelerinden biridir. Bu bölgede doğal yangın riskini öngörmek amacıyla KBDI kullanıldığı bir araştırma sonucuna göre, Temmuz – Kasım ayları arasında kuraklık artmakta ve meteorolojik koşullara bağlı olarak yangın risk değerleri de artmaktadır. Yangın riski Batı Toroslar' da özellikle Ağustos ve Eylül aylarında yükselmektedir. Araştırmada Eylül ayında yangın riski artışının sıcaklıktan ziyade yağış ile ilgili olduğu çünkü KBDI değerinin azalmasının (formüle göre) ancak yağış artışı ile mümkün olacağı ifade edilmiştir. Eylül ayında KBDI değerlerinin 450 (oldukça yüksek düzey) 'den 753 (ekstrem) 'e kadar çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca KBDI kullanılarak elde edilen sonuçlar ile bu bölgede 2011 yılında meydana gelmiş olan yangın sayıları aylık düzeyde karşılaştırılarak KBDI doğruluğu test edilmiştir. 280 hektarlık orman bölgesinin 210 hektarı KBDI değerlerine göre yangın riskinin çok yüksek olduğu Temmuz – Kasım ayları arasında çıkan orman yangınları nedeniyle kaybedilmiştir. Çalışma sonucunda Akdeniz iklim kuşağında yangın riskini belirlemede KBDI'nin güvenilir olduğu ifade edilmiştir [40].

#### 2.4. F İndisi (Simple Fire Weather Index – F Index)

F İndisi, Sharples vd. (2009a) tarafından yangın tehlikesi sınıflandırması için oluşturulmuş basit bir indistir. İndis, yakıt nemi (sıcaklık ve bağıl nem kullanılarak hesaplanır) ve rüzgar hızını birleşiminden yararlanarak olası orman yangını riskini aşağıdaki formülü kullanarak hesaplamaktadır:

$$F = \frac{\max(U_0, U)}{FMI} \quad (23)$$

U, km / s cinsinden rüzgar hızını ifade etmektedir.  $U_0$ , rüzgar hızı sıfır olsa bile, yangın tehlike derecesinin sıfırdan büyük olmasını sağlamak için kullanılan eşik rüzgar hızı değeridir. Yakıt Nem İndisi (Fuel Moisture Index) (FMI), Sharples vd.(2009b) tarafından oluşturulmuş ölçsüz (dimensionless) yakıt nem indisidir. FMI mevcut diğer yakıt nem modelleri ile karşılaştırılmış ve FMI'nin karmaşık modeller tarafından üretilene eşdeğer bir yakıt nem değerini sağladığı gösterilmiştir. FMI aşağıdaki formül kullanarak hesaplamaktadır [58, 59]:

$$FMI=10-0.25(T-H) \quad (24)$$

FMI yakıt nem indisi formülünde (24), T değeri kuru termometre sıcaklığını (°C) ve H değeri ise bağıl nemi (%)

ifade etmektedir [57]. F indisi, yangının çıkma olasılığını düşük, orta, yüksek, çok yüksek ve ekstrem olmak üzere beş kategoriye ayırmaktadır ve değer aralığı Orman Yangın Tehlike İndisi (FFDI) indisi yangın riski değer aralığı temel alınarak hazırlanmış ve Tablo-9'daki gibidir [57]:

**Tablo 9.** F İndisine göre yangın risk sınıflandırması

Yangın Riski	F İndis Değeri
Düşük	0.0 – 0.7
Orta	0.7-1.5
Yüksek	1.5 – 2.7
Çok Yüksek	2.7 – 6.1
Ekstrem	> 6.1

F İndisi, rüzgar hızı, bağıl nem ve kuru termometre sıcaklığı değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. İndis, orman yangını risk haritalandırmasında iklim faktörlerini değerlendirmek için kullanılabilir yeni ve etkili bir yangın hava indisidir [58]. Türkiye'de iklim değişikliği nedeniyle uzun süreli orman yangını riski, bugün (1990 – 2010) ve gelecek (2061 – 2080) için F İndisi (Basit Yangın Hava İndisi) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, F İndisi değerleri ile çıkan yangın sayıları arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermiştir. Olası yangın riski RCP 4.5 senaryosuna göre değerlendirilmiş ve Türkiye genelinde yangın riskinin %21,1 oranında artacağı ifade edilmiştir. Araştırmada ayrıca, yangın riski oranı arttığında, özellikle Türkiye'nin Akdeniz kıyı kesimi ve Doğu Karadeniz Bölgesi gibi sıcak noktalarında bitki örtüsü değişimi beklenmekte olduğu belirtilmiştir. [60]. 2018 yılında farklı orman yangın indisinin Akdeniz Bölgesi'nde yangın riskini tahmin etmede başarısı istatistik analiz yapılarak değerlendirilmiştir. F İndisinin yer aldığı çalışmada, indisin Akdeniz Bölgesi'nde gerçekleşebilecek yangınları tahmin etmedeki başarısı Spearman korelasyon analizine göre ortalama bir değer (skor <3) göstermiştir [61].

#### 2.5 McArthur Mark 5 Orman Yangın Tehlike İndisi (McArthur Mark 5 Forest Fire Danger Index) (FFDI)

McArthur Mark 5 (Mk5) Orman ve Mark 4 (Mk4) Otlak Yangın Tehlike İndisi ( McArthur Mark 5 (Mk5) Forest and Mark4 (Mk4) Grassland Fire Danger Index), Avustralya'da iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan yangın indisi olup, çayır ve okaliptüs ormanları temel alınarak karakterize edilmiştir. McArthur, tipik yakıtlarla yapılan 800 test yangınlarından sonra ölçülen yangın davranış verilerine dayanarak indisi tasarlamıştır. İndis, Avustralya bitki örtüsünün yangın yayılma yükünü tahmin etmek için geliştirilmiş olmasına rağmen birçok bölgede kullanılmıştır [61,62].

Avustralya’da yaygın olarak kullanılmakta olan McArthur Mark 5 orman yangın ölçer, Orman Yangın Tehlike İndisi (Forest Fire Danger Index) (FFDI) olarak adlandırılmaktadır [57] FFDI’nin formülasyonu ilk olarak 1960 yılında McArthur tarafından bulunan (Mark 3) ve daha sonra Noble ve ark. tarafından 1980 yılında son hali olan FFDI (Mark 5) geliştirilmiştir. İndisin hesaplamaları aşağıdaki şekilde yapılmaktadır [57, 62, 63]:

$$FFDI = 2 \exp(-0.45 + 0.987 \ln(D) - 0.0345 H + 0.0338 T + 0.0234V) \quad (25)$$

FFDI formülünde (25), T değeri hava sıcaklığını (Bazı kaynaklarda kuru hazne hava sıcaklığı ya da maksimum hava sıcaklığı olarak da ifade edilmektedir.) (°C). H değeri bağıl nemi (%) V değeri rüzgar hızını (kmh<sup>-1</sup>) ve D değeri kuraklık faktörünü göstermektedir ve KBDI [56] kullanılarak topraktaki nem açığını aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$D = 0.191 \cdot (I + 104) \cdot (N + 1)^{1.5} / (3.52 \cdot (N + 1)^{1.5} + P - 1) \quad (26)$$

Kuraklık faktörünü (D) gösteren denklemde (26), I değeri KBDI’ni (mm), N değeri son yağıştan bu yana geçen gün sayısı ve P değeri ise yağış miktarını (mm) göstermektedir. FFDI, yangın çıkma olasılığını düşük-orta, yüksek, çok yüksek, şiddetli, ekstrem, felaket (kırmızı kod) olmak üzere altı kategoriye ayırmaktadır ve değer aralığı Tablo-10’daki gibidir [63]:

**Tablo 10.** FFDI İndisine göre yangın risk sınıflandırması

Yangın Riski	FFDI İndis Değeri
Düşük – Orta	<11
Yüksek	12 – 24
Çok Yüksek	25 – 49
Şiddetli	50 – 74
Ekstrem	75 – 99
Felaket (Kırmızı kod)	100 – 150

FFDI Akdeniz ekosisteminde de kullanılmakta ve olası yangınları öngörmeye başarılı olduğu ifade edilmektedir. [64] 2017 yılında yapılan bir araştırmada, İspanya’nın Murcia bölgesi için FFDI’nin de içinde bulunduğu farklı yangın indisleri kullanılarak olası yangın riski hesaplanmıştır. Hesaplama 2000 – 2007 yılları arasındaki yangın ve iklim verileri kullanılmış ve bu veriler 48 meteoroloji istasyonundan alınmıştır. Araştırmada kullanılan verilerin periyoduna, mevcut yangın verilerinin ve yangın söndürme organizasyonunun yüksek homojenliğine göre karar verildiği ifade

edilmiştir. Bu indislerin yangın riskini öngörmedeki başarıları Spearman korelasyon analizi kullanılarak gösterilmiştir. Araştırma sonunda FFDI, 3’ün altında bir değer ile orta dereceli olarak sınıflandırılmış ve bu bölge için başarılı sonuçlar vermediği ifade edilmiştir [63].

## 2.6. Literatürde Yer Alan Diğer Yangın İndisleri

Entegre Yangın İndisi (IFI) (Integrated Fire Index), Akdeniz Bölgesi’nin iklim ve vejetasyon özellikleri dikkate alınarak geliştirilmiş ve kalibre edilmiş bir yangın risk sınıflandırması indisidir. IFI, hava ve yakıt girdilerine dayalı deneysel bir yangın risk indeksi olmakla beraber yangın sezonunda günlük yangın tehlikesi tahmini için Bölgesel Sivil Koruma Servisi tarafından Sardinya’da kullanılmıştır [65]. 2018 yılında yapılan bir çalışmada indisin Akdeniz Bölgesi’nde olası yangınları tahmin etmede başarılı olduğu ifade edilmiştir [61].

Fosberg Yangın Hava İndisi (FFWI), iklim verilerinden, sıcaklık, nispi nem ve rüzgar hızından, yararlanarak olası yangın riskini tahmin eden basit bir indistir. FFWI sonradan yakıt verisinin eklenmesi, indisin olası yangın riskini tahmin etmede başarısını arttırmıştır. Bu yakıt verisi, yaygın olarak kullanılan KBDI’nin bir fonksiyonu olarak hesaplanarak eklenmektedir. Fosberg Yangın Hava İndisinin orijinali ile yakıt verisi eklenerek hesaplanan versiyonu, Florida’da 20 yıllık bir dönemi değerlendirmek üzere karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda indisin yakıt verisinin eklendiği versiyonun daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [57, 66].

Nesterov İndisi (NI), 1949 yılında Nesterov tarafından geliştirilen gözlemsel kuraklık indisidir. Rusya’da yaygın olarak kullanılmaktadır. İndis tarihsel verilere dayanarak yangın ve hava arasındaki ilişkiyi yansıtan gözlemsel bir fonksiyon olarak türetilmiştir. NI snoptik gündüz sıcaklık, bağıl nem ve yağış verilerinden faydalanarak hesaplama yapmaktadır. NI az miktarda yağıştan sonra hızla sıfıra düşmesi nedeniyle tutuşma potansiyelini öngörmeye başarılı bir indistir [14, 67, 68].

Angström İndisi (AI) yangın riskini değerlendirmek amacıyla İsveç için geliştirilmiş basit bir kuraklık indisidir ve İskandinavya’nın her yerinde kullanılmıştır. İndis, tüm dünyada da yangın risk değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Hesaplamalar sadece bağıl nem ve hava sıcaklığı verilerinden yararlanılarak yapılmaktadır. İspanya’nın Murcia bölgesinde yarı kurak iklimler için en uygun yangın hava indisini belirlemek amacıyla dört farklı yangın hava indeksi, FFDI, AI, FWI ve FMI karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda Angström İndisi’nin kıyı bölgelerde daha yüksek sıcaklıklar, düşük yağış miktarı ve daha geniş çeşitlilikte

yangını riskini öngörmeye iyi sonuçlar verdiği ancak yarı kurak iklimler için en uygun indisin FWI olduğu belirtilmiştir. [63, 67, 69]. 1968 – 2010 yılları arasında İspanya’da yangın rejimindeki değişimlerin ele alındığı bir çalışmada AI sadece bağıl nem ve sıcaklık değerlerini kullandığı için vejetasyonun olmadığı dönemlerdeki (Aralık – Nisan) hesaplamalarda yangın riski değerlendirmesinde kullanılmıştır. Çalışmada bu dönemlerde olası yangınları öngörmeye AI ‘nin çok uygun olduğu ifade edilmiştir [70].

### III. ANTALYA, ÇANAKKALE VE MUĞLA ORMAN BÖLGE MÜDÜRLÜĞÜ’NE BAĞLI ORMAN ARAZİLERİNDE 2008 VE 2009 YILLARINDA ÇIKAN YANGINLARIN KANADA ORMAN YANGIN HAVA İNDİSİ (FWI) İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Antalya, Çanakkale ve Muğla illeri orman yangınları açısından Türkiye’nin hassas alanları arasında yer almaktadır [40, 41, 71]. Bu illerin 2008 ve 2009 yılı iklim verileri (sıcaklık (°C), bağıl nem (%), rüzgâr hızı (km/h), yağış (mm)) kullanılarak FWI ile yangın riski hesaplanmıştır. Hesaplamalar R Studio programında cffrds paketi kullanılarak yapılmıştır [72]. Paket içinde yer alan Kanada Orman Yangın Tehlike Değerlendirme Sistemi için İklim Rehberi’nde (Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System) Avrupa’da bulunan ülkelerin, Türkiye de dahil edilerek Kanada standart değerlerini kullanabileceği ifade edilmiştir [73]. Hesaplanan değerlerin risk sınıflandırması çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek ve ekstrem olmak üzere altı kategoriye göre hazırlanmıştır. Avrupa Orman Yangını Bilgi Sistemi (EFFIS)’nin kullandığı FWI risk sınıflandırması ve Van Wagner’in (1987) araştırmasında verilen risk eşik değerleri baz alınmıştır. Aylara göre frekansların dağılımını gösteren yangın risk dağılımı aşağıdaki gibidir.

#### 3.1. Muğla Orman Arazisi için 2008 ve 2009 Yıllarında Çıkan Yangınların FWI ile Değerlendirilmesi

2008 yılında en fazla orman yangını (348 orman yangını) Muğla orman arazisinde çıkmış ve bu yangınların büyük bir kısmı Temmuz ile Ağustos aylarında görülmüştür. 2008 yılı verilerine uygulanan KBDİ analiz sonuçlarına göre yaz ayları (Haziran, Temmuz, Ağustos) yangın risk sınıflandırmasında kesin yangın olur (600 – 800) sınıfında yer almaktadır [41]. Aynı yılın iklim verileri kullanılarak FWI ile yangın riski hesaplanmıştır. FWI değerlerinin aylara göre frekans dağılım tablolarına (Tablo11 ve Tablo12) bakıldığında indis değerlerinin yüksek olduğu aylar KBDİ değerlerinin yangın riskini yüksek olarak gösterdiği aylar ile örtüşmektedir. KBDİ değerlerine göre yılın ilk dört ayı yangın riskinin olmadığı (100 altında değerler) aylar olarak ifade

edilmiştir [41]. FWI değerlerinin aylara göre frekans dağılım tablolarına (Tablo11 ve Tablo12) bakıldığında yılın ilk üç ayı yangın riski düşük ve çok düşük olarak görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre yılın dördüncü ayında ise EFFIS risk sınıfına göre çok düşük ve düşük değerler görülmekte ve yine aynı ayda Van Wagner risk sınıfına göre ise çok düşük, düşük, orta ve yüksek risk sınıflarında dağılım görülmektedir. İki indisin değerleri de yılın ilk üç ayı için düşük yangın risk ihtimaline işaret etmektedir ancak Nisan ayına bakıldığında, FWI ve KBDİ değerleri farklılık göstermektedir ve FWI değerlerine göre yangın ihtimali düşük ve orta seviyede risk olabileceği ifade edilmektedir.

**Tablo 11.** Muğla 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (38 – 50)	Yüksek (21,3 – 38)	Orta (11,2 – 21,3)	Düşük (5,2 – 11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	29
Mart	0	0	0	0	0	31
Nisan	0	0	0	0	9	21
Mayıs	0	0	3	9	13	6
Haziran	0	3	21	6	0	0
Temmuz	0	4	27	0	0	0
Ağustos	0	0	28	2	1	0
Eylül	0	0	16	4	4	6
Ekim	0	0	0	4	17	10
Kasım	0	0	0	0	14	16
Aralık	0	0	0	0	0	31
<b>Toplam Frekans:</b>	0	7	95	25	58	181

FWI analiz sonuçlarına (Tablo11 ve Tablo12) göre yaz aylarında (Haziran, Temmuz, Ağustos) yangın çıkma olasılığı çok yüksektir. Yangın riskinin yüksek olduğu aylar EFFIS risk sınıflandırmasına göre yüksek (22,3 – 38) ve çok yüksek (38 – 50), Van Wagner risk sınıflandırmasına göre ise yüksek (9 – 16), çok yüksek (17 – 29) ve ekstrem (30+) aralığındadır. FWI değerlerinin frekanslarının verildiği Tablo 11 ve Tablo 12’ye göre yangın riskinin yüksek olduğu yaz ayları, 2008 yılı çıkan yangınların büyük bir kısmının görüldüğü aylar ile tutarlılık göstermektedir.

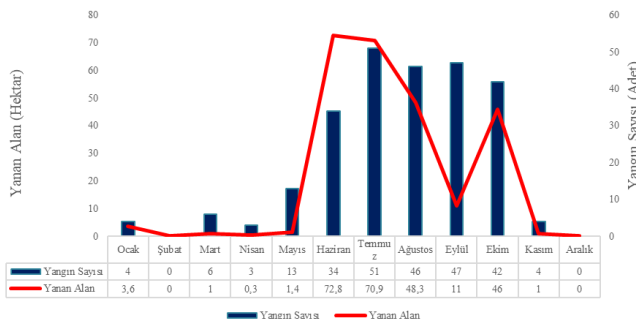


**Tablo 12.** Muğla 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (17-29)	Yüksek (9-16)	Orta (5-8)	Düşük (2-4)	Çok Düşük (0-1)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	4	25
Mart	0	0	0	0	9	22
Nisan	0	0	1	8	5	16
Mayıs	0	6	12	7	2	4
Haziran	10	18	2	0	0	0
Temmuz	18	13	0	0	0	0
Ağustos	8	21	1	1	0	0
Eylül	0	20	1	3	3	3
Ekim	0	0	11	10	5	5
Kasım	0	0	2	12	3	13
Aralık	0	0	0	0	5	26
<b>Toplam Frekans:</b>	36	78	30	41	36	145

2008 yılı iklim verileri kullanılarak hesaplanan FWI değerlerinin EFFIS risk sınıflandırması (Tablo 11) ve Van Wagner'in (1987) araştırmasında verilen risk eşik değerleri (Tablo 12) temel alınarak hazırlanan frekans tablolarına bakıldığında, olası yangın riskinin yüksek olduğu ayların (Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül) aynı olduğu görülmektedir. Tablo 12'de çok ekstrem risk sınıflarında yer alan değerler görülürken, bu değerler EFFIS risk sınıflandırmasına göre hazırlanan frekans tablosunda görülmemektedir. Van Wagner risk sınıflandırmasına göre Ekim ve Kasım aylarında da yüksek risk görülürken, EFFIS risk sınıflandırmasına göre Ekim ayında yangın riski orta, Kasım ayında ise düşüktür. FWI analiz sonuçlarına göre çok düşük değerlerin gözlemlendiği aylar aynıdır.

Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'nde 2009 yılında oluşan orman yangınlarının aylara göre dağılımına bakıldığında, en fazla yangın Haziran – Ekim ayları arasında çıkmıştır. Muğla'da 2009 yılında en fazla yangın Temmuz da çıkarken Haziran ayı, 72,8 hektarlık yanan alan ile 2009 yılında Muğla'da en fazla ormanlık alan kaybının yaşandığı ay olmuştur (Şekil 2).

**Şekil 2.** Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'nde 2009 yılında çıkan orman yangınlarının aylara göre dağılımı

Muğla 2009 yılı meteoroloji verilerine uygulanan FWI sonuçlarına göre iki farklı risk sınıflandırmasında (Tablo 13 ve Tablo 14) da Haziran – Eylül ayları arasında yangın riski yüksektir. Özellikle Temmuz ayı FWI verilerine göre en riskli aydır. 2009 yılı oluşan yangın verilerine göre de en fazla yangın 51 orman yangını ile Temmuz ayında çıkmıştır.

**Tablo 13.** Muğla 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (17-29)	Yüksek (9-16)	Orta (5-8)	Düşük (2-4)	Çok Düşük (0-1)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	28
Mart	0	0	0	0	3	28
Nisan	0	0	0	4	7	19
Mayıs	0	0	10	7	4	10
Haziran	5	19	6	0	0	0
Temmuz	20	11	0	0	0	0
Ağustos	7	20	2	2	0	0
Eylül	0	9	12	3	3	3
Ekim	0	0	12	7	4	8
Kasım	0	0	0	0	16	14
Aralık	0	0	0	1	1	29
<b>Toplam Frekans:</b>	32	59	42	24	38	170

Muğla 2009 yılı FWI yangın riski frekanslarının aylara göre dağılımı Van Wagner'in (1987) araştırmasında verilen risk eşik değerleri (Tablo 13) ve EFFIS'in kullandığı risk sınıflandırması (Tablo 14) temel alınarak hazırlanan tablolara bakıldığında olası yangın riski Haziran-Eylül ayları arasında yüksektir. İki risk sınıflandırmasında da Temmuz ayı yangın riskinin en yüksek olduğu aydır ve 2009 yılı çıkan orman yangın verisine göre de en fazla yangın bu ayda görülmüştür.

**Tablo 14.** Muğla 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (50+)	Çok Yüksek (38-50)	Yüksek (21,3-38)	Orta (11,2-21,3)	Düşük (5,2-11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	28
Mart	0	0	0	0	0	31
Nisan	0	0	0	0	4	26
Mayıs	0	0	0	6	10	15
Haziran	0	0	17	13	0	0
Temmuz	0	9	21	1	0	0
Ağustos	0	1	23	5	2	0
Eylül	0	0	7	10	7	6
Ekim	0	0	0	10	9	12
Kasım	0	0	0	0	0	30
Aralık	0	0	0	0	1	30
<b>Toplam Frekans:</b>	0	10	68	45	33	209

### 3.2. Çanakkale Orman Arazisi için 2008 ve 2009 Yıllarında Çıkan Yangınların FWI ile Değerlendirilmesi

Akdeniz iklim bölgesinde yer alan Çanakkale, Türkiye’de orman yangın riskinin yüksek olduğu bölgelerden biridir. Orman Genel Müdürlüğü’nün 2008 yılı yangın verilerine göre yaz döneminde kurak koşulların etkisiyle çıkan büyük orman yangınları görülmüştür. 2008 yılı en fazla ormanlık alan kaybının yaşandığı senelerden biri olarak ifade edilmiştir. Araştırmada orman yangın riskinin Haziran – Eylül ayları arasında yüksek olduğu ve Temmuz ayının en fazla orman yangını görülen ay olarak belirtilmiştir [71]. 2008 yılı Çanakkale iklim verileri kullanılarak FWI ile yapılan analiz sonuçları, 2008 yılı Çanakkale yangın verileri ile benzer sonuçlar göstermiştir. FWI değerlerine (Tablo 15 ve Tablo 16) göre yaz ayları yüksek risk aralığını göstermektedir.

**Tablo 15.** Çanakkale 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

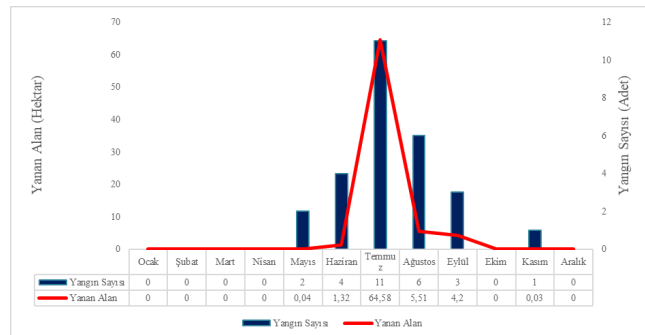
Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Eks-trem (50+)	Çok Yüksek (38 – 50)	Yüksek (21,3 – 38)	Orta (11,2 – 21,3)	Düşük (5,2 – 11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	1	28
Mart	0	0	0	0	7	24
Nisan	0	0	0	2	7	21
Mayıs	0	0	1	20	8	2
Haziran	1	3	10	13	2	1
Temmuz	1	5	24	1	0	0
Ağustos	3	5	18	3	1	1
Eylül	0	1	13	3	2	11
Ekim	0	0	0	2	15	14
Kasım	0	0	0	4	12	14
Aralık	0	0	0	0	0	31
<b>Toplam Frekans:</b>	5	14	66	48	55	178

EFFIS ve Van Wagner risk sınıflandırması tablolarına bakıldığında, 2008 yılı yangın riski ekstrem değerlerinin aylara göre dağılımının benzer olduğu görülmektedir. EFFIS risk sınıflandırmasına göre yaz ayları (Haziran, Temmuz, Ağustos) yangın riski yüksek görülürken, Van Wagner risk sınıflandırmasına göre Haziran – Eylül ayları arasında risk yüksektir. 2008 yılı FWI analiz sonuçlarına göre düşük ve çok düşük risk sınıfında yer alan değerler iki risk sınıflandırmasında da kış aylarında (Aralık, Ocak, Şubat) görülmektedir.

**Tablo 16.** Çanakkale 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Eks-trem (30+)	Çok Yüksek (17 – 29)	Yüksek (9 – 16)	Orta (5 – 8)	Düşük (2 – 4)	Çok Düşük (0 – 1)
Ocak	0	0	0	0	2	29
Şubat	0	0	0	1	2	26
Mart	0	0	0	7	13	11
Nisan	0	0	3	8	8	11
Mayıs	0	2	22	5	2	0
Haziran	10	10	8	1	1	0
Temmuz	15	15	1	0	0	0
Ağustos	19	9	1	1	0	1
Eylül	3	13	1	2	7	4
Ekim	0	0	5	13	6	7
Kasım	0	0	6	12	0	12
Aralık	0	0	0	0	3	28
<b>Toplam Frekans:</b>	47	49	47	50	44	129

Çanakkale Orman Bölge Müdürlüğü’nde 2009 yılında oluşan orman yangınlarının aylara göre dağılımına bakıldığında, Haziran – Eylül ayları arasında orman yangınları fazla görülmektedir. Çanakkale’de 2009 yılında en fazla yangın Temmuz ayında çıkmıştır. Temmuz ayı, 64,58 hektarlık yanan alan ile 2009 yılında Çanakkale’de en fazla ormanlık alan kaybının yaşandığı ay olmuştur (Şekil 3). 2009 yılı yangın verileri 2008 yılı ile benzer sonuçlar vermiştir. İki sene üst üste en fazla yangın ve ormanlık alan kaybı aynı ayda görülmektedir.



**Şekil 3.** Çanakkale Orman Bölge Müdürlüğü’nde 2009 yılında çıkan orman yangınlarının aylara göre dağılımı

Çanakkale 2009 yılı meteoroloji verilerine uygulanan Kanada Orman Yangın Hava İndisi (FWI) sonuçlarına göre iki FWI risk sınıflandırmasında (Tablo 17 ve Tablo 18) da Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları yangın riskinin yüksek olduğu aylardır. Özellikle Ağustos ayı risk sınıflandırmasında ekstrem, çok yüksek değerleri göstermektedir. 2009 yılı oluşan yangın verilerine göre en fazla yangın

Haziran – Eylül ayları arasında çıkmıştır ve FWI frekans tablolarında (Tablo 17 ve Tablo 18) da Haziran – Eylül ayları yangın riskinin yüksek olduğu aylardır.

**Tablo 17.** Çanakkale 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (17–29)	Yüksek (9–16)	Orta (5–8)	Düşük (2–4)	Çok Düşük (0–1)
Ocak	0	0	0	0	1	30
Şubat	0	0	0	1	0	27
Mart	0	0	0	0	2	29
Nisan	0	0	0	0	16	12
Mayıs	0	4	11	2	7	2
Haziran	0	11	9	7	4	2
Temmuz	9	14	8	4	0	0
Ağustos	24	7	0	0	0	0
Eylül	2	4	8	6	3	7
Ekim	0	1	8	9	5	8
Kasım	0	0	0	1	6	23
Aralık	0	0	0	3	2	26
<b>Toplam Frekans:</b>	35	41	44	33	46	166

Çanakkale FWI yangın riski frekanslarının aylara göre dağılımı Van Wagner'in (1987) araştırmasında verilen risk eşik değerleri (Tablo 17) ve EFFIS' nin kullandığı risk sınıflandırması (Tablo 18) temel alınarak hazırlanan tablolara bakıldığında olası yangın riski iki sınıflandırmada da yaz aylarında yüksektir.

**Tablo 18.** Çanakkale 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (50+)	Çok Yüksek (38–50)	Yüksek (21,3–38)	Orta (11,2–21,3)	Düşük (5,2–11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	28
Mart	0	0	0	0	0	31
Nisan	0	0	0	0	2	28
Mayıs	0	0	0	12	10	9
Haziran	0	0	7	13	4	6
Temmuz	0	7	12	12	0	0
Ağustos	7	6	18	0	0	0
Eylül	0	1	4	5	10	10
Ekim	0	0	1	5	12	13
Kasım	0	0	0	0	1	29
Aralık	0	0	0	0	3	28
<b>Toplam Frekans:</b>	7	14	42	47	42	213

İki risk sınıflandırmasında da Ağustos ve Temmuz ayları, yangın riskinin çok yüksek olduğu aylardır ve 2009 yılı

orman yangını verisine göre en fazla yangın Temmuz ayında görülmüştür. İki sınıflandırma aralığında da Ocak ayı yangın riski düşüktür. Orta ve düşük risk sınıflarının aylara göre dağılımı iki risk sınıflandırmasında farklılıklar göstermektedir.

### 3.3. Antalya Orman Arazisi için 2008 ve 2009 Yıllarında Çıkan Yangınların FWI ile Değerlendirilmesi

Türkeş ve Altan'nın (2012) araştırmasına göre, 2008 yılı Antalya Orman Genel Müdürlüğü kayıtlarında 212 orman yangını kaydedilmiştir. En fazla yanan alan (17,026 hektar) Antalya'da gözlemlenirken, çıkan yangın sayısı göre Antalya ilinin Muğla ilinden sonra ikinci sırada olduğu ifade edilmiştir. Akdeniz ikliminin etkili olduğu Antalya ilinde yazların sıcak ve kurak geçmesi orman yangınlarının yaz aylarında etkili olmasına neden olmaktadır. 2008 yılı verilerine uygulanan FWI analiz sonuçlarına göre, yaz aylarının (Haziran, Temmuz, Ağustos) yüksek risk sınıfında olduğu gözlenmiştir (Tablo 19 ve Tablo 20).

**Tablo 19.** Antalya 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (50+)	Çok Yüksek (38–50)	Yüksek (21,3–38)	Orta (11,2–21,3)	Düşük (5,2–11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	29
Mart	0	0	0	0	1	30
Nisan	0	0	0	0	4	26
Mayıs	0	0	0	10	15	6
Haziran	0	0	14	16	0	0
Temmuz	0	0	26	5	0	0
Ağustos	0	0	11	20	0	0
Eylül	0	0	1	17	3	9
Ekim	0	0	0	5	16	10
Kasım	0	0	0	2	9	19
Aralık	0	0	0	0	3	28
<b>Toplam Frekans:</b>	0	0	52	75	51	188

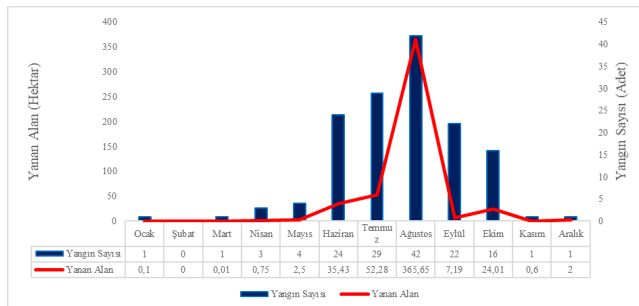
FWI yangın riski frekanslarının aylara göre dağılımı EFFIS'in kullandığı risk sınıflandırması (Tablo 19) ve Van Wagner (1987) tarafından Kanada Orman Servisi'ne (Canadian Forestry Service) hazırlanan teknik raporda verilen risk eşik değerleri (Tablo 20) temel alınarak hazırlanan tablolara bakıldığında olası yangın riskinin yüksek olduğu aylar iki sınıflandırmada da Haziran – Eylül ayları arasındadır. Tablo 20 'de çok yüksek ve ekstrem değerlerin frekansları görülürken, bu değerler EFFIS risk sınıflandırmasına göre hazırlanan frekans tablosunda görülmemektedir. İki sınıflandırma

aralığında da çok düşük değerlerin gözlemlendiği aylar aydır. Orta risk sınıflandırmasının görüldüğü aylara bakıldığında iki sınıflandırma arasında farklılıklar gözlenmektedir. EFFIS risk sınıfı kullanılarak hazırlanan frekans tablosuna bakıldığında Mayıs – Kasım ayları arasında orta derece risk gözlenirken, Van Wagner risk sınıfı kullanılarak hazırlanan frekans tablosunda orta derece yangın riski Mart, Nisan, Mayıs, Eylül, Ekim, Kasım ve Aralık aylarında görülmektedir.

**Tablo 20.** Antalya 2008 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (17-29)	Yüksek (9-16)	Orta (5-8)	Düşük (2-4)	Çok Düşük (0-1)
Ocak	0	0	0	0	10	21
Şubat	0	0	0	0	8	21
Mart	0	0	0	3	14	14
Nisan	0	0	0	4	8	18
Mayıs	0	5	8	12	6	0
Haziran	5	15	10	0	0	0
Temmuz	3	28	0	0	0	0
Ağustos	6	24	1	0	0	0
Eylül	0	18	0	3	4	5
Ekim	0	0	8	14	4	5
Kasım	0	0	7	5	3	15
Aralık	0	0	0	5	10	16
<b>Toplam Frekans:</b>	14	90	34	46	67	115

Antalya Orman Bölge Müdürlüğü'nde 2009 yılında oluşan orman yangınlarının aylara göre dağılımına bakıldığında, Haziran – Ekim ayları arasında orman yangınlarının sayısında artış olduğu görülmektedir. Antalya'da 2009 yılında en fazla yangın Ağustos ayında çıkmıştır. Ağustos ayı, 365,65 hektar yanan alan ile 2009 yılında Antalya'da en fazla ormanlık alan kaybının yaşandığı ay olmuştur (Şekil 4).



**Şekil 4.** Antalya Orman Bölge Müdürlüğü'nde 2009 yılında çıkan orman yangınlarının aylara göre dağılımı

Antalya 2009 yılı meteoroloji verilerine uygulanan FWI sonuçlarına göre Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları yangın riskinin yüksek olduğu aylardır. Özellikle Ağustos ayı risk sınıflandırmasında ekstrem ve çok yüksek değerleri görülmektedir (Tablo 21 ve Tablo 22). 2009 yılı oluşan yangın

verilerine göre en fazla yangın yaz aylarında çıkmıştır ve FWI frekans tablolarında (Tablo 21 ve Tablo 22) da yaz ayları riskin yüksek olduğu aylardır.

**Tablo 21.** Antalya 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının Van Wagner risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	Van Wagner FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (30+)	Çok Yüksek (17-29)	Yüksek (9-16)	Orta (5-8)	Düşük (2-4)	Çok Düşük (0-1)
Ocak	0	0	0	0	1	30
Şubat	0	0	0	0	0	28
Mart	0	0	0	0	3	28
Nisan	0	0	0	5	9	16
Mayıs	0	0	6	10	3	12
Haziran	3	18	9	0	0	0
Temmuz	10	19	2	0	0	0
Ağustos	14	17	0	0	0	0
Eylül	0	8	8	3	3	8
Ekim	0	0	13	8	1	9
Kasım	0	0	0	0	10	20
Aralık	0	0	0	1	1	29
<b>Toplam Frekans:</b>	27	62	38	27	31	180

2009 yılı, FWI yangın riski frekanslarının aylara göre dağılımı Van Wagner'in (1987) araştırmasında verilen risk eşik değerleri (Tablo 21) EFFIS'nin kullandığı risk sınıflandırması (Tablo 22) temel alınarak hazırlanan tablolara bakıldığında olası yangın riskinin yüksek olduğu aylar (Haziran, Temmuz ve Ağustos) örtüşmektedir. İki risk sınıflandırmasında da Ağustos ayı için çok yüksek ve ekstrem değerler görülmektedir ve 2009 yılı çıkan orman yangın verisine göre de en fazla yangın bu ayda çıkmıştır. İki sınıflandırma aralığında da kış aylarında (Aralık, Ocak ve Şubat) yangın riski düşüktür.

**Tablo 22.** Antalya 2009 yılı FWI hesaplama sonuçlarının EFFIS risk sınıflandırmasına göre frekansları

Aylar	EFFIS FWI Risk Sınıfı					
	Ekstrem (50+)	Çok Yüksek (38-50)	Yüksek (21,3-38)	Orta (11,2-21,3)	Düşük (5,2-11,2)	Çok Düşük (<5,2)
Ocak	0	0	0	0	0	31
Şubat	0	0	0	0	0	28
Mart	0	0	0	0	0	31
Nisan	0	0	0	0	3	27
Mayıs	0	0	0	5	11	15
Haziran	0	0	7	21	2	0
Temmuz	0	1	17	13	0	0
Ağustos	7	3	19	2	0	0
Eylül	0	0	0	10	9	11
Ekim	0	0	0	0	21	10
Kasım	0	0	0	0	0	30
Aralık	0	0	0	0	1	30
<b>Toplam Frekans:</b>	7	4	43	51	47	213

Antalya, Çanakkale ve Muğla illeri için hesaplanan FWI değerlerinin EFFIS ve Van Wagner risk sınıflandırmasına (1987) göre toplam frekanslarına bakıldığında çalışmada seçilen iller kapsamında Muğla ilinin yüksek risk sınıflandırmasındaki değerinin diğer illere kıyasla iki risk sınıflandırmasında da yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22). Muğla ilini Çanakkale ili takip etmektedir. FWI hesaplama sonuçlarının frekans tabloları 2008 ve 2009 yılı orman yangınları kayıtları ile tutarlılık göstermektedir.

#### IV. SONUÇ

İklim değişikliğinin Akdeniz Havzası orman yangınlarına etkisi son yıllarda giderek artmaktadır. Bu sorunun temelinde iklim değişikliği ile birlikte Akdeniz ikliminin hakim olduğu bölgelerde yazların daha sıcak ve kurak geçmeye başlaması yatmaktadır [1, 9, 17, 18]. Bu durum orman yangınlarının sayısının artmasına neden olmaktadır. Akdeniz Havzası'nda orman yangınlarının artışı ile ilgili yapılan tüm çalışmalar, bu artışa iklim değişikliği ile artan sıcak ve kurak havanın neden olduğunu doğrulamaktadır ve gelecekte olası yangın sayısının artabileceği ifade edilmektedir. Büyük orman yangınları sadece ağaçların yanması değil aynı zamanda ormanlarda yaşayan canlıların da zarar görmesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle, yangın hava indisleri kullanılarak olası orman yangınlarının çıkabileceği bölgelerin öngörülmesi ve bu bölgelerde gerekli önlemlerin alınması önem arz etmektedir. Her ülke yangın risk değerlendirmelerini yaparken farklı indisler kullanmaktadır, fakat bazı indisler dünyada yaygın olarak kullanılmakta ve yangın risk değerlendirmeleri başarılı bulunmaktadır. HI, FWI ve KBDI, F İndisi ve FFDI yaygın olarak kullanılan indislerden bazılarıdır. Bu indisler iklim değişikliği ile birlikte sıcak ve kurak havanın gelecekte Akdeniz Havzası'nda çıkabilecek orman yangınlarının sayısını nasıl etkileyebileceği ve olası yangınların hangi bölgelerde çıkabileceği ele alınan çalışmalarda kullanılabilir. Yapılan araştırmalar bu yangın indislerinin olası yangın çıkışlarını tahmin etmede başarılı olduğunu göstermiştir. HI, havadaki nem oranı ve çiğlenme sıcaklığını dikkate alarak hesaplama yapmaktır. Bu indis kullanılarak yapılan çalışmalarda, HI'nin büyük orman yangınlarını öngörmeye başarılı olduğu ifade edilmiştir. FWI yaygın olarak kullanılan ve yapılan araştırmalara göre yarı kurak iklimlerde olası yangın risk değerlendirmelerinde başarılı olduğu ifade edilen diğer bir indistir. FWI toprak katmanlarındaki nem ve yakıt nemi değişikliğine bağlı olarak olası yangın riskini öngörmektedir. Diğer bir yaygın olarak kullanılan orman yangın indisi KBDI'dir. KBDI ile olası orman yangınları, yangının çıkışı, yayılması ve büyümesine uygun hava

ve iklim koşullarını öngörülebilir, böylece gerekli önlemler alınabilir. Yapılan çalışmalar olası yangın risk değerlendirmeleri için bu indisin kullanılmasının başarılı sonuçlar vereceğini ifade etmiştir. F İndisi diğer yangın hava indislerine göre daha basit bir indistir. Sadece rüzgar hızı, bağıl nem ve kuru hazne hava sıcaklığı değerleri kullanılarak basit bir şekilde gelecek orman yangını riski hesaplanabilir. Türkiye için F indisi kullanılarak yapılan bir çalışmada, indisin yangın risk değerlendirmesinde başarılı olduğu ifade edilmiştir, ama Akdeniz Bölgesi'nde çıkabilecek orman yangınlarının farklı indisler kullanılarak değerlendirildiği farklı bir çalışmada F İndisi çok başarılı bulunmamıştır. FFDI Avusturya için ciddi çalışmalar sonucunda geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılan bir indistir. İndis okalipütis ormanları temel alınarak geliştirilmesine rağmen Akdeniz Bölgesi'nde de yangın risk değerlendirmelerinde kullanılmakta ve olası yangınları öngörmeye iyi sonuçlar verdiği ifade edilmektedir. Orman yangın risk tahmini, HI, FWI, KBDI, F İndisi ve FFDI kullanılarak yapılabileceği gibi farklı ülkeler tarafından yaygın olarak kullanılan IFI, FFWI, NI ve AI gibi indisler kullanılarak da yapılabilir. Bu çalışmada Antalya, Çanakkale ve Muğla Orman Bölge Müdürlüğü'ne bağlı orman arazilerinde 2008 ve 2009 yıllarında çıkan yangınlar FWI kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuçlar 2008 ve 2009 yılı yangın verileri ile tutarlılık göstermiştir. FWI analiz sonuçlarına göre Antalya, Çanakkale ve Muğla illeri için yaz ayları yangın riskinin yüksek olduğu, kış ayları ise yangın riskinin çok düşük olduğu aylardır. 2008 yılı iklim verileri kullanılarak FWI ile yapılan analiz sonuçları, Türkerş ve Altan tarafından yapılan 2008 yılında Muğla ve Çanakkale'de çıkan orman yangınlarının KBDI ile değerlendirildiği araştırmaların sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda yangın riskinin yüksek olduğu dönemleri göstermede KBDI ve FWI değerlerinin benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. 2009 yılı iklim verileri kullanılarak FWI ile yapılan analiz sonuçları ise 2009 yılı çıkan yangın verileri ile karşılaştırılmış ve yangınların yoğun olarak çıktığı yaz aylarında FWI analiz sonuçları yangın riskini yüksek göstermiştir. FWI değerleri yangın riskini öngörmeye 2008 ve 2009 yangın verilerine göre başarılı bulunmuştur. İklim değişikliği ile birlikte sıcaklık artışlarının kuraklığı, ekstrem hava olaylarını beraberinde getirmesi sonucunda orman yangınları riski daha da artabilir. Yangın risk bölgelerinin, bulunulan ekosisteme en uygun yangın hava indisleri kullanılarak başarılı bir şekilde değerlendirilmesi gelecekte karşılaşılabilecek olası büyük orman yangınlarının önüne geçilmesine yardımcı olabilir ya da gerekli önlemler alınarak hasar en aza indirilebilir.

## TEŞEKKÜR

Çalışmada kullanılan meteorolojik verileri sağlayan T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü ile bu verilerin düzenlenmesine katkıda bulunan Boğaziçi Üniversitesi İklim Değişikliği ve Politikaları Uygulama ve Araştırma Merkezinden Aytaç PAÇAL'a, orman yangın verilerinin kullanımına izin veren T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğüne teşekkür ederiz. Bu çalışmanın yazarlarından Nazan AN, Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 14824 kodu ile; Mustafa Tufan TURP, Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 15042 kodu ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tatlı, H., & Türkeş, M. (2014). Climatological evaluation of Haines forest fire weather index over the Mediterranean Basin. *Meteorological Applications*, 21(3), 545-552.
- [2] Werth, J., & Werth, P. (1998). Haines Index climatology for the western United States. *Fire management notes (USA)*.
- [3] Jenkins, M. A. (2002). An examination of the sensitivity of numerically simulated wildfires to low-level atmospheric stability and moisture, and the consequences for the Haines Index. *International Journal of Wildland Fire*, 11(4), 213-232.
- [4] McCaw, L., Marchetti, P., Elliott, G., & Reader, G. (2007). Bushfire weather climatology of the Haines Index in southwestern Australia. *Australian Meteorological Magazine*, 56(2).
- [5] Winkler, J. A., Potter, B. E., Wilhelm, D. F., Shadbolt, R. P., Piromsopa, K., & Bian, X. (2007). Climatological and statistical characteristics of the Haines Index for North America. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 139-152.
- [6] Trouet, V., Taylor, A. H., Carleton, A. M., & Skinner, C. N. (2009). Interannual variations in fire weather, fire extent, and synoptic-scale circulation patterns in northern California and Oregon. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4), 349-360.
- [7] Peace, M., McCaw, L., & Mills, G. (2012). Meteorological dynamics in a fire environment; a case study of the Layman prescribed burn in Western Australia. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 62(3), 127.
- [8] Barberà, M. J., Niclòs, R., Estrela, M. J., & Valiente, J. A. (2015). Climatology of the stability and humidity terms in the Haines Index to improve the estimate of forest fire risk in the Western Mediterranean Basin (Valencia region, Spain). *International Journal of Climatology*, 35(7), 1212-1223.
- [9] Cardil, A., Molina, D. M., Ramirez, J., & Vega-García, C. (2013). Trends in adverse weather patterns and large wildland fires in Aragón (NE Spain) from 1978 to 2010. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5), 1393-1399.
- [10] Johnson EA, Miyanishi K. (2001). Forest Fires: Behavior and Ecological Effects. *Academic Press: San Diego, CA*.
- [11] Ruffault, J., Moron, V., Trigo, R. M., & Curt, T. (2017). Daily synoptic conditions associated with large fire occurrence in Mediterranean France: evidence for a wind-driven fire regime. *International Journal of Climatology*, 37(1), 524-533.
- [12] Türkeş, M., Tath, H., Altan, G., Öztürk, M. Z. (2011a). Analysis of forest fires for the year of 2010 in Çanakkale and Muğla with the Keetch-Byram drought index. In: *Proceedings of the National Geographical Congress with International Participation (CD-R)*, ISBN 978.975.6686-04-1, 7-10 September 2011, Türk Coğrafya Kurumu – İstanbul University.
- [13] Altan, G., Türkeş, M., Tatlı, H. (2011). Çanakkale ve Muğla 2009 yılı orman yangınlarının Keetch-Byram Kuraklık İndisi ile klimatolojik ve meteorolojik analizi. In: *5th Atmospheric Science Symposium Proceedings Book*: 263-274. *Istanbul Technical University*, 27-29 April 2011, Istanbul. Turkey.
- [14] Altan, G. (2011). Muğla ve Çanakkale İllerinde 2000-2008 döneminde gerçekleşen büyük orman yangınlarının klimatolojik ve meteorolojik analizi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi*.
- [15] Yamak, Ç. (2006). *Investigation over a national meteorological fire danger approach for Turkey with geographic information systems*. A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Geodetic and Geographic Information Technologies. 142 p.
- [16] Pausas, J. G., & Vallejo, V. R. (1999). The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In *Remote sensing of large wildfires* (pp. 3-16). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [17] Pausas, J. G. (2004). Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic change*, 63(3), 337-350.
- [18] Urbietta IR, Zavala G, Bedia J, Gutierrez JM, San Miguel-Ayanz J, Camia A, Keeley JE, Moreno JM. (2015). Fire activity as a function of fire-weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and Pacific western USA. *Environmental Research Letters*, 10(11), 114013.
- [19] Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International journal of wildland fire*, 18(5), 483-507.
- [20] Lagerquist, R., Flannigan, M. D., Wang, X., & Marshall, G. A. (2017). Automated prediction of extreme fire weather from synoptic patterns in northern Alberta, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(9), 1175-1183.
- [21] Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W., & Flannigan, M. D. (2004). Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. *Geophysical Research Letters*, 31(18).
- [22] Wang, X., Thompson, D. K., Marshall, G. A., Tymstra, C., Carr, R., & Flannigan, M. D. (2015). Increasing frequency of

- extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, 130(4), 573-586.
- [23] Mhawej, M., Faour, G., Abdallah, C., & Adjizian-Gerard, J. (2016). Towards an establishment of a wildfire risk system in a Mediterranean country. *Ecological informatics*, 32, 167-184.
- [24] Flannigan, M. D., Amiro, B. D., Logan, K. A., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2006). Forest fires and climate change in the 21 st century. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 11(4), 847-859.
- [25] Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 4(2), 439-473.
- [26] Türkes, M. (2016). *Genel Klimatoloji: Atmosfer, Hava ve İklimin Temelleri*. İstanbul, Türkiye: Kriter Yayınevi.
- [27] Türkes, M. (2010). *Klimatoloji ve meteoroloji*. Kriter Yayınevi.
- [28] Zittis, G., & Hadjinicolaou, P. (2017). The effect of radiation parameterization schemes on surface temperature in regional climate simulations over the MENA-CORDEX domain. *International Journal of Climatology*, 37(10), 3847-3862.
- [29] Schroter, D.; Cramer, W.; Leemans, R.; Prentice, I. C.; Araujo, M. B.; Arnell, N. W.; Bondeau, A.; Bugmann, H.; Carter, T. R.; Gracia, C. A.; de la Vega-Leinert, A. C.; Erhard, M.; Ewert, F.; Glendinning, M.; House, J. I.; Kankaanpaa, S.; Klein, R. J. T.; Lavorel, S.; Lindner, M.; Metzger, M. J.; Meyer, J.; Mitchell, T. D.; Reginster, I.; Rounsevell, M.; Sabate, S.; Sitch, S.; Smith, B.; Smith, J.; Smith, P.; Sykes, M. T.; Thonicke, K.; Thuiller, W.; Tuck, G.; Zaehle, S.; Zierl, B. (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 310(5752): 1333-1337.
- [30] Westerling, A. L., Hidalgo H. G., Cayan D. R., and Swetnam T. W. (2006). Warming and earlier spring increase western U. S. forest wildfire activity. *Science* 313(5789):940-943.
- [31] Bedia J., Golding N., Casanueva A., Iturbide M., Buontempo C., & Gutiérrez J. M. (2017). Seasonal predictions of Fire Weather Index: Paving the way for their operational applicability in Mediterranean Europe. *Climate Services*.
- [32] Abatzoglou, John T., & Kolden, Crystal A. (2013). Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildland Fire* 22(7):1003-1020.
- [33] Blackwell, B., M.C. Feller, and R. Trowbridge. (1992). Conversion of dense lodge pole pine stands in west-central British Columbia into young lodge pole pine plantations using prescribed fire. 1. Biomass consumption during burning treatments. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 572 – 581.
- [34] Valette, J. C., Gomendy, V., Maréchal, J., Houssard, C., & Gillon, D. (1994). Heat-transfer in the soil during very low-intensity experimental fires-the role of duff and soil-moisture content. *International Journal of Wildland Fire*, 4(4), 225-237.
- [35] Dimitrakopoulos AP, Mitsopoulos ID, & Gatoulas K. (2010). Assessing ignition probability and moisture of extinction in a Mediterranean grass fuel type. *International Journal of Wildland Fire* 19: 29-34.
- [36] Pausas, J. G., & Fernández-Muñoz, S. (2012). Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic change*, 110(1-2), 215-226.
- [37] Turco M, Llasat M-C, von Hardenberg J, & Provenzale A (2014). Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment. *Climatic Change* 125:369-380.
- [38] Cardil, A., Eastaugh, C. S., & Molina, D. M. (2015). Extreme temperature conditions and wildland fires in Spain. *Theoretical and applied climatology*, 122(1-2), 219-22.
- [39] Marcos, R., Turco, M., Bedía, J., Llasat, M. C., & Provenzale, A. (2015). Seasonal predictability of summer fires in a Mediterranean environment. *International journal of wildland fire*, 24(8), 1076-1084.
- [40] Kum G., & Sönmez M.E. (2016). Determination of Meteorological Forest Fire Risks in Mediterranean Climate of Turkey. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(2), 181-192.
- [41] Türkes, M., & Altan, G. (2012). Analysis of the year 2008 fires in the forest lands of the Muğla Regional Forest Service by using drought indices. *Journal of Human Sciences*, 9(1), 912-931.
- [42] Sarris, D., Christopoulou, A., Angelonidi, E., Koutsias, N., Fulé, P. Z., & Arianoutsou, M. (2014). Increasing extremes of heat and drought associated with recent severe wildfires in southern Greece. *Regional environmental change*, 14(3), 1257-1268.
- [43] Bedía J, Herrera S, Gutiérrez J M, Benali A, Brands S, Mota B and Moreno J M. (2015). Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: implications for climate change *Agric. Forest Meteorol.* 214-215 369-7.
- [44] Knorr W., Dentener F., Hantson S., Jiang L., Klimont Z., & Arneth A. (2016). Air quality impacts of European wildfire emissions in a changing climate.
- [45] Syphard, A. D., Radeloff, V. C., Keeley, J. E., Hawbaker, T. J., Clayton, M. K., Stewart, S. I., & Hammer, R. B. (2007). Human influence on California fire regimes. *Ecological applications*, 17(5), 1388-1402.
- [46] Ager, A. A., Preisler, H. K., Arca, B., Spano, D., & Salis, M. (2014). Wildfire risk estimation in the Mediterranean area. *Environmetrics*, 25(6), 384-396.
- [47] Haines, D. A. (1989). A lower atmosphere severity index for wildlife fires. *National Weather Digest*, 13, 23-27.
- [48] Werth, P., & Ochoa, R. (1993). The evaluation of Idaho wildfire growth using the Haines Index. *Weather and Forecasting*, 8(2), 223-234.
- [49] Beverly, J. L., & Wotton, B. M. (2007). Modelling the probability of sustained flaming: predictive value of fire weather index components compared with observations of site

- weather and fuel moisture conditions. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 161-173.
- [50] Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M., & Mitsopoulos, I. D. (2011). Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18(1), 83-93.
- [51] Chelli S., Maponi P., Campetella G., Monteverde P., Foglia M., Paris E., Lolis A., & Panagopoulos T. (2015). Adaptation of the Canadian fire weather index to Mediterranean forests. *Natural Hazards*, 75(2), 1795-1810.
- [52] Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2008). Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire*, 17(3), 328-338.
- [53] Van Wagner, C. E., & Forest, P. (1987). Development and structure of the Canadian forest fireweather index system. In *Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.*
- [54] Canadian Fire Weather Index System (FWI system), <https://www.frames.gov/files/6014/1576/1411/FWI-history.pdf>.
- [55] Good, P., Moriondo, M., Giannakopoulos, C., & Bindi, M. (2008). The meteorological conditions associated with extreme fire risk in Italy and Greece: relevance to climate model studies. *International Journal of Wildland Fire*, 17(2), 155-165.
- [56] Keetch, J. J., & Byram, G. M. (1968). A drought index for forest fire control. *Res. Pap. SE-38. Asheville, NC: US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 35 p., 38.*
- [57] Sharples, J. J., McRae, R. H. D., Weber, R. O., & Gill, A. M. (2009a). A simple index for assessing fire danger rating. *Environmental Modelling & Software*, 24(6), 764-774.
- [58] Sharples, J. J., McRae, R. H. D., Weber, R. O., & Gill, A. M. (2009b). A simple index for assessing fuel moisture content. *Environmental Modelling & Software*, 24(5), 637-646.
- [59] Satir, O., Berberoglu, S., & Donmez, C. (2016). Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5), 1645-1658.
- [60] Satir, O., Berberoglu, S., & Cilek, A. (2016). Modelling long-term forest fire risk using fire weather index under climate change in Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4), 537-551.
- [61] Sirca, C., Salis, M., Arca, B., Duce, P., & Spano, D. (2018). Assessing the performance of fire danger indexes in a Mediterranean area. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(5), 563.
- [62] Noble, I. R., Gill, A. M., & Bary, G. A. V. (1980). McArthur's fire-danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, 5(2), 201-203.
- [63] Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Díaz-Palmero, J. M., & de Dios Cabezas-Cerezo, J. (2017). A comparative study of fire weather indices in a semiarid south-eastern Europe region. Case of study: Murcia (Spain). *Science of the Total Environment*, 590, 761-774.
- [64] San-Miguel-Ayanz, J., Carlson, J. D., Alexander, M., Tolhurst, K., Morgan, G., Sneeuwjagt, R., & Dudley, M. (2003). Current methods to assess fire danger potential. In *Wildland fire danger estimation and mapping: The role of remote sensing data* (pp. 21-61).
- [65] Sirca, C., Spano, D., Duce, P., Delogu, G., Cicalò, G. O., & Viegas, D. X. (2007). Performance of a newly developed integrated fire rating index in Sardinia, Italy. In *Proceedings of the 4th International WildLand FireConference. Seville, Spain*(pp. 13-17).
- [66] Goodrick, S. L. (2002). Modification of the Fosberg fire weather index to include drought. *International Journal of Wildland Fire*, 11(4), 205-211.
- [67] Ganatsas, P., Antonis, M., & Marianthi, T. (2011). Development of an adapted empirical drought index to the Mediterranean conditions for use in forestry. *Agricultural and forest meteorology*, 151(2), 241-250.
- [68] Venevsky, S., Thonicke, K., Sitch, S., & Cramer, W. (2002). Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. *Global Change Biology*, 8(10), 984-998. doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00528.x.
- [69] Angström, A. (1949). Swedish Meteorological Research 1939-1948. *Tellus*, 1(1), 60-64. doi:10.1111/j.2153-3490.1949.tb01930.x.
- [70] Moreno, M. V., Conedera, M., Chuvieco, E., & Pezzatti, G. B. (2014). Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environmental Science & Policy*, 37, 11-22.
- [71] Türkeş, M., & Altan, G. (2012). Çanakkale'nin 2008 yılı büyük orman yangınlarının meteorolojik ve hidroklimatolojik analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 10(2), 195-218.
- [72] Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M. A., Anderson, K., Moore, B., & Flannigan, M. D. (2017). cffdrs: an R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecological Processes*, 6(1), 5.
- [73] Lawson, B. D., & Armitage, O. B. (2008). Weather guide for the Canadian forest fire danger rating system.



# Effects of Mandelic and Propane-1,2,3-Tricarboxylic Acids on Calcium Oxalate Monohydrate Crystallization

## Mandelik Asit ve Propan-1,2,3-Trikarboksilik Asitin Kalsiyum Oksalat Monohidrat Kristalizasyonuna Etkisi

Sevgi POLAT<sup>1</sup> , Perviz SAYAN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Marmara University, 34722, İstanbul, Turkey

### Abstract

The effects of mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids as additives on calcium oxalate monohydrate (COM) crystals were investigated in this study. The physicochemical properties of the COM crystals prepared with and without these additives were characterized using X-ray powder diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and zeta potential analysis. The XRD and SEM results showed that the crystals prepared in pure medium were monohydrates and consisted primarily of hexagonal crystals, respectively. The additives mandelic acid and propane-1,2,3-tricarboxylic acid in the crystallization media significantly changed the size and morphology of the COM crystals, the effects of which were more pronounced with higher concentrations of the additives. The results of FTIR suggested that both carboxylic acids were adsorbed onto the surface of the COM crystals. The zeta potential analysis showed a negative charge on the surface of the COM crystals in the mandelic acid medium, while the surface became more positive in the medium containing increasing concentrations of propane-1,2,3-tricarboxylic acid. In addition, an analysis was conducted to evaluate the thermal characteristics of the COM crystals prepared with and without the additives. The data obtained were used to calculate the kinetic parameters, such as the activation energy and pre-exponential factor, using the Coats-Redfern method. The calculated activation energies for stages I, II, and III in pure medium were 98.76, 270.69, 258.55 kJ/mol, respectively, which were lower than that of COM crystals prepared in the two media containing the additives.

**Keywords:** Calcium oxalate monohydrate, crystallization, morphology, thermal kinetics, carboxylic acids.

### Öz

Bu çalışmada, katkı maddesi olarak kullanılan mandelik ve propan-1,2,3-trikarboksilik asidin, kalsiyum oksalat monohidrat (COM) kristalleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Saf ve katkı ortamında üretilen COM kristallerinin özellikleri, X-Işını Kırınımı (XRD) metodu, tarımalı elektron mikroskobu (SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve zeta potansiyeli analizi kullanılarak karakterize edilmiştir. XRD ve SEM sonuçları saf ortamda üretilen kristallerin monohidrat formunda ve genel olarak hegzagonal yapıda olduğunu göstermiştir. Kristalizasyon ortamında mandelik ve propan-1,2,3-trikarboksilik asitin varlığı, COM kristallerinin hem morfolojisinin hem de tane boyutunun önemli ölçüde değişmesine neden olmuştur. Bu etki, yüksek katkı konsantrasyonlarında daha belirgin hale gelmiştir. FTIR sonuçları, çalışmada kullanılan her iki karboksilik asitin de COM kristallerinin yüzeyine adsorplandığını göstermiştir. Zeta potansiyeli analiz sonuçları, mandelik asit ortamında kristallerin yüzey yükünün negatif olduğunu, bu değer propan-1,2,3-trikarboksilik asit varlığında ise katkı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte daha pozitif hale geldiğini göstermiştir. Ayrıca, saf ve katkı maddeleri varlığında üretilen COM kristallerinin termal özelliklerini değerlendirmek için analiz yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü Coats-Redern modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Saf ortamda üretilen kristallerin I, II ve III. bozunma bölgeleri için hesaplanan aktivasyon enerjileri katkı maddesi ortamında üretilen kristallerin aktivasyon enerjilerinden düşük olup sırasıyla 98,76, 270,69, 258,55 kJ/mol olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler.** Kalsiyum oksalat monohidrat, kristalizasyon, morfoloji, kinetik, karboksilik asit.

**Sorumlu yazar/Corresponding Author:** Sevgi POLAT, **Tel:** 0216 3480292/1719, **e-posta:** sevgi.polat@marmara.edu.tr

**Gönderilme/Submitted:** 15.06.2019, **Düzenleme/Revised:** 26.10.2019, **Kabul/Accepted:** 11.12.2019

## I. INTRODUCTION

Calcium oxalate, the most common calcium salt of oxalic acid, is found naturally in fossils, plants, and human kidney and bladder stones and can exist in three forms—monohydrate (COM,  $\text{CaC}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), dihydrate (COD,  $\text{CaC}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), and trihydrate (COT,  $\text{CaC}_2\text{H}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )—of which COM is the most stable under normal atmospheric conditions. The other forms are created under more specific solution conditions (e.g., supersaturation) and temperatures [1,2].

Calcium oxalate is a byproduct in some industrial processes such as paper and food production. In water-related industries, particularly in those using hard water, this mineral can form harmful scale deposits on heat exchangers, boilers, and reverse-osmosis membranes and resulting in heat-transfer inefficiency during evaporation processes, increases in energy use, and losses in production time [3,4]. Previous studies have shown that different types of carboxylic acids such as acetic acid, tartaric acid, citric acid and succinic acid [5-9] can prevent scale formation when added to the crystallization medium, and several studies [10,11] have been conducted that identified the mechanisms of this effect; however, studies on using specific carboxylic acids, such as mandelic acid ( $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$ ) and propane-1,2,3-tricarboxylic acid ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ), have been limited.

The aim of the current study was to investigate the crystalline structures and morphologies of the COM crystals synthesized in media containing these two carboxylic acids, which were chosen for their ease of handling and nontoxic properties, and compare these with crystals synthesized in pure medium. We also investigated the thermal decomposition behavior of the crystals using the Coats-Redfern model. We believe that the results of our study can be used as a guide for controlling the morphology and thermal properties COM crystals.

## II. MATERIALS AND METHODS

Analytical grade calcium chloride dihydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sodium oxalate ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), mandelic acid ( $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$ ), and 1,2,3-propanetricarboxylic acid ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ), were purchased from Merck & Co., Inc.. Distilled water was used throughout the experiments.

To examine COM crystallization, the experiments were conducted at 40 °C and pH 8 in a cylindrical, jacketed, glass crystallizer with a maximum working capacity of 0.5 L. The constant temperature was maintained in the crystallizer using a thermostat. A stirring mechanism comprised a spiral propeller blade and mechanical stirrer and the rate was maintained at a rate of 400 rpm. The pH in the crystallizer was

kept constant at 8 using 0.1 M hydrochloric acid or calcium hydroxide solution.

Calcium chloride and sodium oxalate were used to create the solutions for synthesizing the COM crystals. First, calcium chloride solution was poured into the crystallizer and left to reach thermal equilibrium, after which sodium oxalate solution was fed into the crystallizer using a peristaltic pump at 5 mL/min. To investigate the effects of mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids on COM crystallization, we fed these additives into the crystallizer using an infusion pump. The experiments were conducted at three different additive concentrations—50, 100, and 200 ppm. All experimentation was performed in triplicate.

At the end of the experiments, the entire suspension in the crystallizer was removed, and the solution and solids were separated using the pressure filtration method. The filter cake was washed with distilled water to remove the chloride ions. Silver nitrate solution was added to the washing solution to check for any remaining chloride ions. The solid sample was put into an Erlenmeyer flask and kept in a water bath 25°C for 3 months to determine any structural transformations, after which the sample was used for characterization analyses.

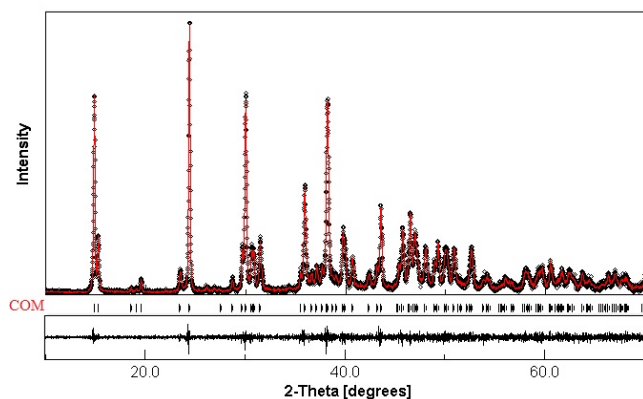
X-ray powder diffraction (XRD) was used to identify the structures of the crystals (Bruker D2 Phaser tabletop diffractometer) using  $\text{Cu K}\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) and performed for  $2\theta$  values of 10–70°. Additional structural analyses were conducted using the Shimadzu IR Affinity-1 spectrometer at a resolution of  $4 \text{ cm}^{-1}$  and a wavenumber from 4000 to  $600 \text{ cm}^{-1}$ . Scanning electron microscopy (SEM; Zeiss EVO LS 10) was used to characterize the morphology of the products. The surface electrical charge and particle size of the crystals were examined using the Malvern Zeta Sizer Nano Series Nano-ZS. The thermal properties of the COM crystals were determined using the Setaram LABSYS Evo instrument in which  $15 \pm 0.1 \text{ mg}$  sample was placed in an aluminum oxide crucible and heated from 30 to 900 °C at a rate of 10 °C/min under a constant nitrogen flow rate of 25 mL/min.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. XRD Analyses

Three forms of calcium oxalate crystals—COM, COD, and COT—can be synthesized depending on the conditions. To determine the forms and lattice parameters of these crystals and determine the reliability of the results, a Rietveld analysis was conducted using MAUD (<http://maud.radiophema.com/>). The XRD patterns along with the Rietveld

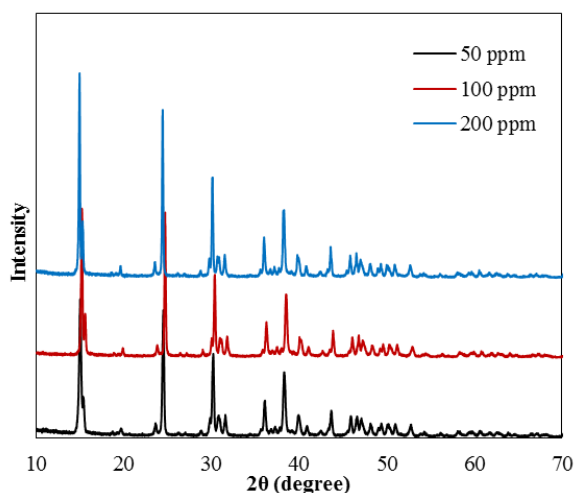
refined data for the crystals prepared in pure medium are provided in Figure 1.



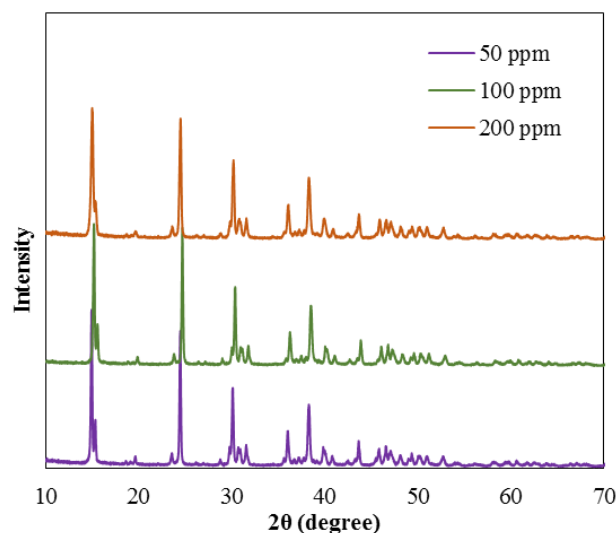
**Figure 1.** Rietveld refined X-ray powder diffraction (XRD) pattern of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in pure medium.

In Figure 1, the black curve is the observed XRD pattern of the samples prepared in pure medium, and the red curve is the calculated XRD pattern, which were well-matched with each other. The major diffraction peaks detected at  $2\theta$  of  $\sim 15^\circ$ ,  $\sim 25^\circ$ ,  $\sim 30^\circ$ , and  $\sim 38^\circ$  for calcium oxalate crystals prepared in pure medium were compatible with the peaks of the monohydrate form and consistent with the Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) (No: 00-020-0231). The unit cell parameters were detected as  $a = 9.991 \text{ \AA}$ ,  $b = 7.297 \text{ \AA}$ , and  $c = 6.309 \text{ \AA}$ , which agreed with those in the literature [12].

Figures 2 and 3 illustrate the XRD patterns of the crystals prepared using different concentrations of mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids, respectively.



**Figure 2.** XRD pattern of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in mandelic acid medium.

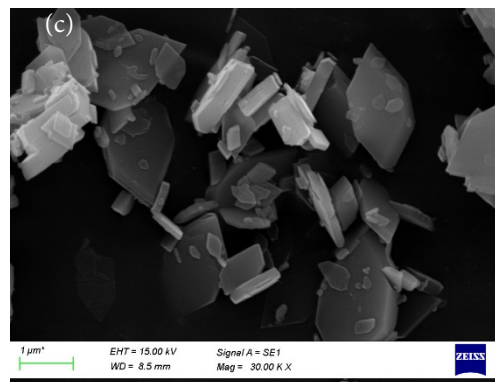
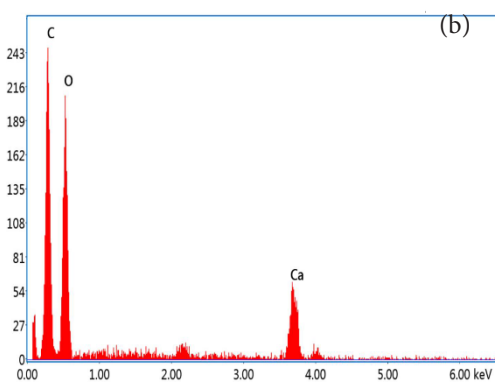
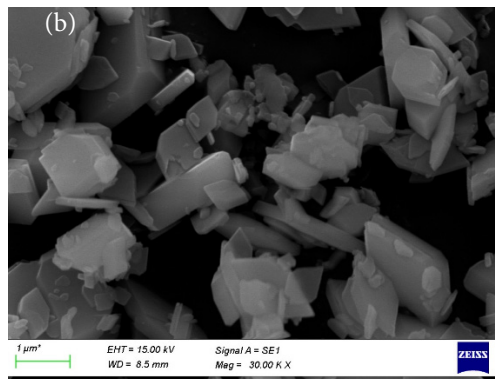
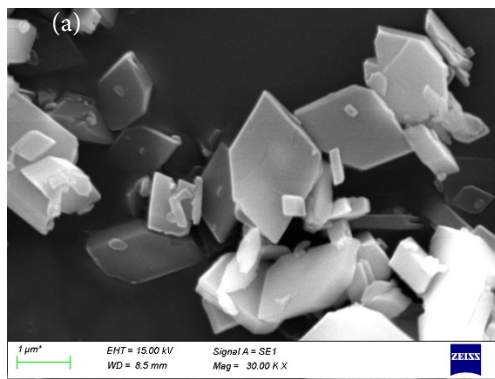


**Figure 3.** XRD pattern of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in propane-1,2,3-tricarboxylic acid medium.

We determined that the studied concentration range of the additives in the crystallization medium did not lead to any changes in the crystal structure, and that all the crystals kept the monohydrate form. On the other hand, by increasing the concentration of both additives, the intensities of the diffraction peaks increased and shifted slightly, resulting from the lesser amounts of additives adsorbed onto the crystal surfaces.

### 3.2. SEM Analyses

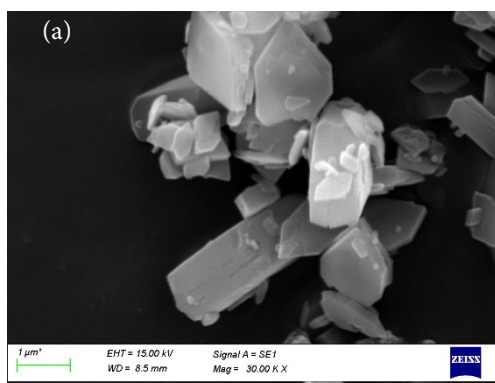
Figure 4 displays the SEM image and corresponding energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) spectrum for the COM crystals prepared in pure medium. Consistent with the literature [13], the uniform hexagonal prismatic crystals with smooth surfaces were those synthesized without the additives. The monohydrate samples were obtained beginning with the nuclei stage and were preserved during the growth process. The mean particle size of the crystals was  $\sim 1.0 \mu\text{m}$ . To determine the chemical composition of the COM crystal surface, an EDX was conducted; the resulting spectrum is shown in Figure 4b. We observed from EDX analysis that calcium, carbon, and oxygen were detected on the surface of the COM crystals.



**Figure 4.** (a) SEM image and (b) energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) spectrum of the calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in pure medium.

**Figure 5.** SEM images of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in (a) 50 ppm (b) 100 ppm, and (c) 200 ppm mandelic acid.

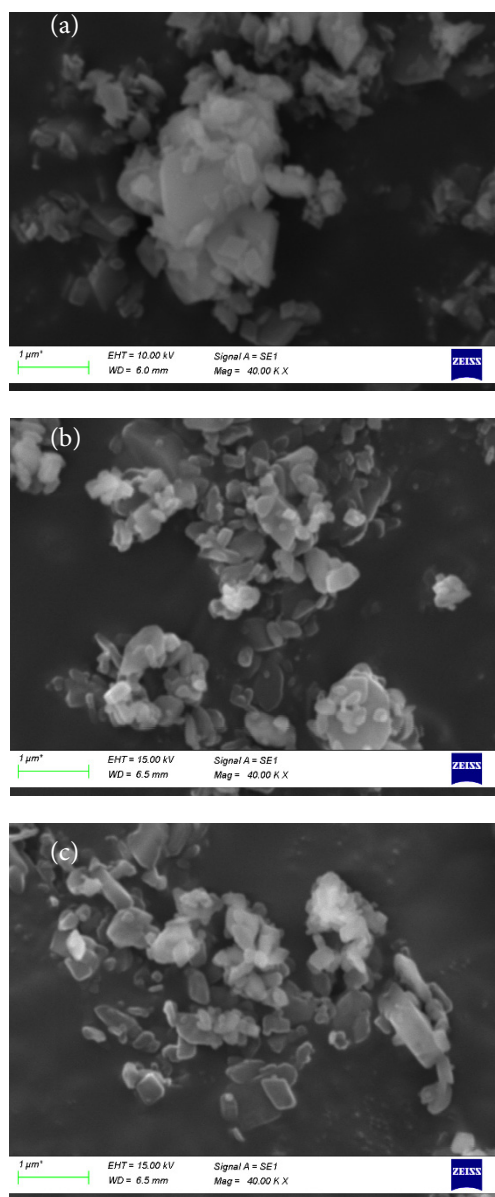
To investigate the effect of the mandelic and propa-1,2,3-tricarboxylic acids on the morphology of the COM crystals, the experiments were conducted using different additive concentrations of 50, 100, and 200 ppm. Figure 5 shows the SEM images of the COM crystals prepared using various mandelic acid concentrations.



The crystals synthesized in 50 ppm mandelic acid were similar to those synthesized in the pure medium, although their surfaces showed deformations because of disruptions in growth. Moreover, surface nucleation began by adding 50 ppm mandelic acid into the medium and this nucleation became more effective when the additive concentration was increased to 100 ppm, resulting in the formation of crystal agglomerates. As a result of the growth of nuclei that formed independently from surface nucleation of the main crystal structure, we observed a certain extent of overlapping growths on the crystal surface. At the same time, the morphology of the crystals began to change. The crystals prepared with 200 ppm mandelic acid had no distinctive form. These crystals lost their hexagonal appearance and exhibited a more rectangular form. Moreover, they were thicker than those in either the pure medium or in additive concentrations of 50 and 100 ppm, and exhibited a more compact structure, with several defects on the crystal surfaces. The ratios of length to width of the crystals were different from those synthesized in pure medium and the other mandelic

acid concentrations. As a result, the presence of 200 ppm mandelic acid resulted in the formation more rectangular COM crystals.

Figure 6 shows the morphological features observed after adding propane-1,2,3-tricarboxylic acid to the crystallization medium. As seen from the figures, the surface properties and morphology of the COM crystals were directly related to the additive concentrations.



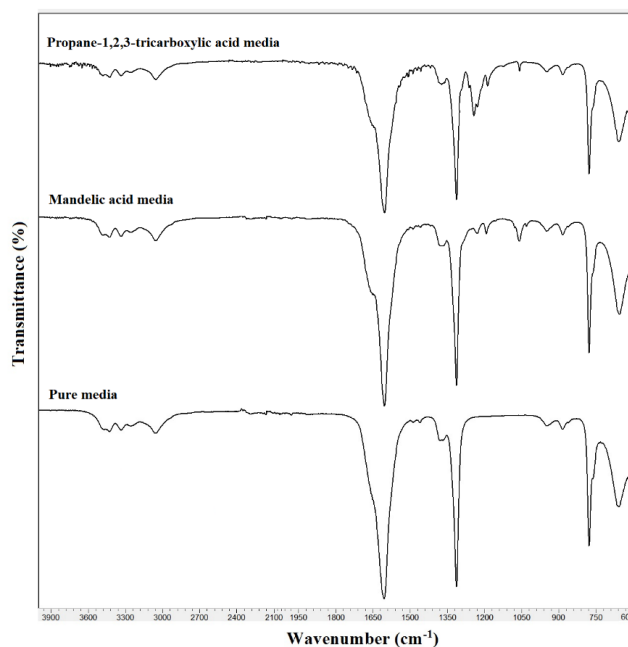
**Figure 6.** SEM images of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in (a) 50 ppm (b) 100 ppm, and (c) 200 ppm propane-1,2,3-tricarboxylic acid.

The COM crystals prepared in propane-1,2,3-tricarboxylic acid were much smaller than those synthesized in pure medium and formed compact overlapping aggregates. These

crystals lost a significant level of their hexagonal morphology and had no distinctive or regular shape. Surface nucleation was present and effective, and the crystals had a tendency toward overlapping growth. The crystals prepared in 100 ppm propane-1,2,3-tricarboxylic acid medium were even smaller than those synthesized in 50 ppm additive and nearly lost their hexagonal form. The sharp corners of the crystals disappeared, which led to rounder crystals. Similar to the crystals synthesized in 100 ppm mandelic acid, those formed in 100 ppm propane-1,2,3-tricarboxylic acid led to surface nucleation, resulting in a tendency to aggregate. In the presence of 200 ppm additive, the crystals nearly lost their appearance, and crystal defects were more noticeable. As these growth defects emerged, the crystal form became more irregular. The SEM images clearly showed that the surface of the crystals became rough, which suggested that adding propane-1,2,3-tricarboxylic acid led to the formation of smaller crystals with more defects.

### 3.3. FTIR Analyses

The FTIR spectra of the COM crystals prepared in both pure and additive media were analyzed to determine their chemical structures. Figure 7 displays the FTIR spectra of the COM crystals in the pure medium and in media containing 200 ppm mandelic acid and 200 ppm propane-1,2,3-tricarboxylic within a range of 600–4000  $\text{cm}^{-1}$ , respectively.

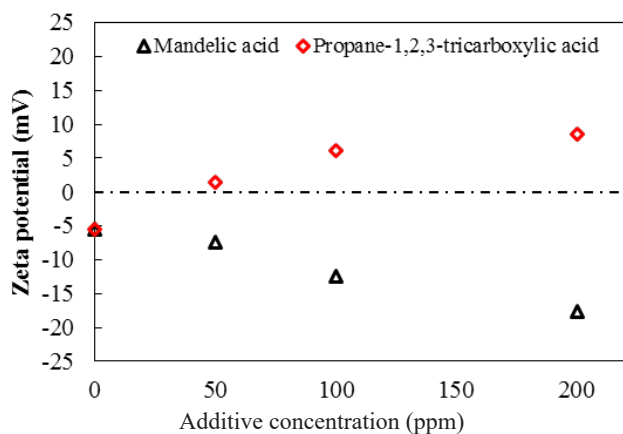


**Figure 7.** FTIR spectra of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared with and without additives to the medium.

The five transmittance bands, which are characteristic peaks of a monohydrate form, between 3000 and 3500  $\text{cm}^{-1}$  represents the O–H stretch of the water molecules. The peaks at 1606 and 1315  $\text{cm}^{-1}$  were assigned to the vibrations of carbonyl stretching, and the peaks at 950 and 883  $\text{cm}^{-1}$  denoted the vibrations of C–C stretching [14,15]. On the other hand, very few functional groups were detected on the surface of the COM crystals prepared in either medium containing an additive. The most significant absorbance peaks were observed between 1250 and 1050  $\text{cm}^{-1}$  assigned to the C–O stretching vibrations, which indicated the presence of the additives. Thus, the presence of characteristic bands provided a vivid explanation of the differences in the surface charge of the crystals prepared with mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids.

### 3.4. Zeta Potential Analyses

Zeta potential measurements were conducted to investigate the effects of different concentrations of mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids on the surface electrical charge of COM crystals. In the analyses, each measurement was repeated at least 10 times, and the mean value was calculated. All experiments were conducted at 25°C. The zeta potential profiles of the crystals based on the additive concentrations are shown in Figure 8.



**Figure 8.** Changes in the zeta potential values of the calcium oxalate monohydrate (COM) prepared in pure medium and in medium containing different concentrations of additives.

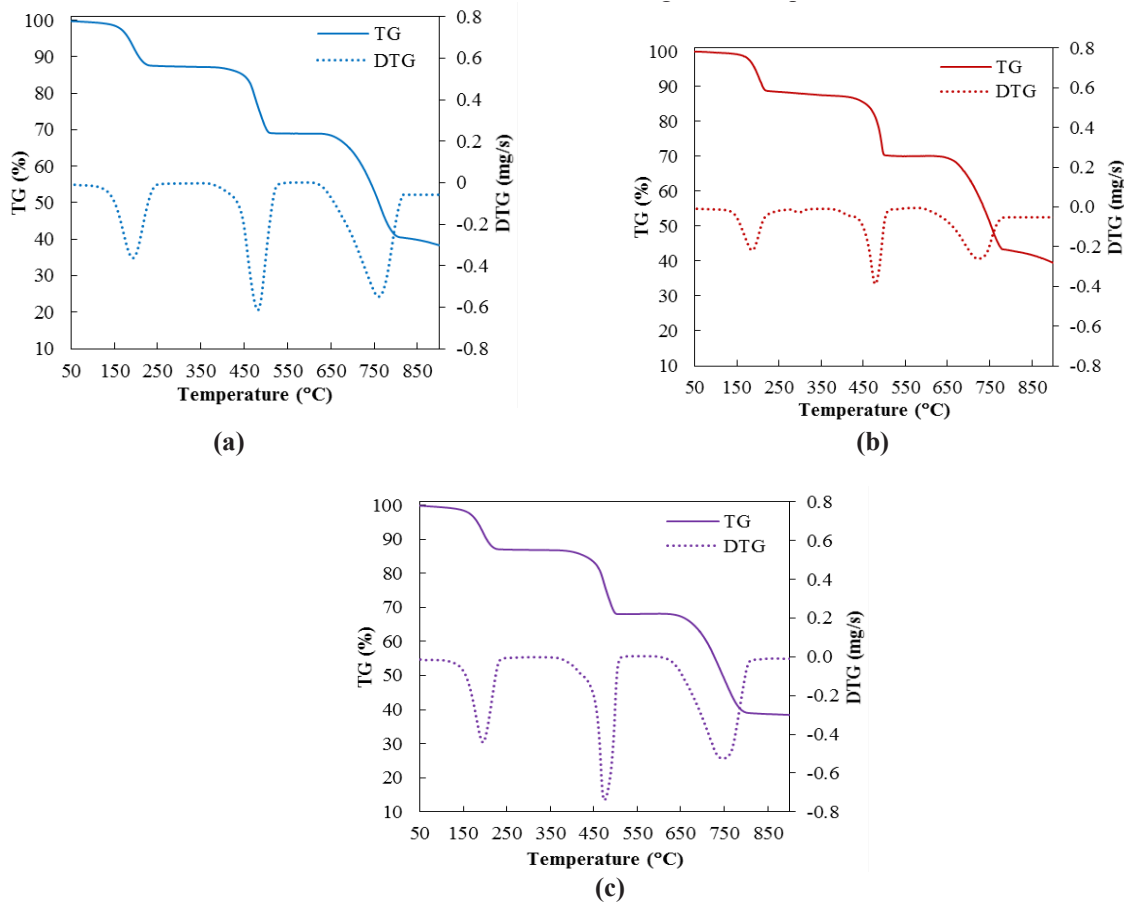
Zeta potential measurements showed that COM crystals have a  $-5.6 \pm 1.4$  mV zeta potential, and that the surface of the crystals in 100 ppm mandelic acid medium became more negative than that synthesized in pure medium with an increase in negativity to  $-12.5 \pm 0.9$  mV. In addition, the surface became more negative by increasing the additive's

concentration, which is an indication of the inhibitory effect of the additive on COM crystal aggregation.

In the presence of propane-1,2,3-tricarboxylic acid, the zeta potential passed the isoelectric point and reached a positive value, which increased even further by increasing the concentration of the additive. At 50 ppm propane-1,2,3-tricarboxylic acid, the zeta potential was  $1.4 \pm 1.1$  mV. This result indicated that crystal agglomeration tended to increase, which supported the results of the SEM analysis. The variations in the zeta potential values showed that the carboxylic acids were adsorbed onto the surface of the COM crystals with weak van der Waals bonds.

### 3.5. Thermogravimetric Analyses

The thermal degradation behavior of the COM crystals was determined using thermogravimetric analysis (TGA). The TG and differential thermal analysis (DTG) curves of the COM crystals synthesized in the pure medium and in the presence of 200 ppm additives are shown in Figure 9. Thermal degradation of the prepared samples showed three weight loss regions—dehydration, decarbonylation, and decarbonation—respectively [14,16]. The first stage occurring from  $\sim 116$  to 236°C represents dehydration of the COM crystal, and the second decomposition corresponds to the splitting of carbon monoxide. The final stage was the splitting of carbon dioxide. The DTG curves were used to determine the zone of degradation in which various reaction steps occurred over the entire temperature range. The maximum peak temperatures of the first, second, and third regions were 194, 482, and 761°C, respectively. A similar degradation tendency was also detected for the two media containing the additives; however, the COM crystals synthesized in mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids were thermally more stable than those synthesized in pure medium and decomposed more slowly over a broader temperature range of from 30 to 900 °C because of traces of the additives remaining in the samples.



**Figure 9.** Thermogravimetric (TG) and differential thermal analysis (DTG) curves of calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in pure medium (a), with mandelic acid (b), and with propane-1,2,3-tricarboxylic acid (c).

### 3.6. Kinetic Analyses of Thermal Decomposition

The kinetics of the thermal degradation of COM crystals were studied using thermogravimetry at a constant heating rate of 10°C/min. The kinetic parameters, activation energy, and pre-exponential factor of the COM crystals prepared with and without additives were determined using the Coats-Redfern method [17]. The degradation rate of the solid sample is given as the following formula:

$$\frac{dx}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)(1-x) \quad (1)$$

where  $A$  is the pre-exponential factor,  $E$  is the activation energy,  $T$  is the temperature,  $t$  is time, and  $x$  is weight loss fraction, which can be calculated by Equation (2)

$$x = \frac{W_o - W_t}{W_o - W_f} \quad (2)$$

where  $W_o$  is the initial mass of the sample,  $W_t$  is the mass at time  $t$ , and  $W_f$  is final mass at the end of degradation. For a constant heating rate  $\beta$  during thermal degradation,  $\beta = dT/dt$ , rearranging Equation (1) and integrating give

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-x)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\right] - \frac{E}{RT} \quad (n=1) \quad (3)$$

Plotting the left side of Equation (3) against  $1/T$  gives a straight line and is presumed to be a first-order reaction.  $E$  can be determined from the slope of  $-E/R$ , and  $A$  can be calculated from the  $\ln[AR/\beta E]$  intercept [18].

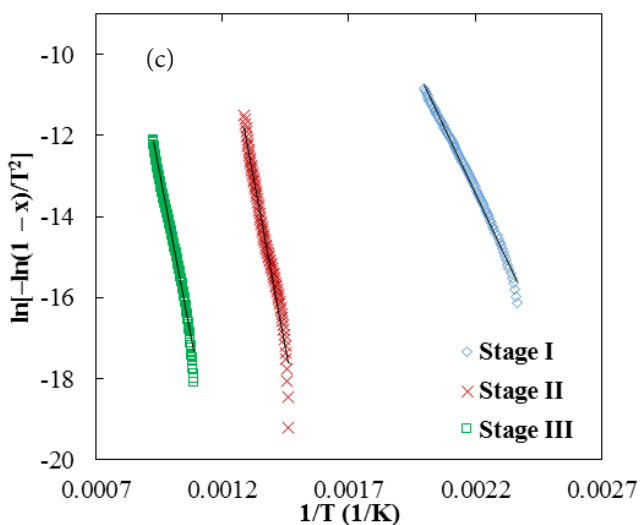
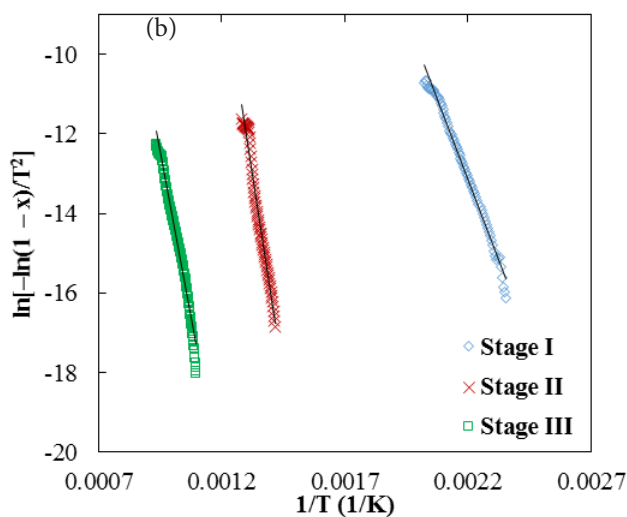
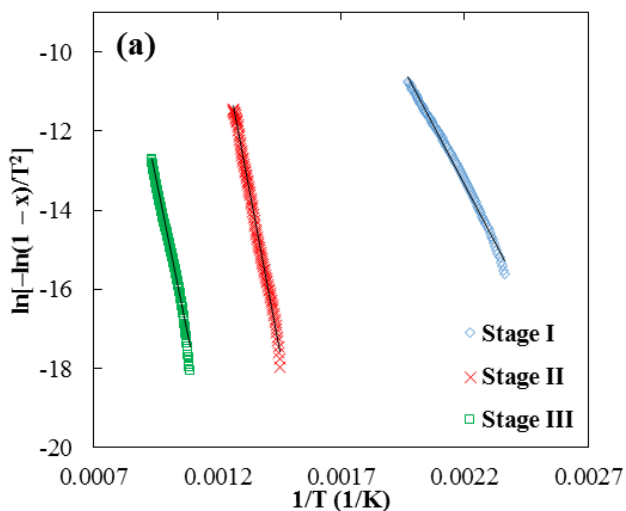
Figure 10 shows the typical plot of  $\ln[-\ln(1-x)/T^2]$  versus  $1/T$  for 10 °C/min, which indicates that for the degradation of COM crystals, three independent first-order reactions fit well with the data. This linear fit was observed for each degradation stage. The results computed using the Coats-Redfern model assuming first-order reactions are presented in Table 1. The activation energies for the COM crystals

synthesized in pure medium were 98.76, 270.69, and 258.55 kJ/mol for stages I, II, and III, respectively.

The calculated activation energy values were similar to those reported in previous studies [19], the highest of which represented the second stage and the lowest of which represented the first stage. In addition, the pre-exponential factors of the COM crystals synthesized in pure medium were  $4.28 \times 10^{10}$ ,  $2.70 \times 10^{18}$ , and  $3.99 \times 10^{12} \text{ min}^{-1}$ , respectively.

**Table 1.** Kinetic results for calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared with and without additives to the medium.

Stage	Fitted equation	E (kJ/mol)	A (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
Pure media				
Stage I	$y = -11879x + 12.794$	98.76	$4.28 \times 10^{10}$	0.9940
Stage II	$y = -32558x + 29.745$	270.69	$2.70 \times 10^{18}$	0.9971
Stage III	$y = -31098x + 16.368$	258.55	$3.99 \times 10^{12}$	0.9885
Mandelic acid media				
Stage I	$y = -16091x + 22.266$	133.78	$7.53 \times 10^{14}$	0.9904
Stage II	$y = -40785x + 41.066$	339.09	$2.79 \times 10^{23}$	0.9825
Stage III	$y = -32867x + 18.817$	273.26	$4.89 \times 10^{13}$	0.9835
Propane-1,2,3-tricarboxylic acid media				
Stage I	$y = -13211x + 15.665$	109.84	$8.40 \times 10^{11}$	0.9922
Stage II	$y = -33408x + 31.215$	277.75	$1.20 \times 10^{19}$	0.9762
Stage III	$y = -32235x + 17.727$	268.00	$1.61 \times 10^{13}$	0.9876



**Figure 10.** Plot of  $\ln[-\ln(1-x)/T^2]$  versus  $1/\text{temperature (T)}$  for the three degradation stages of the calcium oxalate monohydrate (COM) crystals prepared in pure medium (a), in the presence of mandelic acid (b), and in the presence of propane-1,2,3-tricarboxylic acid (c).

The activation energies of the COM crystals were 133.78, 339.09, and 273.26 kJ/mol for mandelic acid and 109.84, 277.75 and 268.00 kJ/mol for propane-1,2,3-tricarboxylic acid in stages I, II, and III, respectively. The pre-exponential factors were  $7.53 \times 10^{14}$ ,  $2.79 \times 10^{23}$ , and  $4.89 \times 10^{13} \text{ min}^{-1}$  for mandelic acid and  $8.40 \times 10^{11}$ ,  $1.20 \times 10^{19}$ , and  $1.61 \times 10^{13} \text{ min}^{-1}$  for propane-1,2,3-tricarboxylic acid in stages I, II, and III, respectively. The linear correlation coefficient  $R^2$  for these calculations was  $>0.9762$ , which supports the reliability of the model and resulting experimental data. The results of the thermal kinetic evaluation showed that the activation energy increased in both additive media, which meant that



the energy requirement for the degradation of COM crystals was higher than that in pure medium.

#### IV. CONCLUSION

COM crystals synthesized in pure medium and in the presence of mandelic and propane-1,2,3-tricarboxylic acids were assessed for their characteristics. XRD, SEM, FTIR, and zeta potential analyses were successfully used to characterize the COM crystals prepared with and without additives. In addition, the Coats-Redfern model was applied to determine the activation energy of the COM crystals during the thermal degradation process that included three reaction steps. A lower average activation energy was observed in the COM crystals synthesized in pure medium than that synthesized in the additives. The activation energies of the COM crystals prepared in mandelic acid medium were 133.78, 339.09, and 273.26 kJ/mol for stages I, II, and III, respectively.

Our results will provide additional perspectives for studies in this area and experimental evidence for the modification of the shape of COM crystals. The calculated kinetic parameters can also be beneficial to interpreting and modeling studies on COM crystals.

#### Acknowledgements

This work was supported by the Marmara University Scientific Research Projects Commission under the funding FEN-A-110.718.0396.

#### REFERENCES

- [1] Li, S., Tang, W., Li, M., Wang, L., Yang, Y., Gong, J., (2019). Understanding the Role of Citric Acid on the Crystallization Pathways of Calcium Oxalate Hydrates. *Cryst. Growth Des.*, 19(6), 3139-3147.
- [2] King, H.E., Mattner, D.C., Plümper, O., Geisler, T., Putnis, A., (2014). Forming Cohesive Calcium Oxalate Layers on Marble Surfaces for Stone Conservation. *Cryst. Growth Des.*, 14(8), 3910-3917.
- [3] Akyol, E., Öner, M., (2014). Controlling of morphology and polymorph of calcium oxalate crystals by using polyelectrolytes. *J. Cryst. Growth.*, 401(1), 260-265.
- [4] Akin, B., Öner, M., Bayram, Y., Demadis, K.D., (2008). Effects of Carboxylate-Modified, "Green" Inulin Biopolymers on the Crystal Growth of Calcium Oxalate. *Cryst. Growth Des.*, 8(6), 1997-2005.
- [5] Ruiz-Agudo, E., Burgos-Cara, A., Ruiz-Agudo, C., Ibañez-Velasco, A., Cölfen, H., Rodríguez-Navarro, C., (2017). A non-classical view on calcium oxalate precipitation and the role of citrate. *Nat Commun.*, 8, 768.
- [6] Ouyang, J.M., Duan, L., Tieke, B., (2003). Effects of Carboxylic Acids on the Crystal Growth of Calcium Oxalate Nanoparticles in Lecithin-Water Liposome Systems. *Langmuir*, 19(21), 8980-8985.
- [7] Li, S., Tang, W., Li, M., Wang, L., Yang, Y., Gong, J., (2019). Understanding the Role of Citric Acid on the Crystallization Pathways of Calcium Oxalate Hydrates. *Cryst. Growth Des.*, 19(6), 3139-3147.
- [8] Ouyang, J.M., (2006). Effects of temperature on growth and aggregation of calcium oxalate in presence of various carboxylic acids in silica gel systems. *Mat. Sci. Eng. C-Mater.*, 26(4), 679-682.
- [9] Grases, F., Millan, A., Garcia-Raso, A., (2010). Formation of Thermodynamically Unstable Calcium Oxalate Dihydrate in Sugar Mill Evaporators. *Proc. Aust. Soc. Sugar. Cane Technol.*, 32, 522-533.
- [10] East, C.P., Doherty, W.O., Fellows, C.M., Yu, H., (1988). Polyhydroxycarboxylic acids as inhibitors of calcium oxalate crystal growth; Relation between inhibitory capacity and chemical structure. *J. Cryst. Growth.*, 89(4), 496-500.
- [11] Akyol, E., Öner, M., (2007). Inhibition of calcium oxalate monohydrate crystal growth using polyelectrolytes. *J. Cryst. Growth.*, 307(1), 137-144.
- [12] Izatulina, A.R., Gurzhiy, V.V., Krzhizhanovskaya, M.G., Kuz'mina, M.A., Leoni, M., Frank-Kamenetskaya, O.V., (2018). Hydrated Calcium Oxalates: Crystal Structures, Thermal Stability, and Phase Evolution. *Cryst. Growth Des.*, 18, 5465-5478.
- [13] Zhang, Y., Tao, J., Feng, N., Han, X., (2008) Crystal growth of calcium oxalate induced by the extracts of Semen Plantaginis and Folium Pyrrosiae. *Cryst. Res. Technol.*, 43, 931-934.
- [14] Ihli, J., Wang, Y.W., Cantaert, B., Kim, Y.Y., Green, D.C., Bomans, P.H.H., Sommerdijk, N.A.J.M., Meldrum, F.C., (2015). Precipitation of Amorphous Calcium Oxalate in Aqueous Solution. *Chem. Mater.*, 27, 3999-4007.
- [15] Duan, C.Y., Xia, Z.Y., Zhang, G.N., Gui, B.S., Xue, J.F., Ouyang, J.M., (2013). Changes in urinary nanocrystallites in calcium oxalate stone formers before and after potassium citrate intake. *Int. J. Nanomedicine*, 8, 909-918.
- [16] Frost, R.L., Weier, M.L., (2004). Thermal treatment of whewellite—a thermal analysis and Raman spectroscopic study. *Thermochim. Acta*, 409, 79-85.
- [17] Coats, A.W., Redfern, J.P., (1964). Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*, 201, 68-69.
- [18] Naqvi, S.R., Tariq, R., Hameed, Z., Ali, I., Naqvi, M., Chen, W.H., Ceylan, S., Rashid, H., Ahmad, J., Taqvi, S.A., Shahbaz, M., (2019). Pyrolysis of high ash sewage sludge: kinetics and thermodynamic analysis using Coats-Redfern method. *Renew Energy*, 131, 854-860.
- [19] Vlaev, L., Nedelchev, N., Gyurova, K., Zagorcheva, M., (2008). A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.*, 81, 253-262.

# Investigation of Structural, Spectral, Biological Activity of Monohydrous Dihydrogen Phosphate Salt of Ciprofloxacin: Computational and Molecular Docking Study

Siprofloksasinin Monohidröz Dihidrojen Fosfat Tuzunun Yapısal, Spektral, Biyolojik Aktivitesinin Araştırılması: Hesaplamalı ve Moleküler Yerleştirme Çalışması

Tuğba AYCAN<sup>1</sup> , Filiz ÖZTÜRK<sup>2</sup> , Nilgün ÖZDEMİR<sup>3</sup> , Hümeysra PAŞAOĞLU<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Sinop Üniversitesi, Fizik Bölümü, 57000, Sinop, Türkiye

<sup>2</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, 55139, Samsun, Türkiye

<sup>3</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Gıda Mühendisliği, 55139, Samsun, Türkiye

<sup>4</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fizik Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

## Abstract

The present study describes the synthesis, spectroscopic and biological activity of Monohydrous Dihydrogen Phosphate Salt of Ciprofloxacin (MDPSC). The asymmetrical part of the unit cell contains one ciprofloxacin cation, one dihydrogen phosphate anion and one water molecule. The techniques used for the characterization are single crystal X-ray diffraction and spectroscopic method (IR, UV) and thermal analysis. The molecular structure was theoretically optimized using DFT/B3LYP/6-31G(d,p) methods for ground state, and compared with experimental values. Scaled theoretical vibrational frequencies are compared with experimental values. The UV-Vis results that experimentally obtained are compared with the calculated electronic properties such as HOMO and LUMO energies and the MEP are also investigated. The vibrational frequencies has been studied by comparing the characteristic bands related to the functional groups of the compound and the ciprofloxacin. Thermal properties have been investigated with TGA. Biological study of the complex against Staphylococcus aerous, Escherichia coli, Candida Albicans, Bacillus Subtilis, Pseudomonas aeruginosa and Aspergillus Flavus showed very strong antibacterial activity with MIC values ranging from 512  $\mu\text{g mL}^{-1}$  to 1  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . The optimized complex is docked to the 5J9B, 5BMM, 5HTG, 1ZUV, 4F0V and 4YNU.

**Keywords:** Ciprofloxacin, X-ray diffraction, Spectral analysis, Antimicrobial activity, Molecular modelling

## Öz

Bu çalışma, Siprofloksasinin Monohidröz Dihidrojen Fosfat Tuzunun (MDPSC) sentezini, spektroskopik ve biyolojik aktivitesini açıklar. Birim hücrenin asimetrik kısmı bir siprofloksasin katyonu, bir dihidrojen fosfat anyonu ve bir su molekülü içerir. Karakterizasyon için kullanılan teknikler, tek kristalli X-ışını kırınımı ve spektroskopik yöntem (IR, UV) ve termal analizdir. Moleküler yapı teorik olarak taban durumu için DFT/B3LYP/6-31G(d,p) yöntemleri kullanılarak optimize edildi ve deneysel değerlerle karşılaştırıldı. Ölçekli teorik titreşim frekansları deneysel değerlerle karşılaştırıldı. Deneysel olarak elde edilen UV-Vis sonuçları, HOMO ve LUMO enerjileri ve MEP gibi hesaplanan elektronik özelliklerle karşılaştırıldı. Titreşim frekansları, bileşiğin ve siprofloksasinin fonksiyonel gruplarıyla ilgili karakteristik bantların karşılaştırılmasıyla çalışılmıştır. TGA ile termal özellikler incelenmiştir. Kompleksin Staphylococcus aerous, Escherichia coli, Candida Albicans, Bacillus Subtilis, Pseudomonas aeruginosa ve Aspergillus Flavus'a karşı yapılan biyolojik çalışma, MIC değerleri 512  $\mu\text{g mL}^{-1}$  ile 1  $\mu\text{g mL}^{-1}$  arasında değişen çok güçlü bir antibakteriyel aktivite göstermiştir. Optimize edilmiş kompleks, 5J9B, 5BMM, 5HTG, 1ZUV, 4F0V ve 4YNU'ya yerleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Siprofloksasin, X ışını kırınımı, Spektral analiz, Antimikrobiyal aktivite, Moleküler modelleme

**Sorumlu yazar/Corresponding Author:** Tuğba AYCAN, Tel: 0(368) 271 57 79, e-posta: taycan@sinop.edu.tr

**Gönderilme/Submitted:** 21.06.2019, **Düzenleme/Revised:** 26.10.2019, **Kabul/Accepted:** 11.12.2019

## I. INTRODUCTION

Fluoroquinolone is a broad spectrum synthetic antibiotic that are quinolone members. These antibiotics show antimicrobial effects by acting as natural molecules in the cell. At the same time, fluoroquinolones are known as chemotherapeutic agents [1]. Research of crystals as antibiotics has drawn great interest for many years and the number of these studies has showed increase. The different designs of fluoroquinolone molecules have resulted in compounds with a new biological effect [2]. Ciprofloxacin cation with acceptor and donor groups can participate in the formation of hydrogen bonds. The compounds can crystallize in a variety of polymeric forms as well as in co-crystals, salts, and crystal hydrates and solvates as the components of complexes [3]. While an organic acid can be more preferred than a simple drug molecule, phosphoric acid which is an inorganic acid displays H-bond pattern in the formation of mix-ligand crystals [2]. There are few quantum chemical analyses on ciprofloxacin. Recently some quantum chemical studies have been made on ciprofloxacin. In this study, firstly monohydrous dihydrogen phosphate salt of ciprofloxacin was synthesized, its structural (Single Crystal XRD) and spectral (TGA, IR and UV-VIS) analyses were done together with theoretical calculations at the same time. Molecular electrostatic potential (MEP) maps were investigated and some quantum chemical parameters were theoretically calculated for the biological reactivity of complex. We aimed to improve the biological and pharmaceutical properties of antibacterial ciprofloxacin used in treatment. In addition to this analysis, the complex was docked to appropriate proteins taken from Protein Data Bank (<http://www.rcsb.org/pdb/home/home.do>).

## II. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Synthesis

A mixture of 0.5 mmol ciprofloxacin (0.19 g), and 0.2 mmol phosphoric acid (0.020 g) and H<sub>2</sub>O (20 ml) was heated until dissolved and colorless crystals were obtained after several days. Washed with distilled water and finally dried in air.

### 2.2. Physical Measurements

By preparing KBr pellet disc, in the mid-IR region (4000-400 cm<sup>-1</sup>), the IR spectrum was recorded by a Bruker Vertex 80V FT-IR spectrometer and to converted from absorbance to transmittance using Bruker OPUS software. MFMF (the magnetic field modulation frequency) and the microwave power were regulated as 100 kHz and 0.998 mW,

respectively. At room temperature, the UV-Visible spectrum in aqua solution was recorded by a Unicam UV-Vis spectrometer between 190 and 1100 nm. The absorption spectra of title complex was drawn using VISIONcollect Software. Simultaneous TG, DTG and DTA curves were obtained in nitrogen atmosphere at 10 K/min heating rate in the platinum pats, in the range of temperature 20-1000 °C by using TA/DMAQ800 thermal analyser in OMU-KITAM laboratory. XRD data was collected using a Stoe IPDS diffractometer at 296 K by graphite monochromatic MoK<sub>α</sub> radiation (λ=0.71073 Å). The crystal structure was analyzed by direct methods and all non-hydrogen atoms were refined anisotropically by full matrix least-squares methods using the program SHELX2008 [4]. WinGX [5], ORTEP-3 for Windows [5] and MERCURY [6] software were used for molecular drawings and other materials. Crystal data and structure refinement parameters are given in Table 1.

**Table 1.** Crystal data and structure refinement parameters for complex

Formula	C <sub>17</sub> H <sub>23</sub> N <sub>3</sub> O <sub>8</sub> FP
Formula weight	447.35
Temperature(K)	296
Radiation, λ(MoK <sub>α</sub> )	0.71069
Crystal system	Triclinic
Space group	P-1
Unit cell dimensions	
a, b, c (Å)	7.401 (5), 9.046 (5), 15.858 (5)
α, β, γ (°)	100.398 (5), 97.630 (5), 107.004 (5)
Volume (Å <sup>3</sup> )	979.0 (9)
Z	2
Calculated density (g cm <sup>-3</sup> )	1.518
μ(mm <sup>-1</sup> )	0.20
F(000)	468
Crystal size (mm)	0.25×0.20×0.10
θ range (°)	1.3-27.2
Index ranges	-9≤h≤9 -11≤k≤10 -20≤l≤20
Measured Reflections	7098
Independent reflections	3920
Reflections observed [ I ≥ 2σ(I) ]	3007
Absorption correction	Integration
Refinement method	Full matrix least-squares on F <sup>2</sup>
Data/restraints/parameters	3920/0/307
Goodness-of-fit on F <sup>2</sup>	1.07
Final R indices [ I ≥ 2σ(I) ]	R <sub>1</sub> =0.044; wR <sub>2</sub> =0.130
R indices (all data)	0.069

### 2.3. Antibacterial Activity

The antimicrobial activity of the complex and the sole ligand against *Staphylococcus aureus* ATCC 33862 (gram+),

*Bacillus subtilis* NRRL-B 209 (gram+), *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 (gram-) and *Escherichia coli* ATCC 25922 (gram-) bacteria, *Candida albicans* ATCC 10131 yeast and *Aspergillus flavus* MAM 200682 fungi was determined as minimum inhibitory concentrations (MIC) by the micro dilutions technique (96-well microplates technique) using the National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS) recommendations [7, 8]. In this assay, it was used Mueller–Hinton broth (Merck) for the bacterial strains and RPMI 1640 broth (Merck) for the fungal and yeast strains as growth medium. Serial twofold dilutions of standard and analyzing compounds ranging from 512  $\mu\text{g mL}^{-1}$  to 1  $\mu\text{g mL}^{-1}$  concentration were prepared in mediums. And these dilutions were added as 100  $\mu\text{L}$  in each well of a 96-well microplate. For inoculum of microorganisms, it was prepared adjusted to a turbidity equivalent to a 0.5 Mc Farland standard by using a 24 h culture of yeast strains and 18 h broth culture of each bacteria. A final concentration of  $5 \times 10^5$  CFU  $\text{mL}^{-1}$  for bacteria and  $0.5 \times 10^3$  to  $2.5 \times 10^3$  CFU  $\text{mL}^{-1}$  for yeast in the microplate were diluted in broth media to give. Then the microplates were incubated at 35 °C for 20 h for bacteria, at 25 °C for 48 h for yeast and 25 °C for 72–96 h for fungal cultures.

#### 2.4. DFT and Molecular Modelling

Density functional theory (DFT) calculations were applied by using Gaussian-09 software [9]. The minimum energy molecular geometry of the complex was predicted by B3LYP hybrid method. Geometric optimization was carried out at 6-31G(d,p) level. Molecular docking is a key tool in structural molecular biology and computer-aided drug design. The crystal structure *Staphylococcus aerous*, *Escherichia coli*, *Candida Albicans*, *Bacillus Subtilis*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Aspergillus Flavus* were downloaded from the protein Data Bank (PDB ID: 5J9B, 5BMM, 5HTG, 1ZUV, 4F0V and 4YNU, respectively, <http://www.rcsb.org/pdb>). The molecular docking studies were performed by AutoDock Tool (ADT) v1.5.6 and AutoDock Vina docking software. By AutoDock Tool software, to protein residues, polar hydrogen atoms were added. Precalculated atomic affinity grid map was constituted for each atom type in the ligand by AUTOGRIID. The grid box of  $x \times x$  (Å) is with spacing of 1 Å. The interactions between the complex and proteins are carried out by Discovery Studio Visualizer software.

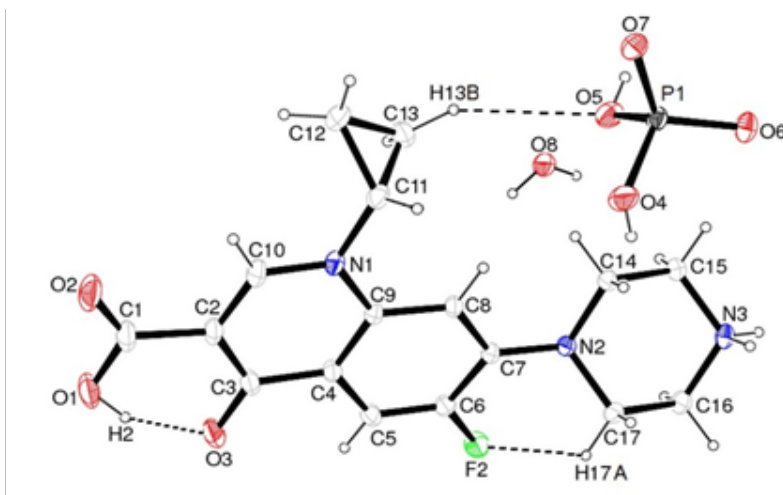
### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. X-ray Study and Optimized Geometry

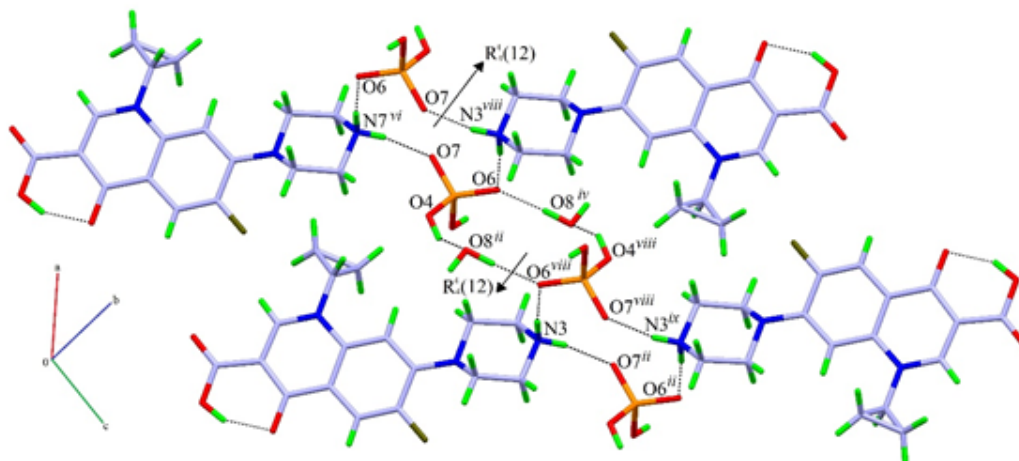
The molecule has four molecules per unit cell ( $Z = 2$ ) and the space group  $P-1$ . From SCXRD data results, it is

studied out that the crystal has triclinic by having to the following unit cell dimensions;  $a=7.401(5)$  Å,  $b=9.046(5)$  Å,  $c=15.858(5)$  Å and the angles of  $\alpha=100.398(5)^\circ$ ,  $\beta=129.296(5)^\circ$ ,  $\gamma=107.004(5)^\circ$ . The asymmetrical part of the unit cell contains one ciprofloxacin cation, one dihydrogen phosphate anion and one water molecule (Figure 1). In the crystal structure, a hydrogen atom is transferred from phosphoric acid to the nitrogen atom in the piperazine ring of ciprofloxacin. Due to these transfer, the changes are observed in the bond lengths of the piperazine ring and carboxylic acid group in the ciprofloxacin cation. However, bond lengths of cyclopropyl group do not show in any change. The N1–C10, C2–C10 and O1–C1 bond length in complex is shorter than that of ciprofloxacin complex N1–C10, C2–C10 and O1–C1. N13–C15, N3–C16 and C16–C17 bond length in complex is longer than that of ciprofloxacin complex N13–C15, N3–C16 and C16–C17 (Table 2) [10]. The reason why of these changes in bond lengths, O and H atoms can be attended to the hydrogen bonding. In the complex, while the shortening in the bond lengths of the carboxylic acid group is about 0.01 Å, there are considerable extensions in the bond lengths of the piperazine ring (0.44–0.23 Å). The strong hydrogen bond made between O atom of phosphoric acid anion and N atom of the piperazine ring causes elongation of bond lengths of N3–C16 and N3–C17.

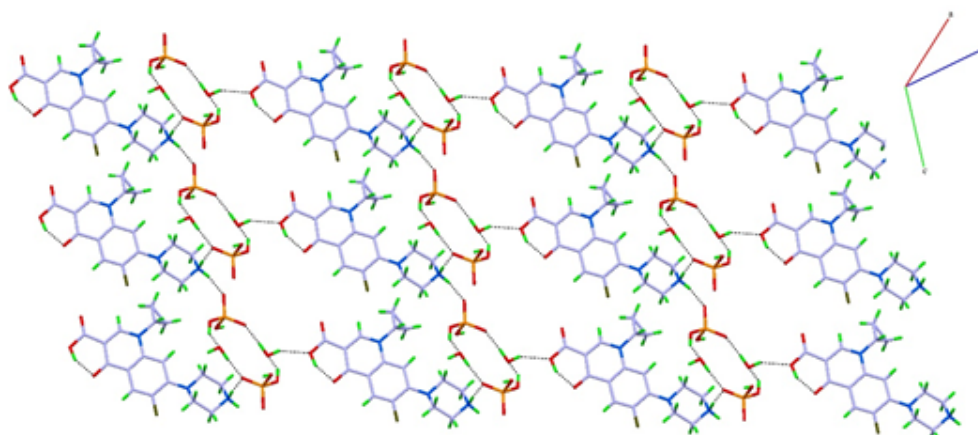
The crystal packing of the compound is achieved by intra and intermolecular hydrogen bonds. The hydrogen bond geometry is given in Table 3. The N atom in the piperazine ring of ciprofloxacin cation are bound to O atoms of the phosphate anions by the  $\text{N3}—\text{H3A} \cdots \text{O7}^{\text{vii}}$  and  $\text{N3}—\text{H3B} \cdots \text{O6}^{\text{viii}}$  hydrogen bonds resulting in a centrosymmetric  $R_4^4(12)$  motif (Figure 2). As well as another  $R_4^4(12)$  ring motif is formed by the hydrogen bond interaction between the water molecule and phosphate anion ( $\text{O8}—\text{H7A} \cdots \text{O6}^{\text{iv}}$  and  $\text{O4}—\text{H4} \cdots \text{O8}^{\text{ii}}$ ) (Figure 3). These intermolecular hydrogen bonds play an important role in the formation of 3D supramolecular structure of complex. The observed and calculated bond lengths, bond angles for the complex are listed in Table 2. The theoretical values of the geometric parameters are almost in accord with experimental values in despite of small differences (Figure 4). These differences are due to ignored molecular interactions in the gas phase. When the agreement between experimental and theoretical geometric parameters is examined, r.m.s.d is 0.145. These value showed that optimized and experimental structure are rather corresponded.



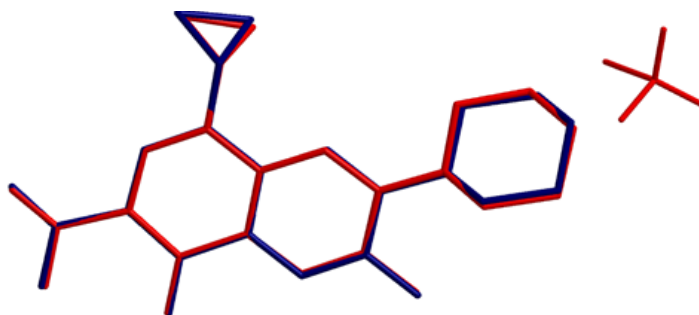
**Figure 1.** Ortep 3 diagram for monohydrated dihydrogen phosphate salt of ciprofloxacin, with the atom numbering scheme (The intramolecular hydrogen bonds are shown with dashed lines)



**Figure 2.** A partial packing diagram with O4 – H4...O8<sup>ii</sup> intermolecular hydrogen bonds



**Figure 3.** The two-dimensional plane by hydrogen bonds formed among phosphate anions, water molecules and carboxylic acid groups along the [110] direction



**Figure 4.** The image of superimposition of the experimental (red) and calculated (black) structures of the title molecule

**Table 2.** Selected bond distances (Å), angles (°) obtained by X-ray and DFT/B3LYP/6-31G(d,p).

	Experimental	DFT/6-31G(d,p)
<b>Bond lengths (Å)</b>		
P1–O4	1.5644 (17)	1.631
P1–O5	1.551 (2)	1.618
P1–O6	1.4903 (16)	1.483
P1–O7	1.5025 (17)	1.575
F2–C6	1.348 (3)	1.356
N1–C10	1.335 (3)	1.357
C2–C10	1.360 (3)	1.368
C10–H10	0.91 (3)	1.08
O1–C1	1.321 (4)	1.334
O1–H2	0.91 (4)	0.996
C11–C12	1.481 (3)	1.504
C13–C12	1.482 (4)	1.506
N3–C16	1.479 (3)	1.479
N3–C15	1.486 (3)	1.480
<b>Bond angles (°)</b>		
O2–C1–O1	121.5 (2)	122.719
O1–C1–C2	114.8 (3)	115.269
F2–C6–C5	118.44 (19)	119.402
F2–C6–C7	118.14 (17)	117.935
N1–C11–C12	118.9 (2)	119.697
N1–C11–C13	117.7 (2)	119.887

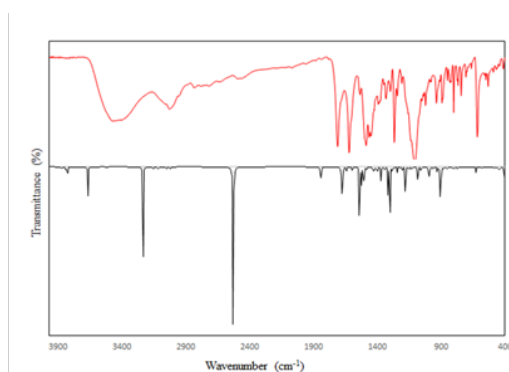
**Table 3.** Hydrogen bonding geometry for the title compound

<i>D</i> –H $\cdots$ <i>A</i>	<i>D</i> –H	H $\cdots$ <i>A</i>	<i>D</i> $\cdots$ <i>A</i>	<i>D</i> –H $\cdots$ <i>A</i>	
O5–H5 $\cdots$ O7 <sup>i</sup>	0.82	2.05	2.558 (2)	119	$-x+1, -y, -z+1$
O4–H4 $\cdots$ O8 <sup>ii</sup>	0.82	2.11	2.642 (3)	123	$x+1, y, z$
C12–H12B $\cdots$ O2 <sup>iii</sup>	0.97	2.42	3.220 (3)	139	$-x, -y-1, -z$
O8–H7A $\cdots$ O6 <sup>iv</sup>	0.96 (4)	1.74 (4)	2.694 (3)	176 (3)	$-x+1, -y+1, -z+1$
O8–H7B $\cdots$ O1 <sup>v</sup>	0.81 (4)	2.16 (4)	2.900 (3)	151 (3)	$-x, -y, -z$
C10–H10 $\cdots$ F2 <sup>vi</sup>	0.91 (3)	2.52 (3)	3.288 (3)	143 (2)	$x, y-1, z$
N3–H3A $\cdots$ O7 <sup>vii</sup>	0.88 (3)	1.87 (3)	2.731 (3)	166 (2)	$x, y+1, z$
N3–H3B $\cdots$ O6 <sup>viii</sup>	0.94 (4)	1.76 (4)	2.690 (3)	172 (3)	$-x+2, -y+1, -z+1$
C17–H17A $\cdots$ F2	0.97	2.24	2.888 (3)	123	
C13–H13B $\cdots$ O5	0.97	2.63	3.517 (3)	152	
O1–H2 $\cdots$ O3	0.91 (4)	1.68 (4)	2.528 (3)	153 (4)	

### 3.2. FT-IR Spectra

The infrared spectra experimental and theoretical for the complex was given in Figure 5. Moreover, the calculated and experimental vibration frequencies of compound are given by comparing in Table 4. Since the vibrational frequencies carried from experimental results are generally smaller than their DFT calculation, to match the theoretical results with experimental those, empirical scaling factors are used [11]. The theoretical vibrational frequencies were calculated at B3LYP/6-31G(d,p) level and scaled by 0.9627 [12]. The scaled theoretical frequencies are found as agreeable with the experimental FT-IR spectrum. The OH stretching vibrations lied in the region 3500–3000  $\text{cm}^{-1}$  in FT-IR spectrum are considerably effected from inter and intramolecular hydrogen bonds. The broad peak appeared at 3504  $\text{cm}^{-1}$  origins from the stretching vibration of the water molecule. Moreover, shoulder at 3423  $\text{cm}^{-1}$  is assigned to stretching vibration of OH groups [13]. While the  $\nu(\text{NH})$  stretching vibration of the piperazine ring in the free ciprofloxacin ligand is shown at 3143  $\text{cm}^{-1}$ , this peak is not present in the spectrum of new complex. The reason is that, one H atom transfers from phosphoric acid to the piperazine ring of ciprofloxacin. So the new vibration bands are seen at 3080  $\text{cm}^{-1}$  and 3050  $\text{cm}^{-1}$  because of the  $\text{NH}_2^+$  stretching vibration on

the piperazine ring. This is consistent with X-ray diffraction results. The bands observed at 1721  $\text{cm}^{-1}$  and 1630  $\text{cm}^{-1}$  can be assigned to the stretching vibrations of carboxylic  $\nu(\text{C}=\text{O})$  and the phenyl part  $\nu(\text{C}=\text{O})$ , respectively [14, 15]. The stretching vibrations  $\nu(\text{CH})$  of phenyl groups and the other  $-\text{CH}_2$  groups in the complex were observed between 3027  $\text{cm}^{-1}$  and 2855  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. These values correspond with by the expected values [13, 16]. The stretching bands at 1274  $\text{cm}^{-1}$ , 1164  $\text{cm}^{-1}$  and 1144  $\text{cm}^{-1}$  were assigned to the  $\nu(\text{C}-\text{C})$ ,  $\nu(\text{C}-\text{N})$  and  $\nu(\text{C}-\text{O})$ , respectively [16].



**Figure 5.** Experimental (red) and calculated (black) FT-IR spectrum of the complex

**Table 4.** The characteristic experimental vibrational assignments and corresponding calculated values ( $\text{cm}^{-1}$ )

Assignments	Ciprofloxacin [7-10]	Complex (exp.)	Complex (calcd.)
$\nu(\text{H}_2\text{O})$	-	3504 broad	3868,3665
$\nu(\text{OH})$	3490-3450	3423sh	3836, 3822
$\nu(\text{NH})$	3143	-	-
$\nu(\text{NH})_{\text{NH}_2^+}$	-	3080w,3050m	3516, 2524
$\nu(\text{CH})-\nu(\text{CH}_2)$	3086-2909	3027-2855	3268-3235, 3159-3016
$\nu(\text{C}=\text{O})_{\text{COOH}}$	1724	1721s	1835
$\nu(\text{C}=\text{O})_{\text{phenyl}}$	1616	1630s	
$\delta(\text{H}_2\text{O})$	-	1609sh	1683-1638
Phenyl breathing		1546 w	
$\delta(\text{NH})$	1590	-	-
$\delta(\text{C}=\text{C})$			1591,1534
$\delta(\text{OH})$	1542-1443	1508-1459	1531
$\delta(\text{CH})-\delta(\text{CH}_2)$			1526-1504
$\delta(\text{NH})$	1374s	-	-
$\delta(\text{NH})_{\text{NH}_2^+}$	-	1400w,1390w	1478, 1425
$\delta(\text{CH}_2)$	1330,1310	1339s,1305s	1478-1397
$\nu(\text{C}-\text{C})$	1286	1274vs	1361
$\nu(\text{C}-\text{N})$	1184	1164w	1278
$\nu(\text{C}-\text{O})$	1146	1144 sh	1266
$\gamma(\text{CH}_2)$	1115w	1113vs	1261-1242
$\nu(\text{C}-\text{F})$	1037	1056	1197
$\gamma(\text{NH})_{\text{NH}_2^+}$	-	1028	1144
$\gamma(\text{CH})$	988,959	991w,982w	1122
$\delta(\text{COO}^-)$	775-709	778-708	893-732
Ring deformation	652-544	666-534	707-625

( as: asymmetric; s: symmetric;  $\nu$ : stretching;  $\delta$ : in plane;  $\gamma$ : out of plane, vs: very strong; s: strong; m: medium; w: weak; sh: shoulder.)

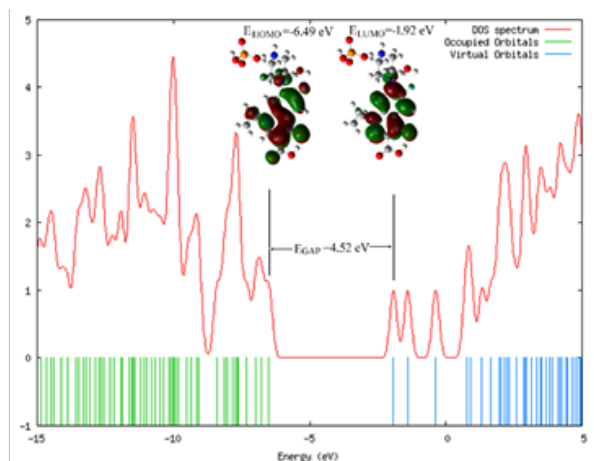
### 3.3. Chemical Activity

Conjugated molecules are described by the gap between the highest occupied molecular orbital (HOMO) and the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO). The gap between  $E_{\text{HOMO}}$  and  $E_{\text{LUMO}}$  is important to the molecular chemical stability. Moreover, by using  $E_{\text{HOMO}}$  and  $E_{\text{LUMO}}$  values of a molecule, the global chemical reactivity of molecules describe in Table 5 [17]. The parameters of the complex were compared with that of ciprofloxacin, norfloxacin [1] and levofloxacin [1] in Table 5. GaussSum 3.0 Software [18] was used to investigate the properties of frontier molecular orbitals and to plot TDOS shown in Figure 6.

**Table 5.** Calculated quantum chemical descriptors of complex, ciprofloxacin, norfloxacin and levofloxacin at same level of theory

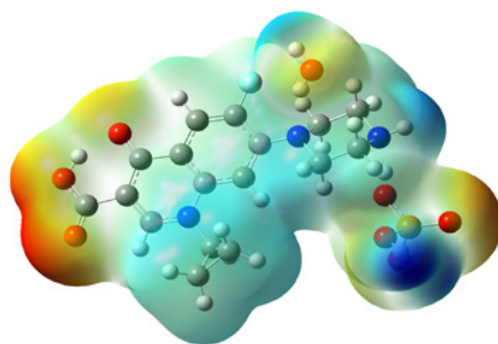
DFT	Complex	Ciprofloxacin	Norfloxacin [1]	Levofloxacin [1]
$E_{\text{HOMO}}^a$	-6.49	-6.05	-7.74	-7.45
$E_{\text{LUMO}}^a$	-1.92	-1.59	-1.11	-1.08
$E_{\text{GAP}}^a$	4.57	4.46	6.63	6.37
$I^a$	6.49	6.05	7.74	7.45
$A^a$	1.92	1.59	1.11	1.08
$\eta^a$	2.29	2.23	3.31	3.19
$\sigma^b$	0.44	0.45	0.30	0.31
$\chi^a$	4.21	3.82	4.43	4.26
$\text{CP}^a$	-4.21	-3.82	-4.43	-4.26
$\omega^a$	3.87	3.27	2.96	2.85
$N^b$	0.26	0.31	0.34	0.35
$\Delta N_{\text{MAX}}^b$	1.84	1.71	1.34	1.34
$S^b$	0.22	0.22	0.15	0.16

(<sup>a</sup>:eV; <sup>b</sup>:eV<sup>-1</sup>; I:ionization energy, A:electron affinity,  $\eta$ :absolute hardness;  $\sigma$ :absolute softness;  $\chi$ :absolute electronegativity; CP:chemical potential;  $\omega$ :electrophilicity index; N:nucleophilicity index;  $\Delta N_{\text{MAX}}$ :additional electronic charges; S:global softness)



**Figure 6.** Calculated total density of the states (TDOS) spectrum of the MDPSC

As the  $E_{\text{HOMO}}$  value increases, the reactivity of the compound increases, while the biological value of the compound increases with decreasing  $E_{\text{LUMO}}$  value. The complex exhibits higher biological activity in comparison with norfloxacin and levofloxacin and ciprofloxacin exhibits higher biological activity with regard to the complex. The MEP map of the molecule showed that while the around of the oxygen atom is the most electronegative region (red color), the amino groups and the H atoms are electropositive (blue color) because of the electron-donating nature of the amino groups (Figure 7).



**Figure 7.** The visual of MEP map calculated at DFT/B3LYP/6-31G (d,p) level

### 3.4. Electronic Absorption Spectra

The UV-Vis spectrum of the complex and ciprofloxacin in water was recorded within 190-1100 nm range. Moreover, electron transition between energy levels of these compounds have been studied with TD-DFT method. The UV-Vis absorption data were calculated using the GaussSum 3.0 software program [18]. There are characteristic absorption bands in the UV-Vis spectra of ciprofloxacin [19]. The bands observed between about 200 nm and 280 nm are due to the  $\pi \rightarrow \pi^*$  transition in the aromatic ring. When the calculated values of the  $\pi \rightarrow \pi^*$  transition (Cipro: 219 nm, 244 nm and 277 nm; Complex: 228 nm, 245 nm and 272 nm) are compared with the experimental values (Cipro: 218 nm, 249 nm and 277 nm; Complex: 221 nm, 245 nm and 275 nm), it is found that the results are in good agreement with the calculated values. These values may slightly shift due to solvent effect. The maxima at 335 nm and 341 nm observed in the experimental UV-Vis spectrum of ciprofloxacin and the complex, respectively, are due to the  $n \rightarrow \pi^*$  transition. However, these values are not observed in the theoretical UV-Vis spectrum. While there are solvent and intermolecular hydrogen bonding effects in the experimental spectrum, these effects have been neglected in the theoretical calculation. The emergence of the new absorption band at 365 nm observed in complex solution with deprotonable groups may



be due to structural changes of the –COOH group. That is, one of the O atoms can be protonated and the other can be bonded to the 4-keto group (Figure 8) [10].

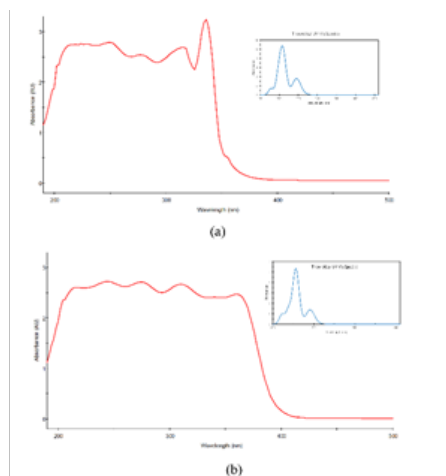


Figure 8. Experimental and theoretical UV-Vis spectra of (a) ciprofloxacin and (b) MDPSC

### 3.5. Thermal Analysis

The thermal analysis curve of [HCip.H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O] complex is given in Figure 9. At a temperature range of 20-90 °C, a mole water molecule in the complex is disintegrated endothermically. At this stage, a mass reduction of 4.06% occurs (DTG<sub>max</sub>: 45 °C; calcd: 4.02%). The resulting complex loses 45% of the mass at a temperature range of 250-888 °C, which is attributed to a part of the ciprofloxacin cation. In the last step, an endothermic decomposition (DTG<sub>max</sub>: 970 °C) occurs at a temperature range of 888-1000°C. It seems that the decomposition continues up to higher temperatures than this temperature.

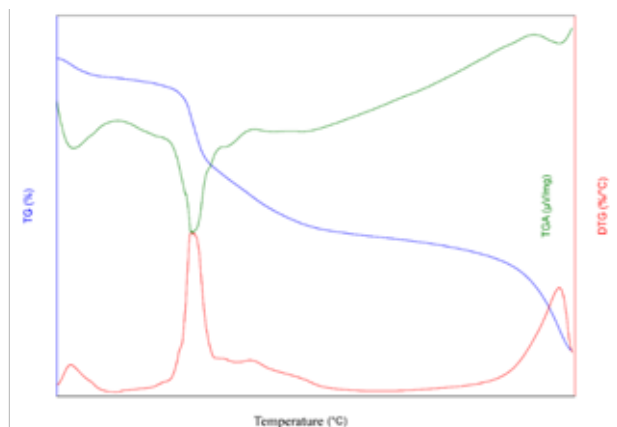


Figure 9. The thermogravimetric curves of complex

### 3.6. Biological Activity

Ciprofloxacin is an antibiotic that is used to treat bacterial infections. It stops the multiplication of bacteria by

inhibiting the reproduction and repair of their genetic material (DNA). Ciprofloxacin bind to the A subunit of DNA gyrase, which maintains the ordered structure of the chromosome 22 inside the cells [20, 21]. In the current study, minimal inhibitory concentration (MIC) of the ciprofloxacin and its complex were established for a lot of microorganisms and the results were shown in Table 6.

Table 6. MIC values of ciprofloxacin and complex

Compounds	Microorganisms					
	<i>S. aureus</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. albicans</i>	<i>A. flavus</i>
Ciprofloxacin	>512	1	1	1	8	128
Complex	>512	1	1	128	64	>512

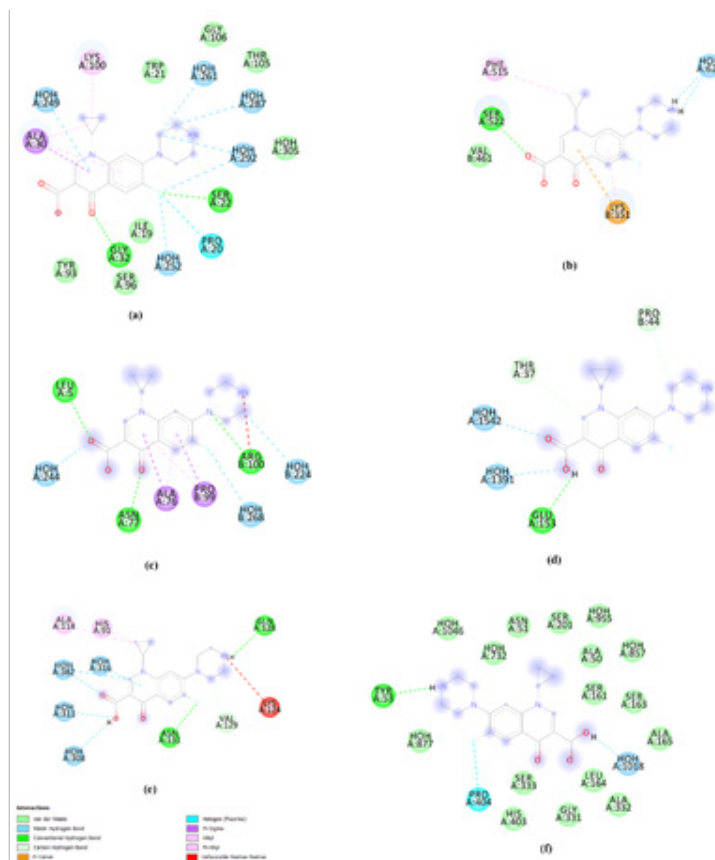
The MIC values of the complex against all tested microorganisms differed. Especially, it was determined that the complex had a significant antimicrobial activities with MIC value of 1 µg mL<sup>-1</sup> against *P. aeruginosa* ATCC 27853 and *Bacillus subtilis* NRRL-B 209 strains. However, it was observed that the antimicrobial activities of the sole ligand against same pathogenic microorganisms. Another important MIC value was 64 µg mL<sup>-1</sup> and against *Candida albicans* ATCC 10131. But, MIC value of the ligand was 8 times higher than the complex. Among other pathogenic bacteria strains, the antimicrobial activity shown against *Escherichia coli* ATCC was determined as weaker (128 µg mL<sup>-1</sup>) than that of ligand. In the study conducted by Tan, Tan [22], it was investigated antimicrobial activity of ciprofloxacin complexes with the Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Zr<sup>2+</sup> metal ions against same strain of *P. aeruginosa*, and determined that MIC values changed in the range of 32 and >128 µg mL<sup>-1</sup>. Therefore, this shown that ciprofloxacin complex with H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> was more effective than ciprofloxacin complexes with metal ions.

### 3.7. Docking Study

Molecular docking is an efficient application in order to obtain an idea about receptor-ligand interactions, geometries, inhibition constants, and binding affinities. It is process that strive to find the best relation between a protein and a ligand. When ligands bind to the protein, the interaction energies arise and the order of these energies is 5J9B=5BMM=1ZUV>4YNU>5HTG=4F0V according to proteins ID (Table 7). Binding energy and inhibition constant are as shown in Table 8. Inhibition constant (K<sub>i</sub>) is a measure of binding affinity between the complex and the protein. It is calculated by  $\Delta G_b = RT \cdot \ln K_i$ . K<sub>i</sub> is important to predict how much a ligand can inhibit a protein and interact with a substrate. The smaller the K<sub>i</sub> value, the less the patient need the drug to inhibit the enzyme activity. According

to molecular docking results, it is seen that complex without  $H_3PO_4$  interact better with *S. aerous*, *E. coli* and *B. Subtilis*

than the other bacteria. The docked complexes are presented in Figure 10.



**Figure 10.** 2D diagram of ligand-protein interactions, docking complex with (a) 5J9B (b) 5BMM (c) 5HTG (d) 1ZUV (e) 4F0V (f) 4YNU

**Table 7.** Docking energies for complex-protein receptor

Protein ID	Free Energy of Binding $\Delta G_B \Delta G_B$ (kcal mol <sup>-1</sup> )	Inhibition Constant, $K_i$ ( $\mu$ M)
5J9B	-7.2	5.646
5BMM	-7.2	5.646
5HTG	-6.0	42.310
1ZUV	-7.2	5.646
4F0V	-6.0	42.310
4YNU	-6.7	13.037

#### IV. CONCLUSION

In the current study, Monohydrus Dihydrogen Phosphate Salt of Ciprofloxacin [ $HCip.H_2PO_4.H_2O$ ] was mainly investigated structural characterization and spectroscopic properties. The minimum energy of structure is calculated and geometric parameters were investigated. It is observed that optimized structure is corresponded to the experimental structure which by 0.145 rmsd value. In the complex, due to transferring a hydrogen atom from phosphoric acid to the nitrogen atom in the piperazine ring, the changes in the bond

lengths of the piperazine ring and carboxylic acid group are observed. This transfer is supported by appearance of  $NH_2$  band instead of  $NH$  band in the IR spectrum. By the hydrogen bond interaction,  $R_4^4(12)$  ring motifs are observed and 3D supramolecular structure is formed by these rings. Generally, the ciprofloxacin was showed higher antimicrobial activity than the complex. When antibacterial and molecular modelling results are compared, molecular docking studies are in rapport with antibacterial assay.

## Acknowledgment

Financially, Ondokuz Mayıs University has supported this study (Project No: PYO.FEN.1904.15.022).

## REFERENCES

- [1] Sayin, K., Karakaş, D., Kariper, S.E., & Sayin, T.A. (2018). Computational study of some fluoroquinolones: Structural, spectral and docking investigations. *Journal of Molecular Structure*, 1156, 172-181.
- [2] Lou, B., Boström, D., & Velaga, S.P. (2007). Monohydrated dihydrogen phosphate salts of norfloxacin and ciprofloxacin. *Acta Crystallographica Section C: Crystal Structure Communications*, 63(12), o731-o733.
- [3] Blokhina, S., Sharapova, A., Ol'khovich, M., & Perlovich, G. (2017). Sublimation thermodynamics of four fluoroquinolone antimicrobial compounds. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 105, 37-43.
- [4] Sheldrick, G.M. (2008). A short history of SHELX. *Acta crystallographica. Section A, Foundations and Advances*, 64(1), 112-122.
- [5] Farrugia, L.J. (2012). WinGX and ORTEP for Windows: an update. *Journal of Applied Crystallography*, 45(4), 849-854.
- [6] Macrae, C.F., Edgington, P.R., McCabe, P., Pidcock, E., Shields, G.P., Taylor, R., Towler, M., & Streek, J.V.D. (2006). Mercury: visualization and analysis of crystal structures. *Journal of Applied Crystallography*, 39(3), 453-457.
- [7] Institute, C.a.L.S., *Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically; approved standard*. 2006: Wayne, PA: CLSI.
- [8] Institute, C.a.L.S., *Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts; approved standard*. 2002: Wayne, PA: CLSI.
- [9] Frisch, M., Trucks, G., Schlegel, H.B., Scuseria, G., Robb, M., Cheeseman, J., Scalmani, G., Barone, V., Mennucci, B., & Petersson, G. (2009). Gaussian 09, revision a. 02, gaussian. Inc., Wallingford, CT, 200.
- [10] Polishchuk, A.V., Karaseva, E.T., Emelina, T.B., Cramariuc, O., & Karasev, V.E. (2011). Polymorphism and intramolecular proton transfer in fluoroquinolone compounds. *Journal of Fluorescence*, 21(6), 2117-22.
- [11] Krygowski, T.M. (1993). Crystallographic studies of inter- and intramolecular interactions reflected in aromatic character of  $\pi$ -electron systems. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 33(1), 70-78.
- [12] Gece, G. (2008). The use of quantum chemical methods in corrosion inhibitor studies. *Corrosion Science*, 50(11), 2981-2992.
- [13] Sahoo, S., Chakraborti, C.K., & Behera, P.K. (2012). Spectroscopic investigations of a ciprofloxacin/hpvc mucoadhesive suspension. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 4(3), 1-8.
- [14] Sadeek, S.A. (2005). Synthesis, thermogravimetric analysis, infrared, electronic and mass spectra of Mn (II), Co (II) and Fe (III) norfloxacin complexes. *Journal of Molecular Structure*, 753(1-3), 1-12.
- [15] Sadeek, S.A., Refat, M.S., & Hashem, H.A. (2006). Complexation and thermogravimetric investigation on tin (II) and tin (IV) with norfloxacin as antibacterial agent. *Journal of Coordination Chemistry*, 59(7), 759-775.
- [16] Zordok, W.A. (2014). Interaction of vanadium (IV) solvates (L) with second-generation fluoroquinolone antibacterial drug ciprofloxacin: Spectroscopic, structure, thermal analyses, kinetics and biological evaluation (L= An, DMF, Py and Et3N). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 129, 519-536.
- [17] Acar, B., Yilmaz, I., Çalışkan, N., & Cukurovali, A. (2017). Experimental and theoretical studies of the molecular structure of 7-Methyl-3-[(3-methyl-3-mesityl-cyclobutyl)-5-phenyl-5H-thiazolo[3,2- $\alpha$ ]pyrimidine-6-carboxylic acid ethyl ester. *Journal of Molecular Structure*, 1139, 130-136.
- [18] O'Boyle, N.M., Tenderholt, A.L., & Langner, K.M. (2008). cclib: a library for package-independent computational chemistry algorithms. *Journal of Computational Chemistry*, 29(5), 839-45.
- [19] Neugebauer, U., Szeghalmi, A., Schmitt, M., Kiefer, W., Popp, J., & Holzgrabe, U. (2005). Vibrational spectroscopic characterization of fluoroquinolones. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 61(7), 1505-17.
- [20] Lambert, P. (2002). Mechanisms of antibiotic resistance in *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of the royal society of medicine*, 95(Suppl 41), 22.
- [21] Rapa, R.A., Islam, A., Monahan, L.G., Mutreja, A., Thomson, N., Charles, I.G., Stokes, H.W., & Labbate, M. (2015). A genomic island integrated into recA of *Vibrio cholerae* contains a divergent recA and provides multi-pathway protection from DNA damage. *Environmental microbiology*, 17(4), 1090-1102.
- [22] Tan, Z., Tan, F., Zhao, L., & Li, J. (2012). The synthesis, characterization and application of ciprofloxacin complexes and its coordination with copper, manganese and zirconium ions. *Journal of Crystallization Process and Technology*, 2(02), 55.

# The Fourier Transform of the First Derivative of the Generalized Logistic Growth Curve

## Genelleştirilmiş Lojistik Büyüme Eğrisinin Birinci Türevinin Fourier Dönüşümü

Ayşe Hümeyra BİLGE<sup>1</sup> , Yunus ÖZDEMİR<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Kadir Has University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, İstanbul, Turkey

<sup>2</sup>Eskişehir Technical University, Department of Mathematics, Eskişehir, Turkey

### Abstract

The “generalized logistic growth curve” or the “5-point sigmoid” is a typical example for sigmoidal curves without symmetry and it is commonly used for non-linear regression. The “critical point” of a sigmoidal curve is defined as the limit, if it exists, of the points where its derivatives reach their absolute extreme values. The existence and the location of the critical point of a sigmoidal curve is expressed in terms of its Fourier transform. In this work, we obtain the Fourier transform of the first derivative of the generalized logistic growth curve in terms of Gamma functions and we discuss special cases.

**Keywords:** Logistic growth, Fourier transform, Sigmoidal curve

### Öz

Genelleştirilmiş lojistik büyüme eğrisi simetrisi olmayan sigmoid eğrileri için tipik bir örnektir ve genellikle lineer olmayan regresyon için kullanılır. Bir sigmoid eğrisinin “kritik noktası” kısaca, türevlerinin mutlak ekstremum noktalarının (eğer varsa) limiti olarak tanımlanır. Bir sigmoid eğrisinin kritik noktasının varlığı ve konumu Fourier dönüşümü ile ifade edilebilir. Bu çalışmada, genelleştirilmiş lojistik büyüme eğrisinin birinci türevinin Gama fonksiyonları cinsinden Fourier dönüşümü elde edilmiş ve bazı özel durumlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lojistik büyüme, Fourier dönüşümü, Sigmoid eğrisi

## I. INTRODUCTION

Sigmoidal curves are monotone increasing functions  $y(t)$  with horizontal asymptotes as  $t \rightarrow \pm\infty$ , providing mathematical models for transitions between two stable states. In previous work, in a study of (irreversible) chemical gelation phenomena, the transition from liquid state to gel state was described in terms of the “Susceptible-Infected-Removed” (SIR) epidemic model [3]. Later on, in a numerical study for the search for the exact instant of gelation [4], we observed that the points where the higher derivatives of the sigmoidal curve that represents the phase transition reach their extreme values, tend to accumulate at a certain point [5]. This limit point, if it exists, was defined as the “critical point” of the sigmoidal curve. A similar behaviour was observed for the formation of (reversible) physical gels, which was shown to obey a modified form of the “Susceptible-Infected-Susceptible” (SIS) model whose solutions are generalized logistic growth curves [7]. In [6] we expressed sufficient conditions for the existence of a critical point of a sigmoidal curve in terms of the Fourier transform of the first derivative. For the sigmoidal curves that arise as solutions of the SIR model, we could only give numerical evidence for the existence of the critical point. But for the solutions of the SIS model expressed in terms of generalized logistic growth functions, we could express the location of the critical point in terms of the parameters of the generalized logistic growth curve [7] where we used without proof the expression of the Fourier transform of its first derivative.

The standard logistic growth curve is a typical example for a sigmoidal curve with an even first derivative and well known Fourier transform properties. The generalized logistic family provides good examples for sigmoidal curves with no symmetry but the explicit expression of their Fourier transform is not available in the literature. The purpose of this note is to give a detailed derivation of the Fourier transform of the first derivative of the generalized logistic family. The integrals involved

in the computation of this Fourier transform can be evaluated by certain computer algebra softwares, but we believe that an explicit derivation should be found in the mathematical literature.

The standard logistic growth curve is a sigmoidal curve which is the solution of the differential equation  $y'=1-y^2, y(0)=0$ . This equation can be solved as

$$y(t) = \tanh(t) \tag{1}$$

and its first derivative  $y'(t)=\text{sech}^2(t)$  is the well known 1-soliton solution of the Korteweg-deVries (KdV) equation. The generalized logistic growth curve with horizontal asymptotes at -1 and 1 is a sigmoidal curve given by

$$y(t) = -1 + \frac{2}{[1 + ke^{-\beta t}]^{\frac{1}{\nu}}} \tag{2}$$

where  $k > 0, \beta > 0$  and  $\nu > 0$ . The sigmoidal curve (2) reduces to (1) for  $\nu = 1, k = 1, \beta = 2$ .

The Fourier transform of a function  $f, F(\omega)$ , is defined as

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

for all  $\omega \in \mathbb{R}$  provided that the integral exists in the sense of Cauchy principal value [9]. If  $f$  is in  $L^1$ , then its Fourier transform exists. Since the sigmoidal functions (in particular the standard and generalized logistic growths) are finite as  $t \rightarrow \infty$ , their first derivatives are in  $L^1$  and thus their Fourier transform exists.

The Fourier transform of the first derivative of the standard logistic growth solution

$$f(t)=y'(t)=\text{sech}^2(t)$$

is obtained easily by using the integral formula

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{\cosh^2(t)} dt = \frac{\pi\omega}{\sinh\left(\frac{\pi\omega}{2}\right)}$$

as

$$F(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{(\pi\omega/2)}{\sinh(\pi\omega/2)}. \tag{3}$$

The first derivative of the generalized logistic growth is a localized pulse but it is not symmetrical and the computation of its Fourier transform is more complicated. In Section II, we obtain this Fourier transform explicitly in terms of Gamma functions (see Equation (7)), pointing out certain interesting relations among these and the hypergeometric functions.

We recall that the hypergeometric function  ${}_2F_1$  is defined by the Gauss series as

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(a)_n (b)_n z^n}{(c)_n n!}$$

on the disk  $|z| < 1$  (and by analytic continuation elsewhere) where  $a, b, c \in \mathbb{C}, c \notin \mathbb{Z}^- \cup \{0\}$  and the symbol  $(x)_n$  (also known as Pochhammer symbol) is defined by  $(x)_0 = 1$  and  $(x)_n = x(x+1)\dots(x+n-1)$  for  $1 \leq n \in \mathbb{N}$  (see [10] and [2] for more details).

## 2. THE FOURIER TRANSFORM OF THE FIRST DERIVATIVE OF THE SIGMOIDAL CURVE

The first derivative of the sigmoidal curve (2) is

$$y'(t) = f(t) = \frac{2k\beta}{\nu} [1 + ke^{-\beta t}]^{-\frac{1}{\nu}-1} e^{-\beta t}.$$

Its Fourier transform is defined by the integral

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2k\beta}{\nu} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} e^{-\beta t} [1 + ke^{-\beta t}]^{-\frac{1}{\nu}-1} dt. \tag{4}$$

The definite integral

$$I(\omega) := \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} e^{-\beta t} [1 + ke^{-\beta t}]^{-\frac{1}{\nu}-1} dt$$

can be expressed as

$$I(\omega) = \frac{1}{\beta} \int_0^{\infty} u^{\frac{i\omega}{\beta}} [1 + ku]^{-\frac{1}{\nu}-1} du$$

by setting  $u = e^{-\beta t}$ .  $I(\omega)$  can be evaluated in terms of the hypergeometric functions using the integral equality

$$\int_0^{\infty} x^{\lambda-1} (1+x)^{\eta} (1+\alpha x)^{\mu} dx = B(\lambda, -\eta - \mu - \lambda) \times {}_2F_1(-\mu, \lambda; -\mu - \eta; 1 - \alpha) \tag{5}$$

which holds for  $|\arg(\alpha)| < \pi, -\text{Re}(\mu + \eta) > \text{Re}(\lambda) > 0$  (see [8, p.317]).

Putting  $x = u, \lambda = 1 + \frac{i\omega}{\beta}, \alpha = k, \mu = -\frac{1}{\nu} - 1$  and  $\eta = 0$  in (5) we obtain

$$I(\omega) = \frac{1}{\beta} B\left(1 + \frac{i\omega}{\beta}, \frac{1}{\nu} - \frac{i\omega}{\beta}\right) \times {}_2F_1\left(\frac{1}{\nu} + 1, 1 + \frac{i\omega}{\beta}; \frac{1}{\nu} + 1; 1 - k\right),$$

where  $B$  is the well-known Beta function. It is known that

$$B(x, y) = \frac{\Gamma(x) \Gamma(y)}{\Gamma(x + y)}$$

provided  $\text{Re}(x) > 0$  and  $\text{Re}(y) > 0$ , and

$${}_2F_1\left(\frac{1}{\nu} + 1, 1 + \frac{i\omega}{\beta}; \frac{1}{\nu} + 1; 1 - k\right) = k^{-1 - \frac{i\omega}{\beta}}$$

since

$${}_2F_1(b, a; b; z) = {}_2F_1(a, b; b; z) = (1 - z)^{-b}$$

(see [1, p.556]).

Thus we have

$$I(\omega) = \frac{1}{\beta} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{i\omega}{\beta}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\nu} - \frac{i\omega}{\beta}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\nu}\right)} k^{-1 - \frac{i\omega}{\beta}}. \tag{6}$$

Substituting (6) in (4) we get

$$\begin{aligned} F(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2k\beta}{\nu} I(\omega) \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{k^{-\frac{i\omega}{\beta}}}{\nu} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{i\omega}{\beta}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\nu} - \frac{i\omega}{\beta}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\nu}\right)} \end{aligned}$$

and using the equality

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\nu}\right) = \frac{1}{\nu} \Gamma\left(\frac{1}{\nu}\right)$$

we can express the Fourier transform of the first derivative of the generalized logistic curve as

$$F(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} k^{-\frac{i\omega}{\beta}} \frac{\Gamma\left(1 + \frac{i\omega}{\beta}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\nu} - \frac{i\omega}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\nu}\right)}. \tag{7}$$

### 3. SPECIAL CASES

We rewrite the Fourier transform pair for the first derivative as, displaying the dependence on the parameters  $k$  and  $\nu$  as

$$\begin{aligned} f(t, k, \nu) &= \frac{2k\beta}{\nu} [1 + ke^{-\beta t}]^{\frac{1}{\nu} - 1} e^{-\beta t}, \\ F(\omega, k, \nu) &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{1}{\nu}\right)} e^{-i\left(\frac{\ln k}{\beta}\right)\omega} \Gamma\left(1 + \frac{i\omega}{\beta}\right) \Gamma\left(\frac{1}{\nu} - \frac{i\omega}{\beta}\right). \end{aligned} \tag{8}$$

Substituting  $\nu=1, k=1, \beta=2$  in (7) and using the property

$$\Gamma(x) \Gamma(1 - x) = \frac{\pi}{\sin(\pi x)}$$

together with  $\sin(ix) = i \sinh(x)$ , we get the Fourier transform of the standard logistic growth function as given in (3).

Differentiating  $f(t, k, \nu)$  with respect to  $t$  and setting it equal to zero we obtain the location of the maximum of  $f(t, k, \nu)$ , that we denote by  $tm(k, \nu)$  as

$$t_m(k, \nu) = \frac{\ln(k/\nu)}{\beta}.$$

We recall that a shift of the origin in the time domain by an amount  $\alpha$  corresponds to the multiplication of the Fourier transform by a factor  $e^{-i\alpha\omega}$ , i.e, if  $F(\omega)$  is the Fourier transform of  $f(t)$ , then  $e^{-i\alpha\omega} F(\omega)$  is the Fourier transform of  $f(t - \alpha)$ . Thus the parameter  $k$  has the effect of shifting the origin of the time axis. For  $k=1$ , and  $\nu = 1$ , the peak of the first derivative of the standard logistic growth is located at  $t=0$ . For  $k=1$ , and  $\nu > 1$ , the peak shifts left while for  $\nu < 1$  it shifts right.

If  $\nu = \frac{1}{n}$ , where  $n$  is a positive integer greater than 1, we use the property

$$\Gamma(1+x) = x \Gamma(x)$$

to express  $F\left(\omega, 1, \frac{1}{n}\right)$  in terms of  $F(\omega, 1, 1)$  as

$$F(\omega, 1, 1/n) = \frac{1}{\Gamma(n)} \left(1 - \frac{i\omega}{\beta}\right) \left(2 - \frac{i\omega}{\beta}\right) \dots \left(n - 1 - \frac{i\omega}{\beta}\right) F(\omega, 1, 1).$$

This expression is a polynomial multiple of the standard logistic growth. Since the Fourier transform of the  $n$ th derivative of  $f(t)$  is  $(i\omega)^n F(\omega)$ , it follows that  $f(t, 1, 1/n)$  is a polynomial in the derivatives of  $f(t)$ .

For arbitrary values of  $\nu$ , the (complex) Gamma function with complex arguments can be computed numerically. In our case, as we are interested in the Fourier transform  $F(\omega)$  for fixed values of the parameters, we need to obtain the graphs of the real and imaginary parts of  $F(\omega, 1, \nu)$  on vertical lines in the complex plane. It is known that the Gamma functions falls off faster than any polynomial in the imaginary direction, it follows that the Fourier transform of all higher derivatives are rapidly decreasing functions. For the cases  $\nu = \frac{1}{n}$  and  $\nu=n$ , we present the plot of the first derivatives of the generalized logistic growth in Figure 1 and the plot of the magnitudes of the Fourier transform of the first derivatives in Figure 2 for the values of  $n=1, 4, 8, 12$  (with  $k=1, \beta=2$ ). By continuity of the Gamma function with respect to real part of its argument, the parametric plot of the complex Fourier transform for  $n < \frac{1}{\nu} < n + 1$  fill the region between the curves corresponding to the integer values of  $\frac{1}{\nu}$ , as shown in Figure 3.

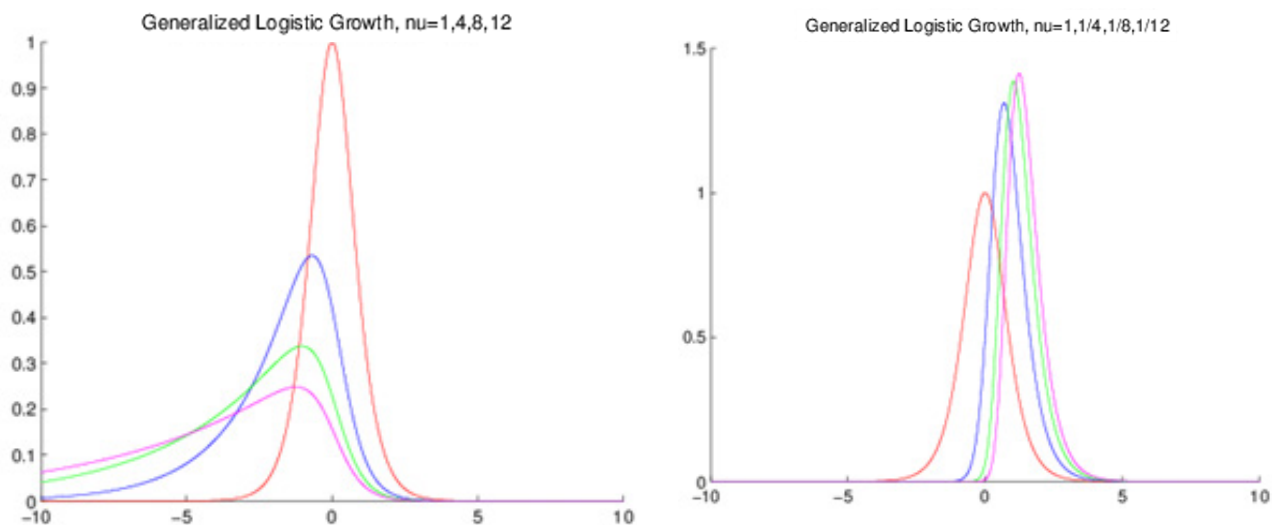


Figure 1: Time domain plots of the first derivative of the generalized logistic growth: a) for  $\frac{1}{\nu} = 1, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{12}$  (left), b) for  $\frac{1}{\nu} = 1, 4, 8, 12$  (right)

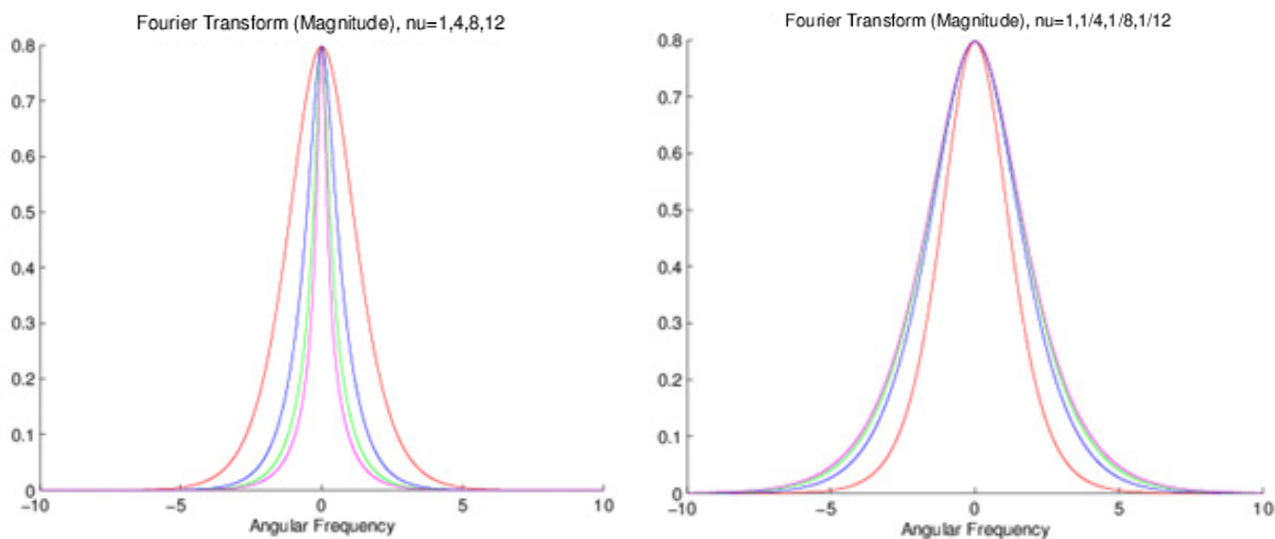
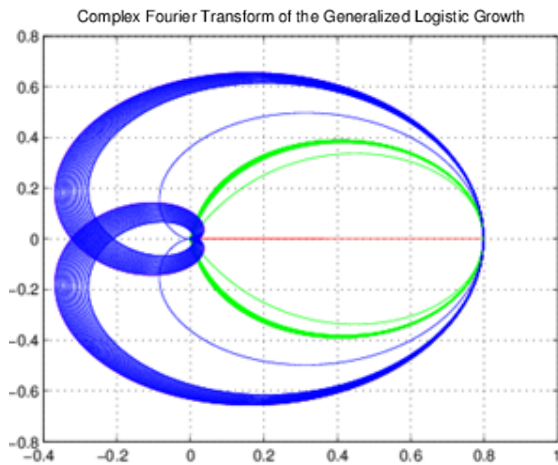


Figure 2: The magnitude of the Fourier transform: a) for  $\frac{1}{\nu} = 1, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{12}$  (left), b) for  $\frac{1}{\nu} = 1, 4, 8, 12$  (right)



**Figure 3:** Parametric plot of the complex Fourier transform of the first derivative of the generalized logistic growth (from inside to out) for  $\nu=1$ ,  $\nu=4$ ,  $\nu$  from 8 to 12,  $\nu = \frac{1}{4}$  and  $\nu$  from  $\frac{1}{8}$  to  $\frac{1}{12}$  respectively

## REFERENCES

- [1] Abramowitz, M., Stegun, I. A., (1972). Handbook of Mathematical Functions, Dover, New York, USA.
- [2] Beukers, F., (2007). Gauss' Hypergeometric Function. *Progress in Mathematics*. 260, 23–42.
- [3] Bilge, A.H., Pekcan, O., Gurol, M.V., (2012). Application of epidemic models to phase transitions. *Phase Transitions*. 85(11), 1009–1017.
- [4] Bilge, A.H., Pekcan, O., (2013). A Mathematical Description of the Critical Point in Phase Transitions. *Int. J. Mod. Phys. C*. 24.
- [5] Bilge, A.H., Pekcan, O., (2015). A mathematical characterization of the gel point in sol-gel transition, Edited by: Vagenas, EC; Vlachos, DS; Bastos, C; et al., 3rd International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2014) August 28-31, 2014, Madrid, SPAIN, *Journal of Physics Conference Series*. 574.
- [6] Bilge, A.H., Ozdemir, Y., (2016). Determining the Critical Point of a Sigmoidal Curve via its Fourier Transform, Edited by Vagenas, E.C. and Vlachos, D.S., 5th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSQUARE 2016) May 23-26, 2016, Athens, GREECE, *Journal of Physics Conference Series*. 738.
- [7] Bilge, A.H., Pekcan, O., Kara, S., Ogrenci, S., (2017). Epidemic models for phase transitions: Application to a physical gel, 4th Polish-Lithuanian-Ukrainian Meeting on Ferroelectrics Physics Location: Palanga, LITHUANIA, 05-09 September 2016, *Phase Transitions*. 90(9), 905–913.
- [8] Gradshteyn, I.S., Ryzhik I.M., (2007). Table of Integrals, Series, and Products. A. Jeffrey, D. Zwillinger (ed.), Elsevier Inc., USA.
- [9] Papoulis, A., (1962). The Fourier Integral and its Applications. McGraw-Hill Co., New York, USA.
- [10] Pearson J., (2009). Computation of Hypergeometric Functions. *MSc Thesis, Oxford University, UK*.



# Konut Fiyatını Belirleyen Regresyon Denklemi: Maltepe İlçesi Örneği

## Regression Equation Determining House Price: Case Study in Maltepe

Uğur KARTAL<sup>1</sup> , Adnan CORUM<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ümraniye Belediyesi, Yapı Kontrol Müdürlüğü

<sup>2</sup> Bahçeşehir Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

### Öz

Gayrimenkul değerlemesi yapılırken, konumsal ve fiziksel birtakım faktörlerin varlığı göz önünde bulundurulmaktadır. Özellikle konut fiyatlarını etkilediği düşünülen etmenlerin birçok çeşitliliğe sahip olması, konutun heterojen özelliğe sahip bir mal olduğunu göstermektedir. Ulaşım altyapı yatırımlarının, gayrimenkul değerine artı bir değer katacağı düşünülür. Buradan hareketle Kadıköy-Pendik metrosunun çoklu doğrusal regresyon analizi ile Maltepe ilçesi konut fiyatlarına olan etkisi incelenmiştir. Çıkan sonuçta ulaşım altyapı yatırımlarının ve buna bağlı olarak ulaşım hizmetine olan uzaklığın, seçilen bölgeler için konut fiyatları üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte konut fiyatlarına, metro istasyonlarına olan uzaklıklarından daha etkili başka faktörlerin varlığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çoklu Regresyon Analizi, Gayrimenkul, Raylı Taşıma Sistemi

### Abstract

While real estate appraisal is performed, the presence of a number of positional and physical factors is taken into consideration. The fact that the factors that affect the housing prices have a wide variety shows that the property is a heterogeneous property. Transportation infrastructure investments are considered to add an added value to the value of real estate. Thus, the effect of Kadıköy-Pendik subway on the house prices of Maltepe district was investigated by multiple linear regression analysis. As a result, it has been determined that transportation infrastructure investments and the distance to transportation services have an impact on housing prices for selected regions. However, other factors have been found to be more effective on housing prices than their distance to metro stations.

**Keywords:** Multi Regression Analysis, Real Estate Property, Rail Transport System

## I. GİRİŞ

Ulaşım, bir gayrimenkulün kullanım amacını belirlemede önemli bir etmendir ve kendi içinde her ulaşım türü, kentsel mekânı da biçimlendirmede farklı etkiler oluşturur. Ulaşımın gayrimenkuller üzerindeki dinamik değişme potansiyeli etkisi kent bölgesinde hemen kendini gösterir. Bu etki yeni kent merkezlerinin oluşumuna ya da kent merkezlerinin kaymasına neden olabilir.

Kentsel gelişmeler ve değişimler ulaşım sistemlerini şekillendirmektedir. Ulaşım sistemlerinin özellikleri de kentsel gelişmeleri ve değişimleri şekillendirmektedir. Bu durumda kent ve ulaşım sistemleri arasında karşılıklı bir etkileşim bulunmaktadır. Gelişim düzeyi ve yaşam standartları yüksek olan dünya kentleri incelendiğinde, kent içi ulaşım sistemi ile kent planlanmasının bir bütün olarak ele alınması gerekliliğine 1950’li yıllarda farkına varılmış, toplu taşıma sistemleri bu planlama doğrultusunda değerlendirilmiştir. Sanayinin özellikle büyükşehirlerde gelişmesi, 1960’lı yıllarda kırsaldan şehirlere büyük göç dalgaları meydana getirmiştir. Hem yeni yerleşim alanlarının doğması hem de artan nüfus, düşük kapasiteli ve sınırlı toplu taşımacılığın yerine, yeni ulaşım altyapı sistemlerinin kurulup, geliştirilmesini gerekli kılmıştır.

Kentin gelecekteki ulaşım sisteminin insanların ekonomik, hızlı, konforlu ve güvenli bir şekilde ulaşımına öncelik verilerek planlanması gerekmektedir. Bu amaçla kent içi ulaşımın temel ögesi olan toplu taşımanın hız, yolculuk süresi, konfor, güvenilirlik, güven ve maliyet unsurlarından oluşan hizmet düzeyini yükseltmek ve bulunabilirliğini artırmak raylı sistem yatırımları ile mümkündür. Kalıcı altyapıya sahip bu yüksek kapasiteli toplu taşıma sistemleri İstanbul gibi metropollerde güncel problem olan trafik sorununa iyi bir çözümdür. Raylı sistemlerin tercih edilme nedenleri arasında beklentileri karşılayabilmesi, çevreye duyarlı olması, ekonomik olması, yolculuk sürelerini azaltması, trafik sıkışıklığını ortadan kaldırması ve diğer ulaşım türlerine göre daha konforlu olması sayılabilir.

Şehir içi taşımada kullanılan araçların yolcu taşıma kapasiteleri incelendiğinde en büyük paya sahip hatların, raylı sistemlere entegre bir şekilde çalışan araçlar olduğu görülmektedir. Bir gayrimenkulün değerini etkileyen konumsal faktörlerden ulaşım en çok metro, tramvay gibi raylı sistemlerden etkilenmektedir.

Ülkemizde, büyük şehirlerde oluşan yoğunluk ve nüfus artışı, trafik sorununu getirmektedir ve bunun sonucu olarak kent içi raylı sistem yatırımları hızla artmaktadır. Başta İstanbul olmak üzere birçok şehirde raylı sistem projeleri hayata geçirilmiş veya devam etmektedir. Ülkemizde raylı sistem yatırımlarının, gelişmiş ülkelere nazaran yeni yatırımlar olması nedeniyle, arazinin kullanım amacı, bölgesel yoğunluk ve değerlendirme, nüfus gibi uzun döneme yayılacak değişimlerin ölçülmesi, gelecekte yapılacak çalışmalar açısından önemli bir referans olacaktır.

Konut fiyatını etkileyen en önemli etken kent merkezine olan mesafe ve ulaşım seçenekleridir. Transit istasyona yakın konumlanmış gayrimenkul birim değerinin, artan erişebilirlik düzeyinden dolayı yüksek olması beklenmektedir. Bu sebeple ulaşım alt yapısındaki yatırımlar ile gayrimenkul değeri arasında güçlü bir ilişki vardır. Ulaşım yatırımlarının en önemli amacı kentteki hareket ve erişebilirlik düzeyini artırmaktır. Böylece seyahat süresinde kazanılan zaman ve artan erişebilirlik, kentsel gelişimin ulaşım hatları ile paralellik göstermesini sağlar.

Ulaşım imkanlarına yakınlık, yapılan birçok araştırmada gayrimenkul ediniminde, ilk tercih olmuştur. GYODER'in 2013 yılında yapmış olduğu ankete göre özellikle İstanbul'un geçmişten bu yana süregelen trafik sorunundan dolayı, konut satın alırken alıcıların göz önünde bulundukları ilk kriter ulaşım kolaylığıdır. Yapılan ankete İstanbul'un farklı semtlerinde oturan 5000 kişi katılmış olup, katılımcılara konut alma aşamasında hangi kriterleri göz önünde bulundukları sorulmuştur. Çıkan anket sonucuna göre

ulaşım kolaylığı yaklaşık %38,7 oran ile ilk sırada yerini almıştır. Anket sonucu Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Konut alırken dikkat edilen hususlar (GYODER, 2013)

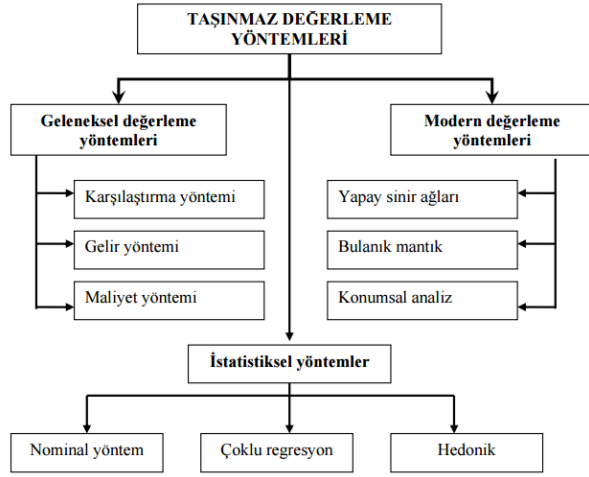
Sıra	Konut alırken dikkat edilen hususlar	İlk sırada verilen cevaplar	İlk sıra oranı (%)
1	Ulaşım kolaylığı	1943	38,7
2	Sosyal çevre	1141	22,8
3	Depreme dayanıklılık-sağlamlık	406	8,1
4	Bulunduğu yer-semt	330	6,6
5	Otopark	320	6,4
6	Fiyat	236	4,7
7	Yeşil alan	178	3,5
8	Sosyal imkanlar	150	3
9	Güvenlik	78	1,6
10	Yeni bina olması	52	1
11	Aidat	37	0,7
12	Diğer	144	2,9
<b>Toplam</b>		<b>5015</b>	<b>100</b>

En genel tanıma göre taşınmaz değerlendirme, taşınmaz malın belli bir tarihteki imar durumu, konumu, zemin ve inşaat yapısı, elde edilen gelir, ulaşım imkânı, alt yapı durumu, parselin şekli, boyutu, genişliği gibi değeri etkileyen bütün unsurların dikkate alınarak değerinin para cinsinden ifade edilmesidir.

Taşınmaz değerlendirme sürecinin sonunda ulaşılmaya çalışılan, değerlendirilen taşınmazın piyasa değerini etkileyen faktörlerin tümünü göz önüne alan ve her yönüyle desteklenen bir değere ulaşmaktır. Değerleme yöntemleri olarak tanımlanan bu yaklaşımlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Taşınmaz değerlendirme en çok kullanılan yöntemlerden birisi istatistiksel değerlendirme yöntemidir. Bu yöntemin esası, taşınmaz değeri ve taşınmaz kriterleri arasındaki sayısal ya da oransal bağıntılar ile matematiksel model oluşturmaktır. Bu yöntemde kullanılan analizler regresyon analizi, hedonik yaklaşım ve nominal yöntem olarak sıralanabilir (Yalçır, 2007).

Dünyada ve ülkemizde metroya olan uzaklığın konutların fiyatlarına etkisi ile ilgili yapılan çalışmaların birçoğu incelenerek, konutun fiziksel özelliklerinin yanında konumsal özelliklerinin de konut fiyatları üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu çalışmada veri setlerinden faydalandığı ve istatistiksel oranlar açıklanmak istendiği için çalışma yöntemi olarak istatistiksel yöntemlerden birisi olan regresyon analizi kullanılmıştır. Çalışmanın amacı Maltepe ilçesinde bulunan konutların fiziksel özelliklerinin yanı sıra Kadıköy-Pendik metrosuna olan uzaklıklarının, konut fiyatlarını

ne şekilde etkilediğini çoklu doğrusal regresyon analizi ile belirlemektir.



Şekil 1. Taşınmaz değerlendirme yöntemleri (Yalçır, 2007)

Regresyon analizi sonucunda Maltepe ilçesi iki bölgeye ayrılarak her iki bölge için ayrı ayrı genel bir denklem bulunarak Kadıköy-Pendik metrosunun konut fiyatları üzerindeki etkisi istatistiksel olarak belirlenmiştir. Bu denklem yardımıyla konutlar için yaklaşık bir fiyat belirlenebilecektir. Yapılan analizde kullanılan konut fiyatları, 2016 yılı verileri kullanılarak üretilmiştir. Konut fiyatlarını etkileyen faktörler konutun oda sayısı, büyüklüğü, bulunduğu kat gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra metroya olan uzaklığı ile birlikte incelenmiştir.

Çalışma bölgesinde örneklem olarak seçilmiş satışta olan 415 apartman dairesinin fiyatlarını etkileyen faktörler regresyon analizi ile araştırılmıştır. İki bölgeye ayrılmış Maltepe ilçesi için yapılan regresyon analizinden sonra, birinci bölge Fındıklı, Aydınevler, Zümrütevler, Gülsuyu, Gülensu, Esenkent ve Girne mahallelerini kapsamaktadır. İkinci bölge ise Altıntepe, Küçükyalı, Çınar, İdealtepe, Altayçeşme, Cevizli, Feyzullah, Yalı ve Bağlarbaşı mahallelerini kapsamaktadır. Birinci bölgede toplam 118 konut, ikinci bölgede toplam 297 konut için regresyon analizi yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de literatür taraması sunulmuştur. Bölüm 3’te konut fiyatlarını etkileyen fiziksel özelliklerin yanında konutların metroya olan uzaklıklarının fiyatları üzerindeki etkisi araştırılarak Maltepe ilçesi için bir regresyon denklemi bulunmuştur. Bölüm 4’te analiz edilen konutların özellikleri sunulmuştur. Bölüm 5’te yapılan çalışmanın sonuçları ile birlikte öneriler sunulmuştur.

## II. LİTERATÜR TARAMASI

Ulaşım alt yapı yatırımları ile ilgili projeler oluşturulurken göz önünde bulundurulması gereken hususlar ve hususların gayrimenkul piyasası üzerinde meydana getirdiği etki ile alakalı Türkiye’de yapılan çalışmaların sayısı azdır. Literatürde bazı yabancı uygulamalar da mevcuttur.

Damm ve diğ. (1980) Washington metrosunun kentsel gayrimenkul değerlerine etkisi olup olmayacağını araştırmışlardır. Veriler, sahibi tarafından oturlan tek kişilik müstakil evler, apartmanlar ve alışveriş kuruluşları olmak üzere 3 gruba ayrılmış ve 1969-1976 yılları arasından toplanmıştır. Analiz sonucunda her üç grup içinde metroya olan yakınlık arttıkça gayrimenkulün fiyatının azaldığını tespit etmişlerdir. Forrest ve diğ. (1996) çalışma bölgesi olarak İngiltere’nin kuzeyindeki Manchester şehrini seçmişlerdir. Çalışma, metronun açılmasından dört yıl sonra 1996 yılında yapılmıştır. Verileri, ülke çapında yapı kooperatifinden alarak 1990 yılında satılmış olan 795 tane mortgage verisi için analiz yapmışlardır. Verileri yapı özellikleri, komşuluk özellikleri ve yapının konumu olarak 3 bölüme ayırmışlardır. Yapı özellikleri olarak; kullanım süresi, yaşı, yatak odası sayısı, garajı olup olmadığı, konut tipi (teraslı, müstakil, apartman dairesi, bungalov) ve ısınma gibi karakteristikleri belirlemişlerdir. Komşuluk özelliklerini, nüfus ve alışveriş merkezi, okul gibi yapılara olan uzaklık olarak ikiye ayırmışlardır. Yapının konumunda ise, konutun istasyona olan uzaklığını Pisagor teoremiyle hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, istasyona yakın konutların fiyatlarının daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Cervero (2003) hafif raylı toplu taşıma ve banliyö demir yolu taşımasının arazi fiyatları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma bölgesi olarak ABD’nin 9. büyük şehri olan San Diego’yu seçmiştir. Hafif raylı toplu taşıma istasyonlarına olan yakınlığın oturmayaya elverişli arazilerin değerini doğrudan arttırdığı ve banliyö demir yolu istasyonlarına olan uzaklığın ise arazinin fiyatını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Debrezion ve diğ. (2004) demiryolu istasyonlarının ticari ve konutsal gayrimenkul değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma bölgesi olarak Batı ABD, Orta Amerika, Avrupa ve Doğu ABD’yi seçmişlerdir. İstasyonları, hizmet sıklığı, toplanma alanları, teknolojik üstünlük ve yolcu kapasiteleri gibi özelliklerinin aynı olmayacağı ve bunun da emlak değerini etkileyeceğini düşünerek dekolvi hattı (hafif demiryolu), metro (ağır demiryolu), banliyö tren ve metrobüs olarak dört bölüme ayırmışlardır. Elde ettikleri bulgularda, demiryolu istasyonlarına olan yakınlığın ticari gayrimenkul değerlerini konutsal gayrimenkul değerlerine göre daha çok arttırdığını ve banliyö trenlerin diğer istasyonlara göre daha yüksek bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yankaya ve Çelik (2005) İzmir metrosu örneğini incelemişlerdir. Konutun

farklı özelliklere sahip heterojen bir mal olduğunu ve bu heterojen malı oluşturan her bir karakteristiğın fiyatın belirlenmesinde etkili olacağını düşünerek bir fiyat modeli uygulamışlardır. Modellemenin neticesinde metroya yakın olan konut satış fiyatlarının artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Debrezion ve diğ. (2006) Hollanda’da demiryolu ulaşımının gayrimenkul değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Verileri 1985-2001 yılları arasındaki konut fiyatlarından almışlardır. Yaptıkları analizde, bağımlı değişkeni fiyat almış, bağımsız değişkenleri ise konutun fiziksel özellikleri (yaş, metrekare vb.), ulaşılabilirlik özellikleri (demiryolu istasyonuna olan uzaklığı, otoban giriş – çıkışına olan uzaklığı, en sık kullanılan demiryolu istasyonuna olan uzaklık vb.), çevresel özellikleri (nüfus vb.) olarak üç kısma ayırmışlardır. Elde ettikleri analiz sonuçlarına göre, istasyona yakın olan konutun uzak olana göre fiyatı ortalama %25 daha pahalıdır. İstasyona 1,5 km veya daha uzak mesafedeki konutların fiyatı, istasyon frekans sayısına göre %19 ve %33 arasında değişmektedir. Demiryolu istasyonlarına 250 m kadar yakınlıkta olan istasyonların fiyatı ise 500 m’den fazla uzaklıkta olan konutlara göre %5 daha düşüktür. Bunun nedeninin gürlü olabileceği belirtilmiştir.

Troncoso ve diğ. (2010), Barcelona’daki kentsel ve ulaşım projelerinin gayrimenkul değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma bölgesindeki 1262 konuttan 169’u seçilerek analiz yapılmıştır. Ulaştırma projelerinin seçimi için 2001-2010 yılları arasındaki ulaştırma altyapı master planı tarafından üretilen bilgileri kullanmışlardır. Elde ettikleri analiz sonuçlarına göre, ulaştırma projelerinin gayrimenkul değerleri üzerinde negatif etkisi olduğunu buna karşılık kentsel projelerin ise pozitif etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Boucq (2011) hafif demir yolu altyapısının konut fiyatları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma bölgesi olarak Paris’in batısındaki Hauts-de-Seine bölgesini seçmiştir. Yılları 1993-1995, 1996-2000 ve 2001-2004 olmak üzere üç gruba ayırmıştır. Hafif demir yolunun konut fiyatları üzerinde sabit bir etkisi olduğu ve konut fiyatlarını yaklaşık %9 oranında artırdığı gözlemlenmiştir.

Christopher ve diğ. (2012) çalışma bölgesi olarak Kanada’nın başkenti ve dördüncü büyük kenti olan Ottawa’ya seçmişlerdir. Yaklaşık 80.000 satılık konut bilgileri üzerinden 3735 tanesi analize sokulmuştur. Analizde bağımlı değişken olarak konutun fiyatı, bağımsız değişkenler olarak konutun oda sayısı, yatak odası sayısı, konutun metre karesi, konut tipi, bodrum kat sayısı, garaj sayısı, konutun yaşı, park yeri, konutun vergisi, en yakın su kaynağına olan uzaklığı, en yakın parka olan uzaklığı, nüfus sayısı, toplam kaç kişinin raylı sistemi kullandığı ve raylı sisteme olan yürüme mesafesi olarak belirlenmiştir. Elde ettikleri sonuçlara göre, komşuluk, konum ve raylı sistemlere olan uzaklıklarına göre

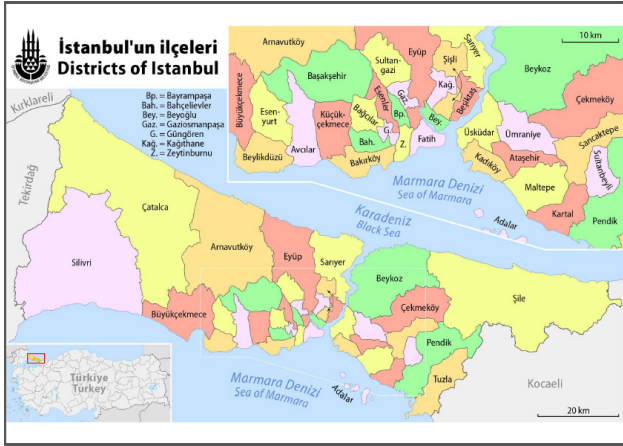
konut fiyatının olumlu yönde etkilenmediğini belirtmişlerdir. Bin (2012) metro istasyonlarının arazi fiyatları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma bölgesi olarak Çin’in Pekin şehrini seçmiştir. Verileri 2004 ve 2011 yılları arasında toplamıştır. Arazi kullanımını, konutsal özellikte olanlar, ticari özellikte olanlar ve diğerleri olmak üzere üç kısma ayırmıştır. Uzaklıkları ise alt merkeze ve istasyona olan uzaklık olarak iki kısma ayırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, endüstriyel araziler hariç tüm arazi kullanım türleri için en yakın metro istasyonuna olan uzaklığın fiyatları arttırdığını bulmuştur.

National Association of Realtors 2013 yılında açıkladığı raporda, toplu taşıma araçlarına olan uzaklığın konut fiyatları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışma bölgesi olarak ABD’nin Boston, Chicago, Minneapolis – St. Paul, Phoenix ve San Francisco kentleri seçilmiştir. Tüm bölgeler için 2006-2011 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. Toplu taşıma araçları, ağır demiryolu (metro), hafif demiryolu (dekoil hattı) ve metrobüs olmak üzere üç kısma ayrılmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, ulaşımın kolay sağlandığı bölgelerde, sağlanmayanlara göre konut fiyatlarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. İnanoğlu (2014) raylı taşıma sisteminin konut fiyatları üzerindeki değişimini incelemiş, raylı sistem hattının geçtiği güzergâh üzerinde bulunan altı mahalle belirlenerek, bu mahallelerin belirli bir dönem aralığı için konut endeks değerleri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, bazı dönemlerde, konut fiyatlarını ulaşımdan daha çok etkileyen diğer faktörlerin varlığı tespit edilmiştir.

Türkiye’de ve diğer ülkelerde yapılan araştırmalarda, raylı sistem alt yapı yatırımlarının, gayrimenkuller üzerinde olumlu etkilerinin olabileceği gözlemlendiği gibi negatif etkilerinin de olabileceği ortaya konmuştur. Bununla birlikte, kullanım amacına göre ofis, konut, ticari nitelikli yapılar gibi gayrimenkullerin, kendi alt kategorileri içerisinde zaman ve mekân şartları açısından farklı etkileşim gösterdikleri ve konumsal etkiden ziyade gürlü, daire büyüklüğü, yapı sınıfı gibi daha güçlü parametrelerin varlığı tespit edilmiştir.

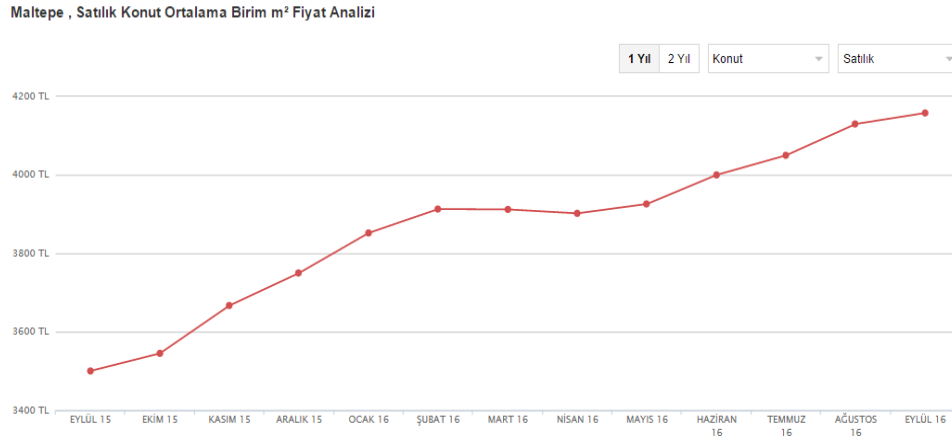
### III. REGRESYON MODELİ

1987’de Kartal ilçesinden ayrılıp müstakil ilçe olan Maltepe, İstanbul iline bağlı Marmara Denizi’ne kıyısı olan, Anadolu yakasında bir ilçedir. İstanbul ili sınırları dahilinde 5747 Sayılı Kanun kapsamında oluşturulan 39 ilçeye ait alan ve nüfus bilgilerine göre Maltepe’nin kara alanı 52,97 km<sup>2</sup> olup 18 mahalleden oluşmaktadır. İlçe nüfusu ise 471.059’dur (İBB, 2016). Şekil 2’de gösterildiği üzere Kadıköy, Kartal, Sancaktepe ve Ataşehir ilçeleriyle komşudur.



Şekil 2. Maltepe ilçe sınırları (İBB)

Kadıköy-Pendik Metrosu (M4) İstanbul'da Anadolu Yakası'nın ilk metro hattıdır. Metronun açılmasıyla beraber birçok semtte gayrimenkul fiyatlarında artış kaydedilmiştir.



Şekil 3: Maltepe ilçesi satılık konut ortalama birim m<sup>2</sup> fiyat analizi (hurriyetemlak.com, 2016)

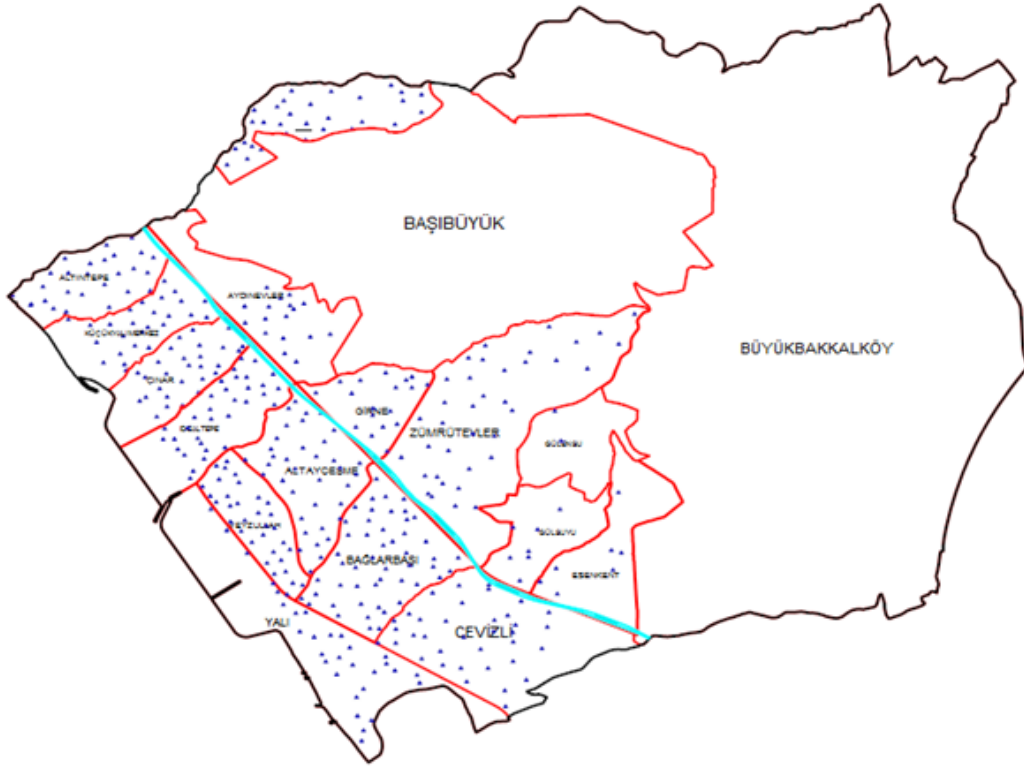
Çalışma bölgesi incelendiğinde, E5 aksının üst kısmında kalan mahallelerdeki konutlar ile E5 aksının alt kısmında (sahil bölgesi) kalan konut fiyatları arasında belirgin farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu sebepten Maltepe ilçesini bir bütün olarak incelemek yerine ikiye ayırmak daha uygundur. E5 aksının üst kısmındaki bölge birinci bölge olarak, E5 aksının alt kısmındaki bölge ise ikinci bölge olarak isimlendirilmiştir. Birinci bölgede 118 konut ve ikinci bölgede 297 konut olmak üzere toplamda 415 tane satılık konut için konumsal ve fiziksel altı adet parametre ile regresyon analizi yapılmıştır. Konutun yaşı, metrekaresi gibi fiziksel

Şekil 3'de Maltepe ilçesinin 2015 ve 2016 yılları arasında satılık konut ortalama m<sup>2</sup> birim fiyatı görülmektedir. Konutların fiyatlarına etki ettiği düşünülen parametreler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Konutun yaşı
- Konutun oda sayısı
- Konutun metrekaresi
- Binanın kat sayısı
- Binanın kaçınca katında olduğu
- En yakın metro istasyonuna olan uzaklığı

özellikleri, Hürriyet Emlak sitesinde verilen satılık ilanlarından temin edilmiştir. Konutun metroya olan uzaklığı ise kendisine en yakın metro istasyonuna olan kuşbakışı uzaklığıdır.

Kenan Evren Kışlası'nın Başbüyük Mahallesi sınırları içerisinde, Nurettin Baransel Kışlası'nın ise Büyükbakkalköy Mahalle sınırları içerisinde kalmasından dolayı bu mahallelerde konut satış ilanına rastlanmamıştır. Bu nedenle Başbüyük ve Büyükbakkalköy Mahalleleri uygulamaya dahil edilmemiştir. Uygulama alanı Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Uygulama alanı

Konut fiyatları arasında belirgin farklılıkların olduğu birinci ve ikinci bölgeler için Model 1 ve Model 2 olmak üzere iki farklı regresyon modeli oluşturulmuştur. Bunun nedeni, birbirinden net bir şekilde farklı olan iki bölge için oluşturulacak modelde bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni farklı katsayılarla etkileyeceğidir. İki model için de istatistiksel olarak anlamlı çıktığı sürece aynı bağımlı değişken ve bağımsız değişkenler kullanılmıştır. Regresyon modeli için kullanılan değişkenler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Değişkenler

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken
Konutun fiyatı (F)	Konutun yaşı (Y)
	Konutun metrekaresi (M)
	Konutun oda sayısı (O)
	Konutun kaçınıcı katta olduğu (K)
	Binanın kat sayısı (B)
	Konutun en yakın metro istasyonuna olan uzaklığı (U)

Model 1’de konut fiyatını etkileyen parametrelerin (Y, M, O, K, B ve U) konut fiyatıyla (F) olan ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 3. Model 1 katsayılar tablosu

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
<b>Kesişim</b>	11,15	2,49	4,48	≈0
<b>O</b>	0,01	0,08	0,09	0,93
<b>M</b>	0,47	0,10	4,81	≈0
<b>Y</b>	-0,06	0,04	-1,73	0,09
<b>B</b>	0,28	0,06	5,08	≈0
<b>K</b>	0,03	0,07	0,50	0,62
<b>U</b>	-0,12	0,02	-5,50	≈0

Tablo 4. Model 1 regresyon istatistikleri

<b>Çoklu R</b>	0,79
<b>R<sup>2</sup></b>	0,63
<b>Ayarlı R<sup>2</sup></b>	0,61
<b>Standart Hata</b>	6,07
<b>Gözlem</b>	118

**Tablo 5.** Model 1 ANOVA tablosu

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
<b>Regresyon</b>	6	6893,86	1148,98	31,20	≈0
<b>Fark</b>	111	4087,75	36,83		
<b>Toplam</b>	117	10981,60			

Tablo 3' de verilen P değerlerinden M, Y, B ve U %90 güvenilirlik düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. O ve K %90 güvenilirlik düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı çıkmadığından modelden çıkarılmış ve Model 1 revize edilerek Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8'de gösterilmiştir.

**Tablo 6.** Model 1<sub>revize</sub> katsayılar tablosu

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
<b>Kesişim</b>	11,17	2,20	5,07	≈0
<b>M</b>	0,49	0,04	11,09	≈0
<b>Y</b>	-0,06	0,03	-1,75	0,08
<b>B</b>	0,30	0,04	6,86	≈0
<b>U</b>	-0,12	0,02	-5,55	≈0

**Tablo 7.** Model 1<sub>revize</sub> regresyon istatistikleri

<b>Çoklu R</b>	0,79
<b>R<sup>2</sup></b>	0,63
<b>Ayarlı R<sup>2</sup></b>	0,61
<b>Standart Hata</b>	6,02
<b>Gözlem</b>	118

**Tablo 8.** Model 1<sub>revize</sub> ANOVA tablosu

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
<b>Regresyon</b>	4	6884,01	1721	47,46	≈0
<b>Fark</b>	113	4097,60	36,26		
<b>Toplam</b>	117	10981,61			

Model 1<sub>revize</sub> için elde edilen konut fiyatı denklemi aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Konut fiyatı (F)} = 11,17 + 0,49 \cdot M - 0,06 \cdot Y + 0,30 \cdot B - 0,12 \cdot U$$

Model 1<sub>revize</sub>'ye ilişkin elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:

- İncelenen örneğe ait  $R^2 = 0,63$  çıkmıştır. Kullanılan bağımsız değişkenlerin (M, Y, B ve U) konut fiyatındaki (F) toplam varyasyonu açıklayabilme oranı %63'dür. Kalan %37'lik kısım bilinmeyen faktörler nedeniyle oluşmuştur.
- $R^2$  değeri 0,5-0,7 aralığında çıktığı için F ile M, Y, B ve U arasında orta dereceli ilişki vardır.
- Ayarlı  $R^2 = 0,61$  çıkmıştır ve  $R^2$  ile neredeyse aynıdır. Bu durumda modeli oluşturmak için gözlem sayısının yeterli olduğu söylenebilir.
- $F = 47,46$  için P değeri 0,1'den çok küçük olduğu için model genel olarak yüksek derecede anlamlı çıkmıştır.
- F ile M ve B arasında pozitif korelasyon vardır. Yani konut büyüdükçe ve bulunduğu apartman yükseldikçe konutun fiyatı artmaktadır.
- F ile Y ve U arasında negatif korelasyon vardır. Yani konutun yaşı arttıkça ve metrodan uzaklaştıkça fiyatı azalmaktadır.

Model 2'de konut fiyatını etkileyen parametrelerin (Y, M, O, K, B ve U) konut fiyatıyla (F) olan ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11'de gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Model 2 katsayılar tablosu

	Katsayılar	Standart Hata	t Stat	P-değeri
<b>Kesişim</b>	1,80	2,46	0,73	0,46
<b>O</b>	0,15	0,08	1,84	0,07
<b>M</b>	0,60	0,09	7,05	≈0
<b>Y</b>	-0,15	0,02	-7,77	≈0
<b>B</b>	0,17	0,04	3,92	≈0
<b>K</b>	0,13	0,06	2,35	0,02
<b>U</b>	0,19	0,03	5,57	≈0

**Tablo 10.** Model 2 regresyon istatistikleri

<b>Çoklu R</b>	0,80
<b>R<sup>2</sup></b>	0,65
<b>Ayarlı R<sup>2</sup></b>	0,64
<b>Standart Hata</b>	8,22
<b>Gözlem</b>	297

**Tablo 11.** Model 2 ANOVA tablosu

	Df	SS	MS	F	Anlamlılık F
<b>Regresyon</b>	6	35640,09	5940,01	87,81	*0
<b>Fark</b>	290	19617,13	67,65		
<b>Toplam</b>	296	55257,21			

Tablo 9’da verilen P değerlerinden O, M, Y, B, K ve U %90 güvenirlilik düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. Model 2 için elde edilen konut fiyatı denklemi ve elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir.

Konut fiyatı (F) = 1,80 + 0,15\*O + 0,60\*M – 0,15\*Y + 0,17\*B + 0,13\*K + 0,19\*U

- İncelenen örneğe ait  $R^2= 0,65$  çıkmıştır. Kullanılan bağımsız değişkenlerin (O, M, Y, B, K ve U) konut fiyatındaki (F) toplam varyasyonu açıklayabilme oranı oransal olarak %65’dir. Kalan %35’lik kısım bilinmeyen faktörler nedeniyle oluşmuştur.
- $R^2$  değeri 0,5-0,7 aralığında çıktığı için F ile O, M, Y, B, K ve U arasında orta dereceli ilişki vardır.
- Ayarlı  $R^2= 0,64$  çıkmıştır ve  $R^2$  ile çok yakındır. Bu durumda modeli oluşturmak için gözlem sayısının yeterli olduğu söylenebilir.
- F= 87,81 için P değeri 0,1’den çok küçük olduğu için model genel olarak yüksek derecede anlamlı çıkmıştır.
- F ile O, M, B, K ve U arasında pozitif korelasyon vardır. Yani konut büyüdükçe, oda sayısı arttıkça ve bulunduğu kat ve apartman yükseldikçe konutun fiyatı artmaktadır. Ayrıca model 1’den farklı olarak metroya olan uzaklık arttıkça konutun fiyatı artmaktadır çünkü konut metrodan uzaklaştıkça denize yaklaşmaktadır. Bu da evin fiyatını arttırır.
- F ile Y arasında negatif korelasyon vardır. Yani konut yaşlandıkça fiyatı azalmaktadır.

#### IV. KONUT İSTATİSTİKLERİ

Bu çalışmada 415 konut analiz edilmiştir. Maltepe ilçesindeki konutların yaşı en az 1 en çok 41’dir. İlçedeki konutların yaşının %65 oranında 0-5 yaş arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 12’de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** Konutların yaşı

Yaş aralığı (yıl)	Oran (%)
0-5	1
5-15	65
15-25	8
25-35	17
35-45	9

Maltepe ilçesindeki konutların metrekaresi en az 30 m<sup>2</sup> en çok 350 m<sup>2</sup>’dir. İlçedeki konutların metrekaresinin %74 oranında 75-150 m<sup>2</sup> arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 13’de gösterilmiştir.

**Tablo 13.** Konutların büyüklüğü

Konut büyüklüğü (m2)	Oran (%)
0-75	8
75-150	74
150-225	15
225-350	3

Maltepe ilçesindeki konutların oda sayısı en az 1 en çok 8’dir. İlçedeki konutların oda sayısının %41 oranında 3-4 arasında olduğu ve %35 oranında 2-3 arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 14’de gösterilmiştir.

**Tablo 14.** Konutların oda sayısı

Oda sayısı	Oran (%)
1	8
2	35
3	41
4	7
5	7
6	2

Maltepe ilçesindeki konutların bulunduğu kat sayısı en az 1 en çok 23’dür. İlçedeki konutların bulunduğu kat sayısının %81 oranında 5-10 arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 15’de gösterilmiştir.

**Tablo15.** Konutların bulunduğu kat

Konutun bulunduğu kat	Oran (%)
0-5	81
5-10	17
10-15	2

Maltepe ilçesindeki binaların kat sayısı en az 2 en çok 30’dur. İlçedeki binaların kat sayısının %71 oranında 5-10 arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 16’da gösterilmiştir.

**Tablo 16.** Konutların kat sayısı

Kat sayısı	Oran
0-5	71
5-10	21
10-15	3
15-20	2
20-25	2
25-30	1



Maltepe ilçesindeki konutların metroya olan uzaklığı en az 9,08 m en çok 3143,31 m'dir. İlçedeki konutların metroya olan uzaklıklarının %56 oranında 500-1500 m arasında olduğu tespit edilmiştir. Tablo 17'de gösterilmiştir.

**Tablo 17.** Konutların metroya uzaklığı

Metroya uzaklık	Oran
0-500	21
500-1500	56
1500-2000	15
2000-2500	5
2500-3000	2
3000-3500	1

Maltepe ilçesi konut m<sup>2</sup> birim fiyatları ile ilgili olarak, %46 oranında 1700 TL ve 3750 TL arasında fiyat aralığı gözlemlenirken aynı zamanda %46 oranında 3750 TL ve 5700 TL arasında bir fiyat aralığının varlığından söz edilebilir. Tablo 18'de gösterilmiştir.

**Tablo 18.** Konutların birim fiyatları

Birim Fiyat	Oran
0-3750	46
3750-5700	46
5700-7700	7
7700-9700	1

Maltepe ilçesi için mahalle bazında metrekare birim fiyatları aşağıdaki tabloda gösterildiği gibidir. İlçede ortalama m<sup>2</sup> birim fiyatı 4158 TL'dir. Tablo 19'da gösterilmiştir.

**Tablo 19.** Konutların m<sup>2</sup> birim fiyatları

İlçe	m <sup>2</sup> birim fiyatı (TL)
Altayçeşme	4444
Altıntepe	4000
Aydınevler	3500
Bağlarbaşı	3909
Cevizli	4222
Çınar	3864
Feyzullah	4574
Fındıklı	2692
İdealtepe	4389
Küçükyalı	4200
Zümrütevler	4300

Maltepe ilçesindeki analiz yapılan 415 konutun fiyat dağılımı Tablo 20'de gösterilmiştir.

**Tablo 20.** Konutların fiyatları

Fiyat aralığı	Oran
0 – 385000	29
385000 – 625000	51
625000 – 865000	17
865000 – 1000000	2
1000000 ve üzeri	1

## V. SONUÇ

Maltepe ilçesinde Başbüyük ormanı, sahil yolu, E5 karayolu ve deniz bulunmaktadır. Ayrıca Maltepe sahil yolunda 1 milyon 200 bin metrekarelik dolgu alanına sahip bir sahil parkı yapılmıştır. Gülsuyu ve Gülsusu mahallerinde ise İBB onaylı kentsel dönüşüm projeleri söz konusudur. Dolayısıyla Maltepe kendi içinde kompleks bir yapıya sahiptir. Analiz yapılırken bölgenin metro istasyonuna olan uzaklığıyla birlikte, çalışma alanını belirli kısımlara bölerek incelemek uygun görülmüştür. Bu nedenle Maltepe ilçesi iki bölgeye ayrılarak ilçedeki konut fiyatlarını belirleyen iki farklı regresyon modeli geliştirilmiştir.

Maltepe ilçesindeki konutların %35'i 5 yaşından büyüktür. Konutun fiyatı ile yaşı arasında negatif bir ilişki olduğu görülmüştür. Oluşturulan iki modelin sonucunda konut fiyatını etkileyen en önemli faktörün konutun metrekaresi olduğu bulunmuştur. Konutun metrekaresinin fiyatı üzerindeki etkisi 1. Bölge için %49 iken 2. Bölge için %60'dır. Bu oran metroya olan uzaklığın sahip olduğu etkinin yaklaşık 3 katıdır. Yani kişiler konut alırken yakın çevre değişkenlerinden çok konutun büyüklüğüne dikkate ederler. Konutlar zaten metrekare birim fiyatları üzerinden satılmaktadır. Maltepe ilçesi için genel olarak konut fiyatları, 400000 TL ve 500000 TL arasındadır. Konut ortalama m<sup>2</sup> birim fiyatı 450000 TL civarındadır. Bununla birlikte, konutun bulunduğu kat ve oda sayısının fiyat üzerindeki etkisi istatistiksel olarak 1. Bölge için anlamlı çıkmamıştır. Dolayısıyla Model 1 için analiz yapılırken konutun oda sayısı ve kaçınca katta olduğu dikkate alınmamıştır. Bu faktörlerin 1. Bölge için anlamsız çıkmasının nedeni, o bölgenin ticari faaliyet yerine daha çok konutlaşmaya yönelik olduğudur. 2. Bölge için ise oda sayısı ve konutun kaçınca katta olduğu konut fiyatını sırası ile %15 ve %13 oranında etkilemektedir. Bunun nedeni daha pahalı ve değerli evlerin bulunduğu 2. Bölgede çok odalı ve yüksekte bulunan evlerin fiyatı daha da arttırmasıdır.

Her iki model için, metroya olan uzaklık istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. 1. Bölge için metroya olan uzaklık konut fiyatını %12 oranında negatif yönde etkilemektedir. Konut fiyatı ile metroya olan uzaklık arasında negatif korelasyon vardır. Yani konutun metroya olan uzaklığı arttıkça

fiyatı azalmaktadır. 2. Bölge için ise metroya olan uzaklık konut fiyatını %19 oranında pozitif yönde etkilemektedir. Konut fiyatı ile metroya olan uzaklık arasında bu defa pozitif korelasyon vardır. Konutun metroya olan uzaklığı arttıkça fiyatı artmaktadır. Bunun nedeni 2. Bölgedeki mahallelerin konum olarak denize yakın olması ve bu bölgenin zaten oturmuş bir konut fiyat aralığına sahip olmasıdır. Metroya uzaklaştıkça denize yaklaşıldığı için metroya yakınlık fiyatı bu defa olumsuz yönde etkilemiştir. 1. Bölge ve 2. Bölge konum açısından kıyaslandığında 2. Bölge daha prestijlidir. Her iki bölge konutlaşma açısından kıyaslandığında ise 2. Bölgenin konutlaşma sürecinin büyük bir kısmını tamamladığı ve 1. Bölgenin ise bu süreci devam ettirdiği tespit edilmiştir. Metrodan güneye doğru gidildikçe konutlar sahil kesimine doğru yaklaşmaktadır ve konutların fiyatları artmaktadır. Yani konutun metroya olan uzaklığından daha çok denize yakınlığı veya deniz manzarasına sahip olması konut fiyatını etkileyen konumsal bir faktördür. Altın-tepe, Aydınevler, Girne, Zümrütevler, İdealtepe ve Küçükalyalı mahalleleri metroya yürüme mesafesinde olmasına rağmen fiyatları Maltepe ilçesi için ortalama fiyat aralığındadır. Ancak Yalı, Feyzullah ve İdealtepe mahallesinin belirli bir bölümünde konut fiyatlarının ortalamanın üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni konutların sahile yakın olmasıdır.

Metroya uzaklığın konutun metrekaresine göre daha az etkiye sahip olmasının nedeni diğer ulaşım alternatiflerinin de var olmasıdır. Maltepe ilçesinde ulaşım demiryolu ve karayolu ile yapılmaktadır. Demiryolu Maltepe'nin E-5 Karayolu altında kalan Eski Maltepe'nin kurulmuş olduğu güzergahtır. E5 karayolu ise Maltepe'yi üçe ayırmaktadır. Bu yol Maltepe'yi Anadolu'ya, yan yollar ise komşu ilçelere bağlar. İkinci önemli karayolu ise Bağdat Caddesi olup Bostancı ile Pendik arasındaki güzergahı oluşturmaktadır. Maltepe ilçesi ayrıca Kadıköy, Kartal, Sancaktepe ve Ataşehir ilçeleriyle komşudur. Ulaşım için birçok alternatif olduğu görülmektedir. Bu da Maltepe'de yaşayan kişilerin illa ki metro kullanmayı tercih etmek zorunda kalmayacaklarını gösterir.

Konutları etkileyen birçok fiziksel faktör olabilir. Bu bazı bölgelerde sahile yakınlık, bazı bölgeler için kent ormanına yakınlık, bazı bölgeler için ise konutun işlek bir cadde üzerinde olması olabilir. Yani konutların fiyatı aslında metroya olan uzaklığından farklı olarak ilçenin semtlerine göre de değişmektedir. Bu sebepten sahile yakın olan Yalı Mahallesi aslında metroya en uzak mahallelerden biri olmasına karşın sahile yakın olması nedeniyle fiyatı yüksektir. Konut değerlemede etki yapan birçok faktör vardır. Modellemede daha fazla faktörün kullanılması, analiz sonucunda çıkan açıklanamayan nedenlerin belirlenmesini ve daha sağlıklı bir denklemin elde edilmesini sağlayacaktır.

Ulaşım yatırımlarının uzun vadedeki etkilerini tespit etmek ulaşım alt yapı yatırımından önce ve sonrasını değerlendirerek daha net bir sonuca götürebilir. Ancak ülkemizde bu konuda yapılan araştırma ve çalışmaların az olması, emlak sektöründe veri tabanının kısıtlı olması, uzun dönem için yapılacak olan çalışmalarda gerekli olan veriye ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu durum bir yatırımın planlanması ve fizibilite çalışmalarında hata ya da yanılma oranını yükseltmektedir. Ayrıca bu çalışmadaki gibi matematiksel model kurularak emlak vergisi ve rayiç bedel değerleri konutun fiziksel ve konumsal nitelikleri ile belirlenebilir. Böylece değer belirlemedeki görecelik ortadan kalkarak daha doğru ve standart bir uygulamaya geçilmiş olur. Bu çalışmada regresyon modeli kullanılmıştır. Bunun yerine değişkenler arasında daha kapsamlı bir ilişki kurmak için farklı makine öğrenme yöntemleri kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] GYODER, 2013 Gayrimenkul Sektörü ve İstanbul Konut Piyasası Saha Araştırma Raporu.
- [2] Yalır Ş., (2007). Bulanık Mantık Metodolojisi ile Taşınmaz Değerleme Modelinin Geliştirilmesi ve Uygulaması: Konya Örneği. Doktora Tezi, Konya. Konya Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] Damm, D., Lerman, S. R., Lerner-Lam, E., & Young, J. (1980). Response of urban real estate values in anticipation of the Washington Metro. *Journal of Transport Economics and Policy*, 315-336.
- [4] Forrest, D., Glen, J., & Ward, R. (1996). The impact of a light rail system on the structure of house prices: a hedonic longitudinal study. *Journal of Transport Economics and Policy*, 15-29.
- [5] Cervero, R. (2010, October). Effects of light and commuter rail transit on land prices: Experiences in San Diego County. In *Journal of the Transportation Research Forum* (Vol. 43, No. 1).
- [6] Debrezion, G., Pels, E., & Rietveld, P. (2004). The impact of railway stations on residential and commercial property value. Tinbergen Institute Discussion Paper
- [7] Yankaya U. & Çelik H. M., 2005. Kamu Ulaşım Yatırımlarının Gayrimenkul Değerleri Üzerine Etkisinin Modellenmesi: İzmir Metrosu Örneği. D.E.Ü. İ.İ.B.F. Dergisi Cilt: 20, Sayı:2, Yıl: 2005, ss:61-79
- [8] Debrezion, G., Pels, E., & Rietveld, P. (2011). The impact of rail transport on real estate prices: an empirical analysis of the Dutch housing market. *Urban Studies*, 48(5), 997-1015.
- [9] Cerdà Troncoso, J. F., Pérez Prieto, C. B., & Marmolejo Duarte, C. R. (2010). Impact real state value of urban and transportation projects, in the metropolitan area of Barcelona.
- [10] Boucq, E. (2011). Estimating the impact on housing prices brought by a light rail infrastructure in France.

- [11] Hewitt, C. M., & Hewitt, W. E. (2012). The effect of proximity to urban rail on housing prices in Ottawa. *Journal of Public Transportation*, 15(4), 3.
- [12] Yan, B. (2012). Land Values Impacts of Subway Stations: A Case Study of Beijing City
- [13] İnanoğlu, G. E., (2014). Kadıköy – Kartal raylı taşıma sistemi ve konut fiyatları değişiminin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi FBE.

# Hipogonadotropik Hipogonadizm ve Kallmann Sendromunda Yeni Tanımlanan *DCC/NTN1* Mutasyonları

## Novel *DCC/NTN1* Mutations in Patients with Hypogonadotropic Hypogonadism/Kallmann Syndrome

Leman Damla KOTAN <sup>1</sup> , Semine ÖZDEMİR DİLEK <sup>1</sup> , Gamze AKKUŞ <sup>2</sup> , İhsan TURAN <sup>3</sup> ,  
Bilgin YÜKSEL <sup>1</sup> , Ali Kemal TOPALOĞLU <sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Çocuk Endokrinolojisi Bilim Dalı, 01330, Adana, Türkiye

<sup>2</sup> Hatay Devlet Hastanesi, Endokrinoloji Bölümü, Hatay, Türkiye

<sup>3</sup> Şanlıurfa Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Çocuk Endokrinoloji Kliniği, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>4</sup> Mississippi Üniversitesi Tıp Merkezi, Pediatri Bölümü ve Nörobiyoloji ve Anatomik Bilimler Bölümü, Mississippi, ABD

### Öz

Embriyonik gelişim sırasında gonadotropin salgılatıcı hormon (Gonadotropin Releasing Hormone, GnRH) nöronları, koku alma nöronlarının akson rehberliğini kullanarak, oluştukları olfaktör plakoddan son hedefleri olan hipotalamusa göç etmektedirler. Bu rehberlikte meydana gelen kusur nedeniyle nöronların yanlış yönlendirilmesi bozulmuş koku fonksiyonu ve Hipogonadotropik Hipogonadizm (HH) birlikteliğindeki Kallmann Sendromu (KS) ile sonuçlanmaktadır. Netrin-1 ve reseptörü *DCC* (Deleted in Colorectal Cancer) sinyalizasyonu, GnRH migrasyonu için bir yapı iskelesi görevi gören olfaktör liflerin gelişiminde görev almaktadır. Yakın dönemde, *DCC/NTN1* mutasyonlarının GnRH nöron göçünde ve HH/KS hastalık etiolojisinde rol oynadığı ilk kez gösterilmiştir. Çalışmamızda, HH ve KS hastalarında *DCC/NTN1* genlerindeki olası patojenik varyantların tanımlanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, *DCC* geninde daha önce bildirilmemiş iki varyant (p.Arg386Gln, p.Arg1124Cys) ve bir mutasyon (p.Gly470Asp), *NTN1* geninde ise daha önce bildirilmemiş bir varyant (p.Pro73Ser) heterozigot şekilde toplamda beş hastada tespit edilmiştir. Ayrıca üç hastanın HH-ilişkili diğer genlerde (*OTUD4*, *SEMA3A*, *CHD7* ve *WDR11*) nadir sekans varyantı taşıdığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, *DCC* ve *NTN1* genlerindeki üç nadir sekans varyantının HH/KS hastalık modeliyle ilişkili olduğu ilk kez tanımlanmıştır. Olası patojenik varyantları hastalığın her iki formunda da gözlememiz, anosmik ve normosmik model arasında net bir ayırım olmadığını bir kez daha doğrulamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** akson rehberliği, Kallmann sendromu, hipogonadotropik hipogonadizm, oligogenik kalıtım, *DCC*, *NTN1*

### Abstract

During embryonic development, Gonadotropin Releasing Hormone (GnRH) neurons migrate from the olfactory placode to their final target hypothalamus, using axon guidance of olfactory neurons. Misdirection of neurons due to a defect in this guidance results in Kallmann Syndrome (KS) associated with impaired olfactory function and Hypogonadotropic Hypogonadism (HH). The signaling of Netrin-1 and its receptor *DCC* (Deleted in Colorectal Cancer) is involved in the development of olfactory fibres which act as a scaffold for migration. Recently, *DCC/NTN1* mutations have been shown to play a role in GnRH neuron migration and disease etiology. In our study, we aimed to identify possible pathogenic variants in *DCC/NTN1* genes in HH and KS patients. Accordingly, two novel (p.Arg386Gln, and p.Arg-1124Cys) and one previously reported (p.Gly470Asp) rare sequence variants in *DCC* and another novel rare sequence variant (p.Pro73Ser) in *NTN1* were identified in five patients in the heterozygous state. In addition, three of the patients had RSVs in other HH-related genes (*OTUD4*, *SEMA3A*, *CHD7*, and *WDR11*). In conclusion, likely causative RSVs in *DCC/NTN1* have been identified for the first time to be associated with HH/KS disease model. Our observation of the variants in both forms of the disease confirmed once again that there was no clear discrimination between the anosmic and normosmic forms.

**Keywords:** axon guidance, Kallmann Syndrome, hypogonadotropic hypogonadism, oligogenic inheritance, *DCC*, *NTN1*

## I. GİRİŞ

Koku alma duyusundaki yetersizliğin Hipogonadotropik Hipogonadizm (HH) ile birlikteliği klinik olarak Kallmann Sendromu (KS [MIM 308700, 147950, 244200, 610628, 612370, 612702]) olarak tanımlanmaktadır [1]. Embriyonik gelişim sırasında olfaktör plakodda oluşan gonadotropin salgılatıcı hormon (Gonadotropin Releasing Hormone, GnRH) nöronları, son hedefleri olan hipotalamusa ulaşmak için koku alma nöronlarının akson rehberliğini kullanmaktadır. Dolayısıyla KS hastalarında bu rehberlikte oluşan bozukluğun, GnRH nöronlarının yanlış yönlendirilmesine neden olduğu ileri sürülmektedir [2, 3]. Bugüne kadar, bu nörolojik süreci kontrol eden çok sayıda faktör tanımlanmış ve aksonal kılavuzlu göç yolunda 30'dan fazla gende nedensel mutasyonlar bildirilmiştir [4].

Akson rehberlik yolağında Semafor, Netrin, Slit, İtici Rehberlik Molekülü ve Ephrin olmak üzere beş kanonik protein ailesi tanımlanmıştır [3]. Yolakta yer alan netrin (netrin 1-5), nöronal gelişimde önemli rol oynamaktadır. Akson büyümesine aracılık eden *DCC* (Deleted in Colorectal Cancer) ise netrin için fonksiyonel bir reseptördür [5, 6]. Kemirgen çalışmalarında *Dcc* inaktivasyonunun, *netrin-1* eksikliği ile uyumlu şekilde aksonal projeksiyon bozukluğuna neden olduğu gösterilmiştir [7]. Bouilly ve ark. 2017 yılında HH hastalarında *DCC/NTN1* mutasyonlarının, fare GnRH nöron ontogenezindeki rolleriyle benzer sonuçlara sahip olduğunu raporlamış ve her iki gen oligogenik kalıtım listesine dahil edilmiştir [8].

Çalışmamızda, HH ve KS hastalarında *DCC/NTN1* genlerindeki olası patojenik varyantların tanımlanması ve bu hastalarda hastalık ile ilişkili diğer genlerde bulunan nadir gen değişimlerini belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, HH/KS kliniği için hastalık patogenezinde tek başına yeterli olmayan ancak potansiyel olarak zararlı yeni varyantlar oligogenik kalıtıma eklenmiştir.

## II. YÖNTEM

HH kızlarda 13, erkeklerde 14 yaşında olmasına rağmen düşük bazal gonadotropin seviyeleri ile pubertal gelişimin eksikliği olarak tanımlanmaktadır [9]. KS'li hastalarda koku duyusunun kısmi (hiposmi) veya tam kaybı (anosmi) mevcuttur. Hastaların olfaktör fonksiyon seviyeleri fizik muayene ile belirlenmiştir.

Eksom sekanslaması (Whole Exome Sequencing, WES) daha önce bildirilen yöntemle göre yapılmıştır [10]. *DCC* ve *NTN1* genlerinin kodlayan eksonları ve yakın komşuluğundaki gen bölgeleri HH ve KS hastalarında taranmıştır.

Tespit edilen varyantların alelik frekansları gnomAD (the genome aggregation consortium, <https://gnomad.broadinstitute.org/>) ve GME (the Greater Middle East variom project, <http://igm.ucsd.edu/gme/>) veritabanlarında hastaların etnik kökeniyle uyumlu olarak (ENF, European non-Finnish, TP, Turkish Peninsula) kontrol edilmiş ve her iki veritabanında da 0.001'den az görülmesi durumunda varyant nadir (Rare Sequence Variant, RSV) olarak kabul edilmiştir. Patojenite skorlaması CADD (Combined Annotation Dependent Depletion, <https://cadd.gs.washington.edu/snv>) yazılımı kullanılarak yapılmış ve 20'yi geçen varyantlar zararlı kabul edilmiştir. Belirlenen kriterler dışında kalan varyantlar çalışmaya dahil edilmemiştir. RSV'ler ayrıca ClinVar (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/clinvar/>) veritabanında taranmıştır. Varyantların protein üzerindeki lokasyonları UniProt veritabanı (<https://www.uniprot.org>) ile belirlenmiştir. Tüm varyantlar ACMG/AMP (American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology) kriterleri gereğince VarSome (<https://varsome.com>) veritabanı üzerinden değerlendirilmiştir [11]. Hastalıkla ilişkili genlerdeki olası patojenik RSV'ler aynı yöntem kullanılarak belirlenmiştir [2].

Çalışmamız, Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Etik Kurulu tarafından onaylanmış (no: 82/47) ve çalışma hastalarından ve/veya velilerinden yazılı onam alınmıştır.

## III. BULGULAR

Çalışmamızda, *DCC* (HGNC ID: 2701, NM\_005215.3) geninde daha önce tanımlanmamış iki varyant (c.1157G>A, p.Arg386Gln; c.3370C>T, p.Arg1124Cys) ve bir mutasyon (c.1409G>A, p.Gly470Asp), *NTN1* (HGNC ID: 8029, NM\_004822.2) geninde ise tanımlanmamış bir varyant (c.217C>T, p.Pro73Ser) heterozigot şekilde toplamda beş hastada tespit edilmiştir. Tüm varyantların gnomAD alel frekansları 0.001'den küçük olup, hiçbiri GME veritabanında bildirilmemiştir. Sadece p.Gly470Asp mutasyonunun ClinVar veritabanında kayıtlı olduğu belirlenmiştir. ACMG/AMP değerlendirmesi ile *CHD7* dışındaki tüm varyantların "önemi belirsiz" (Variant Uncertain Significance, VUS) kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca WES taraması ile üç hastanın HH-ilişkili diğer genlerde (*OTUD4*, NM\_001102653.1, c.2909G>C, p.Arg970Thr; *SEMA3A*, NM\_006080.2, c.1849C>G, p.Arg617Gly; *CHD7*, NM\_017780.3, c.8197G>A, p.Ala2733Thr ve *WDR11*, NM\_018117.11, c.2305A>G, p.Met769Val) RSV taşıdığı belirlenmiştir. İki hasta KS, üç hasta ise HH kliniğindedi. İki hastada birer, bir hastada ise iki ek gen varyantı tespit edildi. Geriye kalan hastalarda farklı gende varyant bulunmadı. Çalışma hastalarının klinik ve genetik detayları sırasıyla Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** *DCC/NTNI* varyantı tespit edilen hastaların klinik ve laboratuvar özellikleri.

Hasta no	Cinsiyet	Yaş*	FSH (mIU/mL)	LH (mIU/mL)	Estradiol (ng/dL)	Testosteron (ng/dL)	Olfaktör fonksiyon	Akrabalık
I	E	19.0	0.47	0.05	-	17	normosmik	var
II	K	14.5	0.50	<0.02	5.0	-	normosmik	yok
III	E	15.8	2.80	0.36	-	24	normosmik	yok
IV	E	27.0	0.60	0.42	-	38	hiposmik	var
V	E	17.5	0.84	0.21	-	1660 <sup>+</sup>	hiposmik	yok

E, erkek; K, kadın; -, belirlenmemiş; \*tanı yaşı; <sup>+</sup>tedavi altında

**Tablo 2.** Tanımlanan heterozigot *DCC/NTNI* varyantlarının moleküler genetik özellikleri.

Hasta no	Gen	cDNA, Protein	gnomAD ENF	GME TP	Protein domaini	CADD skoru	dbSNP	Ek gen varyantı/ Zigosite	Ek gen varyantı CADD skoru
I	<i>DCC</i>	c.1409G>A, p.Gly470Asp	0.005069	-	Fibronectin type-III 1	27.7	rs141813053	<i>OTUD4</i> p.Arg970 Thr Heterozigot	22.3
II	<i>DCC</i>	c.1409G>A, p.Gly470Asp	0.005069	-	Fibronectin type-III 1	27.7	rs141813053	-	
III	<i>DCC</i>	c.1157G>A, p.Arg386Gln	0.0002215	-	Ig-like C2-type 4	22.5	rs140711456	<i>SEMA3A</i> p.Arg617 Gly Heterozigot	22.7
IV	<i>DCC</i>	c.3370C>T, p.Arg1124Cys	0.0001027	-	-	33.0	rs547920182	<i>CHD7</i> p.Ala2733 Thr Heterozigot <i>WDR11</i> p.Met769 Val Heterozigot	22.4 23.0
V	<i>NTNI</i>	c.217C>T, p.Pro73Ser	-	-	Laminin N-terminal	23.0	-	-	

#### IV. TARTIŞMA

Kallmann sendromu, GnRH ve olfaktör nöronlarının ortak gelişimindeki bozukluktan kaynaklanmaktadır ve genetik olarak heterojendir [12]. Hastalıkla ilişkili olarak tanımlanan nörogelişimsel genler, ilgili nöronlar arasındaki topografik bağlantı nedeniyle KS ile nöroendokrin genler ise koku alma duyusunun etkilenmediği HH formu ile ilişkilendirilmiştir [13]. Ancak her iki hastalık modeli arasında net bir ayırım yapılamadığından, hem anosmik hem de normosmik kliniğe neden olan gen mutasyonları bildirilmiş ve yakın dönemde bu listeye yenileri eklenmiştir [8, 10, 12].

*NTNI* ve ana reseptörü olan *DCC*'nin embriyonik gelişim sırasında akson rehberliğinde rol aldığı bilinmektedir [14]. Çalışmalar, *DCC/Netrin-1* sinyalizasyonunun GnRH nöron migrasyonu için bir yapı iskelesi görevi gören olfaktör liflerin gelişiminde gerekli olduğunu göstermiştir [15]. Yaptığımız çalışmada III numaralı HH hastasında saptanan her iki RSV'nin de (*DCC* p.Arg386Gln ve *SEMA3A* p.Arg617Gly) aksonal rehberlikte görev alan genlerde olduğu belirlenmiştir [13]. Buna rağmen hastanın olfaktör fonksiyonunun normal olması, hastalığın iki formu arasında net ayırım bulunmadığına yeniden işaret etmektedir. Dolayısıyla tespit edilen varyantların hastada aksonal rehberliği

tamamen değil kısmen bozduğu, buna bağlı olarak bir grup GnRH nöronunun hedefine ulaşabildiği ancak işlevsiz kaldığı ve/veya işlevini yapmak için yeterli sayıda olmadığını yorumu yapılabilmektedir.

Çalışma hastalarında gözlenen varyantların protein üzerindeki lokasyonu incelendiğinde p.Gly470Asp, FN3 (Fibronectin type-III), p.Arg386Gln ise Ig-like (immunoglobulin-like) domaininde bulunmaktadır. Ig domaini protein stabilitesi, FN3 domaini ise DCC/Netrin-1 bağlantısını üzerinde etkili alanlardır [14]. Dolayısıyla bu bölgelerde meydana gelen bir değişimin zarar verici olacağı düşünülmektedir. Bu öngörüyle uyumlu olarak RSV'lerin CADD skorları patojeniteyi destekleyici şekilde yüksek bulunmuştur.

Aralarında akrabalık ilişkisi bulunmayan iki hastada (I ve II) daha önce bildirilmiş olan DCC p.Gly470Asp mutasyonu tespit edilmiştir. *In vitro* çalışmalar, bu değişimin sinyal kaybına neden olduğunu ancak DCC/Netrin-1 bağlanmasında bozulma yaratmadığını göstermiştir [8]. Bununla birlikte yapay DCC mutantlarının Netrin-1 ile normal bağlanmasına rağmen hatalı sinyalizasyonları bildirilmiştir [16]. p.Gly470Asp mutasyonu ClinVar veritabanında (ClinVar ID: 187790) konjenital ayna hareketi (Congenital Mirror Movement, CMM) ile ilişkilendirilmiştir. KS vakalarına yarı damak, sağırılık, ayna hareketleri gibi ek anomalilerin de eşlik edebildiği bilinmektedir [2]. Oysaki hastalığın normosmik formu olan HH'de GnRH nöronları hipotalamustaki nihai hedeflerine ulaşmalarına rağmen işlevsizdir. Dolayısıyla HH vakalarında ek anomali beklenmemektedir [2]. İlgili mutasyonu taşıyan her iki normosmik çalışma hastamızda da bu durumla uyumlu olarak ek konjenital anomali yoktur. Bouilly ve ark. çalışmasında p.Gly470Asp değişimine sahip üç KS hastasından sadece birinde ayna hareketi gözlenmiştir [8]. Buna bağlı olarak hastada ek anomalinin ortaya çıkmasında mutasyonun tek başına değil yardımcı varyantlarla birlikte etkili olduğunu düşünmekteyiz.

Çalışmamızda Mendel dışı kalıtım paterninin bir işareti olarak üç hastanın birden fazla gende RSV taşıdığını tespit ettik [17]. Geleneksel olmayan kalıtım modellerinden biri olan oligogenik kalıtım, belirgin şekilde artan rapor sayısı ile HH hastalık modelinde giderek ön plana çıkmıştır [9, 10, 12]. Hastalıkla ilişkili genlerde gözlenen ancak mevcut bilgilerde klinik yansımaları henüz netleşmemiş RSV'lerin bu kalıtım modeline katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Farklı genlerde tespit edilen mutasyonlar arası muhtemel sinerjik etkinin belirlenmesi, hücresel veya çevresel faktörler tarafından da modifiye edilebileceği için, tek gen hastalıklarına oranla daha fazla zaman almaktadır [17]. Dolayısıyla bu alanda yapılan çalışmaların artmasının oligogenik bulmacanın kısa sürede tamamlanabilmesi için çok önemli olduğunu

düşünüyoruz. Bu sebeple, özellikle hastalık patogenezinin oluşabilmesi için gerekli olan çoklu etkileşimde, henüz sadece tek gen varyantı belirlenmiş hasta verilerinin (II ve V gibi) ileriye yönelik gen keşfinde yol gösterici olabileceğini öngörmekteyiz.

## V. SONUÇ

Bu çalışmada DCC ve NTN1 genlerindeki üç nadir sekans varyantının HH ve KS hastalık modeliyle ilişkili olduğu ilk kez tanımlanmıştır. Varyantların hastalığın her iki formunda da gözlenmesi, anosmik ve normosmik model arasında net bir ayrımın olmadığını literatürle uyumlu olarak doğrulamıştır. Ayrıca HH ve KS kliniğindeki hastalarda DCC ve/veya NTN1 olası patojenik nadir sekans varyantlarına ek olarak bilinen diğer HH/KS genlerinde mutasyonlar tespit edilmesi, oligogenik kalıtımın bir işareti olacağı için hastalıkla ilişkili diğer gen varyantlarının aranması daha iyi bir genetik yönetimi sağlayacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri No: 11364 ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Topaloglu, A.K. ve Kotan, L.D. (2010). Molecular causes of hypogonadotropic hypogonadism, *Curr Opin Obstet Gynecol*, 22, 264-270.
- [2] Topaloglu, A.K. (2017). Update on the Genetics of Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism, *J Clin Res Pediatr Endocrinol*, 9, 113-122.
- [3] Van Battum, E.Y., Brignani, S., Pasterkamp, R.J. (2015). Axon guidance proteins in neurological disorders, *The Lancet. Neurology*, 14, 532-546.
- [4] Maione, L., Dwyer, A.A., Francou, B., Guiochon-Mantel, A., Binart, N., Bouligand, J., Young, J. (2018). GENETICS IN ENDOCRINOLOGY: Genetic counseling for congenital hypogonadotropic hypogonadism and Kallmann syndrome: new challenges in the era of oligogenism and next-generation sequencing, *Eur J Endocrinol*, 178, R55-R80.
- [5] Li, W., Lee, J., Vikis, H.G., Lee, S.H., Liu, G., Aurandt, J., Shen, T.L., Fearon, E.R., Guan, J.L., Han, M., Rao, Y., Hong, K., Guan, K.L. (2004). Activation of FAK and Src are receptor-proximal events required for netrin signaling, *Nature neuroscience*, 7, 1213-1221.
- [6] Yaron, A. ve Zheng, B. (2007). Navigating their way to the clinic: emerging roles for axon guidance molecules in neurological disorders and injury, *Dev Neurobiol*, 67, 1216-1231.
- [7] Fazeli, A., Dickinson, S.L., Hermiston, M.L., Tighe, R.V., Steen, R.G., Small, C.G., Stoekli, E.T., Keino-Masu, K.,

- Masu, M., Rayburn, H., Simons, J., Bronson, R.T., Gordon, J.I., Tessier-Lavigne, M., Weinberg, R.A. (1997). Phenotype of mice lacking functional Deleted in colorectal cancer (Dcc) gene, *Nature*, 386, 796-804.
- [8] Bouilly, J., Messina, A., Papadakis, G., Cassatella, D., Xu, C., Acierno, J.S., Tata, B., Sykiotis, G., Santini, S., Sidis, Y., Elowe-Gruau, E., Phan-Hug, F., Hauschild, M., Bouloux, P.M., Quinton, R., Lang-Muritano, M., Favre, L., Marino, L., Giacobini, P., Dwyer, A.A., Niederlander, N.J., Pitteloud, N. (2018). DCC/NTN1 complex mutations in patients with congenital hypogonadotropic hypogonadism impair GnRH neuron development, *Hum Mol Genet*, 27, 359-372.
- [9] Kotan, L.D., Cooper, C., Darcan, S., Carr, I.M., Ozen, S., Yan, Y., Hamedani, M.K., Gurbuz, F., Mengen, E., Turan, I., Ulubay, A., Akkus, G., Yuksel, B., Topaloglu, A.K., Leygue, E. (2016). Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism Caused by Inactivating Mutations in SRA1, *J Clin Res Pediatr Endocrinol*, 8, 125-134.
- [10] Kotan, L.D., Isik, E., Turan, I., Mengen, E., Akkus, G., Tantan, M., Gurbuz, F., Yuksel, B., Topaloglu, A.K. (2019). Prevalence and associated phenotypes of PLXNA1 variants in normosmic and anosmic idiopathic hypogonadotropic hypogonadism, *Clin Genet*, 95, 320-324.
- [11] Richards, S., Aziz, N., Bale, S., et al. (2015). Standards and guidelines for the interpretation of sequence variants: a joint consensus recommendation of the American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology. *Genet Med*, 17, 405-424.
- [12] Turan, I., Hutchins, B.I., Hacıhamdioglu, B., Kotan, L.D., Gurbuz, F., Ulubay, A., Mengen, E., Yuksel, B., Wray, S., Topaloglu, A.K. (2017). CCDC141 Mutations in Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism, *J Clin Endocrinol Metab*, 102, 1816-1825.
- [13] Stamou, M.I. ve Georgopoulos, N.A. (2018). Kallmann syndrome: phenotype and genotype of hypogonadotropic hypogonadism, *Metabolism*, 86, 124-134.
- [14] Finci, L., Zhang, Y., Meijers, R., Wang, J.H. (2015). Signaling mechanism of the netrin-1 receptor DCC in axon guidance, *Prog Biophys Mol Biol*, 118, 153-160.
- [15] Lakhina, V., Marcaccio, C.L., Shao, X., Lush, M.E., Jain, R.A., Fujimoto, E., Bonkowsky, J.L., Granato, M., Raper, J.A. (2012). Netrin/DCC signaling guides olfactory sensory axons to their correct location in the olfactory bulb, *J Neurosci*, 32, 4440-4456.
- [16] Chen, Q., Sun, X., Zhou, X.H., Liu, J.H., Wu, J., Zhang, Y., Wang, J.H. (2013). N-terminal horseshoe conformation of DCC is functionally required for axon guidance and might be shared by other neural receptors, *J Cell Sci*, 126, 186-195.
- [17] Van Heyningen, V. ve Yeyati, P.L. (2004). Mechanisms of non-Mendelian inheritance in genetic disease, *Hum Mol Genet*, 13 Spec No 2, R225-233.



# İdiyopatik Hipogonadotropik Hipogonadizme Neden Olan *GNRH1* c.99delA Delesyonunun Klinik ve Genetik İncelemesi

## Molecular Genetic and Clinical Investigation of the c.99delA Mutation in *GNRH1* as a Cause of Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism

Leman Damla KOTAN <sup>1</sup> , Erdal EREN <sup>2</sup> , İhsan TURAN <sup>3</sup> , Eda MENGEN <sup>4</sup> , Bilgin YÜKSEL <sup>1</sup> ,  
A. Kemal TOPALOĞLU <sup>5</sup> 

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Çocuk Endokrinolojisi Bilim Dalı, Adana

<sup>2</sup>Uludağ Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Çocuk Endokrinolojisi Bilim Dalı, Bursa

<sup>3</sup>Şanlıurfa Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Çocuk Endokrinoloji Kliniği, Şanlıurfa

<sup>4</sup>Ankara Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Hematoloji Onkoloji Eğitim Araştırma Hastanesi, Çocuk Endokrinolojisi Kliniği, Ankara

<sup>5</sup>Mississippi Üniversitesi, Pediatri Bölümü Nörobiyoloji ve Anatomi Bilimleri, Mississippi

### Öz

“Gonadotropin Salgılatıcı Hormon 1” geni (Gonadotropin-releasing hormone 1, *GNRH1*), gonadotropin salgılatıcı hormon ailesinin üyesi olan bir preprohormonu kodlamaktadır ve İdiyopatik Hipogonadotropik Hipogonadizm’e (IHH) yol açan genler arasındadır. Bugüne kadar hastalıkla ilişkili olarak *GNRH1*’de oldukça sınırlı sayıda mutasyon bildirilmesine rağmen, homozigot c.99delA delesyonu farklı etnik kökenlere sahip IHH’li ailelerde tekrarlayan şekilde raporlanmıştır. Bu çalışmada, *GNRH1* c.99delA mutasyonu taşıyan IHH tanılı üç bağımsız aileden toplam dört hastada ayrıntılı genetik ve klinik inceleme yapılması amaçlanmıştır. Bu ailelerdeki her üç indeks olgu da IHH’nin klinik olarak en ağır yansıması sayılan inmemiş testis/mikropenis ile başvurmuştur. *GNRH1* mutasyonunun komşuluğundaki homozigot segmentlerin her üç ailede de farklı olması mutasyonun ortak bir atadan kalıtılmış (founder mutation) olmak yerine, mutasyona eğilimli bir bölge (mutational hotspot) nedeniyle oluşmuş olduğunu düşündürmektedir. *GNRH1* homozigot mutasyonları IHH için halen nadir görülen nedenlerden biri olmasına rağmen hastalarda nedensel *GNRH1* taraması yapılırken c.99delA mutasyonu öncelikli bakılması gereken noktaların başında gelmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** *GNRH1*, idiyopatik hipogonadotropik hipogonadizm, delesyon, çerçeve kayması mutasyonu

### Abstract

“Gonadotropin-releasing hormone 1” gene (*GNRH1*) encodes a preprohormone that is a member of the gonadotropin-releasing hormone family and is among the causal genes for the idiopathic hypogonadotropic hypogonadism (IHH) disease model. To date, although a very limited number of mutations have been reported in the *GNRH1* associated with the disease, the homozygous c.99delA has been repeatedly reported in IHH families with different ethnic backgrounds. In this study, we aimed a detailed genetic and clinical investigation of four IHH patients from three independent families with *GNRH1* c.99delA mutations. All three probands in these families presented with undescended testicles and/or micropenis, which is considered clinically the most severe manifestation of IHH. The fact that the homozygous regions flanking to the *GNRH1* mutation are different in each of the three families suggest that the mutation is caused by a mutational hotspot rather than a founder mutation. Although *GNRH1* homozygous mutations are still one of the rare causes of IHH, c.99delA mutation is a primary point to be noted when performing a causative *GNRH1* screening.

**Keywords:** *GNRH1*, idiopathic hypogonadotropic hypogonadism, deletion, frameshift mutation

## I. GİRİŞ

Gonadotropin salgılatıcı hormon (Gonadotropin-releasing hormone, GnRH), hipotalamo-hipofizer-gonadal eksenini harekete geçirerek sekonder cinsiyet özelliklerinin ve üreme yeteneğinin gelişmesini, dolayısıyla pubertenin başlamasını sağlamaktadır. İdiyopatik Hipogonadotropik Hipogonadizm (IHH), anormal gonadotropin salgılanmasından kaynaklanan tam veya kısmi pubertal gelişim bozukluğuyla karakterize bir hastalıktır [1]. *GNRHI* (Gonadotropin-releasing hormone 1), GnRH ailesinin üyesi olan bir preprohormonu kodlamaktadır [2]. İki farklı grubun 2009 yılında art arda *GNRHI*'deki homozigot çerçeve kayması mutasyonlarını IHH'li olgularda raporlaması sonucu, hastalıktan sorumlu genler listesine dahil olmuştur [3,4]. Ergenlik sürecindeki rolünün keşfinden bugüne kadar geçen sürede bu gende oldukça sınırlı sayıda mutasyon bildirilmiştir [5-7]. Ancak çalışmalar *GNRHI* ve reseptörü olan *GNRHR*'nin IHH etiyojisindeki en önemli aday genler olduğunu desteklemektedir [1,8]. IHH'li bir olguda *GNRHI*'deki homozigot c.99delA mutasyonu ilk olarak 2009 yılında Chan ve ark. tarafından bildirilmiştir [4]. Aynı pozisyondaki delesyon 2016 yılında merkezimizden Menggen ve ark. tarafından raporlanmıştır [7].

Bu çalışmada, *GNRHI* genindeki nadir patojenik bulgulara rağmen, IHH hastalarında tekrarlayan şekilde bildirilen c.99delA delesyonunun ayrıntılı şekilde klinik ve genetik incelemesi ve ilgili mutasyon sıklığının nedenlerinin araştırılması amaçlanmıştır.

## II. YÖNTEM

Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Çocuk Endokrinolojisi Polikliniğinde genetik çalışması yapılan, IHH tanılı ve etiyojisinde *GNRHI* (HGNC: 4419, NM\_001083111.2) c.99delA mutasyonu saptanan hastalar değerlendirmeye alınmıştır. c.99delA delesyonuna sahip olan hastalarda kalıtım paterninin belirlenebilmesi için aile içi segregasyon çalışması Sanger sekanslaması ile yapılmıştır. Değişimin *in silico* kontrolü için VarSome veritabanı kullanılmıştır [9]. Hasta bireylerin tüm eksom sekans verileri incelenerek mutasyonun bulunduğu homozigot bölgenin sınırları belirlenmiştir. Bu hastalarda bilinen diğer IHH genlerinde neden sel bir mutasyon tespit edilmemiştir. Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Tıp Fakültesi Etik Kurulu tarafından onaylanmış (no: 81/2) ve çalışma hastalarından ve/veya velilerinden yazılı onam alınmıştır.

**Aile 1:** Üç yaşında sağ orşiopeksi operasyonu geçiren indeks olgu (II-4) 21 yaşındayken ergenlik bulgularının başlamasıyla yakınmasıyla Pediatrik endokrinoloji polikliniğine başvurdu. Arap kökenli olan anne ve babasının aralarında

akraba olmadığı öğrenildi. Kemik yaşı, takvim yaşı ile uyumlu olan hastanın üç yıl önce HH tanısı ile insan koriyonik gonadotropini, follitropin alfa tedavisi aldığı öğrenildi. Testis hacmi bilateral 3cc olan hastanın tedavi sonrası Luteinleştirici Hormon (LH): 0,28 mIU/ml (0,4-7,0), Folikül Stimülant Hormon (FSH): 0,46 mIU/ml (2,60-11,00), Total Testosteron: 0,36 mg/mL (3,50-9,70) olarak saptandı. Olgunun 12 yaş 3 aylık erkek kardeşi (II-6) penis küçüklüğü şikayeti ile başvurdu. Kemik yaşı 11 yaş 6 ay ile uyumlu iken pubertal muayenesinde aksiller ve pubik kıllanma evre 1, testis hacimleri; sol 2-3 cc, sağ 1-2 cc olarak not edildi. Hormonal değerlendirmesinde LH: 0,34 mIU/ml, FSH: 0,32 mIU/ml, Total Testosteron: 0,13 ng/mL olması üzerine takibe alınan hastanın koku muayenesi normal, 13 yaş 6 aylıkken yapılan son değerlendirmesinde testisleri bilateral 2 cc ve kemik yaşı takvim yaşı ile uyumluydu. Olgunun bazal LH: 0,60 mIU/ml (0,20-4,90), FSH: 0,36 mIU/ml (1,80-3,20), Total Testosteron: 0,26 mg/mL (0,18-1,50), LHRH uyarı testinde pik LH: 0,95 mIU/ml (>5) saptandı ve IHH tanısı aldı. Her iki olgunun hipofiz MR görüntülemesi normaldi.

**Aile 2:** Pediatrik endokrinoloji polikliniğine ilk kez 17 yaş 6 aylıkken testislerinin küçük olması yakınmasıyla başvuran indeks olgunun (II-1) özgeçmişinde sağ orşiopeksi operasyonu olduğu öğrenildi. Özgeçmişinde Türk kökenli anne ve babasının kuzen olduğu bildirilmişti. Pubertal değerlendirmesinde aksiller ve pubik kıllanma evre 1, testis hacimleri ise prepubertaldi. Koku muayenesi normal ve kemik yaşı takvim yaşı ile uyumlu olan hastanın bazal hormonal değerleri ve LHRH uyarı testi sonuçları IHH ile uyumluydu. Üç aylık testosteron tedavisi sonrası son muayenesinde testisleri bilateral 2 cc ve LH: <0,03 mIU/ml (0,4-7,0), FSH: 0,1 mIU/ml (2,60-11,00), Total Testosteron: 0,72 ng/mL (3,50-9,70) olarak not edildi. Yapılan LHRH uyarı testinde pik LH yanıtı 1 mIU/ml (>5) olan hastanın diğer hipofiz hormonları normal sınırlardaydı. Olgunun hipofiz MR görüntülemesi normaldi.

**Aile 3:** Onbeş yaş 9 aylık indeks olgu (II-1) ilk kez bir yaşında penis küçüklüğü ve bilateral inmemiş testis yakınması ile çocuk endokrinolojisi polikliniğine başvuran hasta iki yaşında orşiopeksi operasyonu geçirmiştir. Ebeveynlerinin Türk kökenli ve kuzen olup zamanında ergenlik yaşadıkları öğrenildi. Son muayenesinde testis hacimleri bilateral 1 ml olan hastanın gerilmiş penis boyu 3.6 cm, kemik yaşı ise 11 yaş ile uyumluydu. Hormonal değerlendirmesi LH: 0.1 mIU/ml (0.2-5,0), FSH: 0.2 mIU/ml (2,0-9,2) ve Total Testosteron 0,10 ng/mL (2,00-6,20) ile prepubertal olan hastanın koku muayenesi normaldi. Hasta IHH tanısıyla izlenmektedir.

### III. BULGULAR

Toplam, üç aileden dört hasta birey *GNRHI* c.99delA homozigot mutasyonunun (c.del99A/c.del99A) incelemesi için çalışmaya alınmıştır. Bu değişime göre, genin ilk

eksonundaki kodlayan dizide 99. nükleotid pozisyonunda bulunan adeninin (A) kaybı sonucu (c.99delA) baz diziliminde kayma meydana gelmiş ve 34. aminoasit olan glisin (Gly), glutamik aside (Glu) değişmiştir (p.Gly34Glu) (Tablo 1a, 1b).

**Tablo 1.a.** *GNRHI* 33-42. aminoasit dizilimi, normal (wild-type) dizi. \*koyu renk ile gösterilen baz, delesyon sonucu kayba uğramıştır

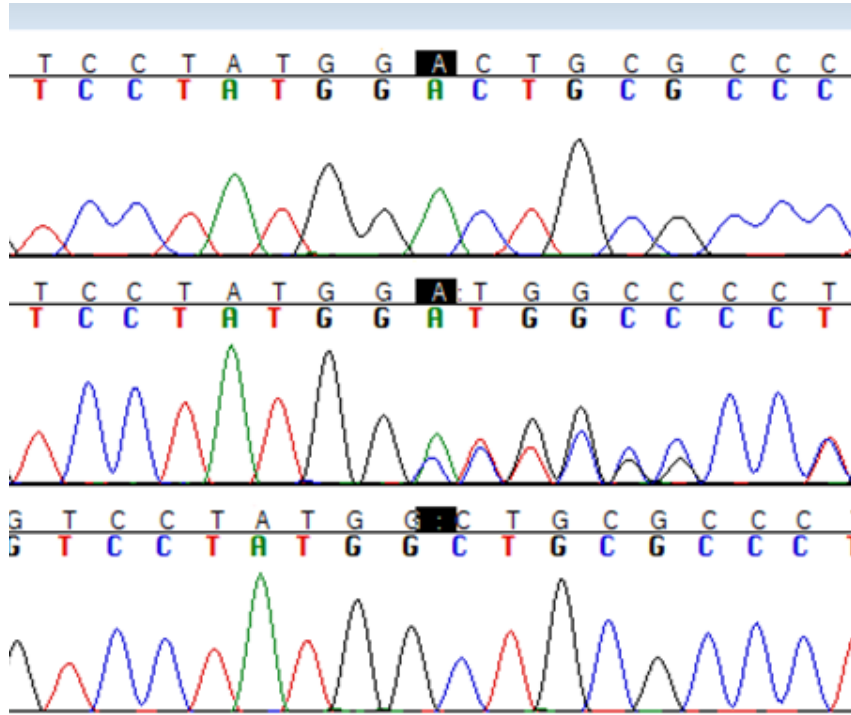
Aminoasit no	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Triplet	GGA	GGA	AAG	AGA	GAT	GCC	GAA	AAT	TTG	ATT
Aminoasit	Gly	Gly	Arg	Arg	Asp	Ala	Glu	Asn	Leu	Ile

**Tablo 1.b.** *GNRHI* 33-42. aminoasit dizilimi, mutant dizi

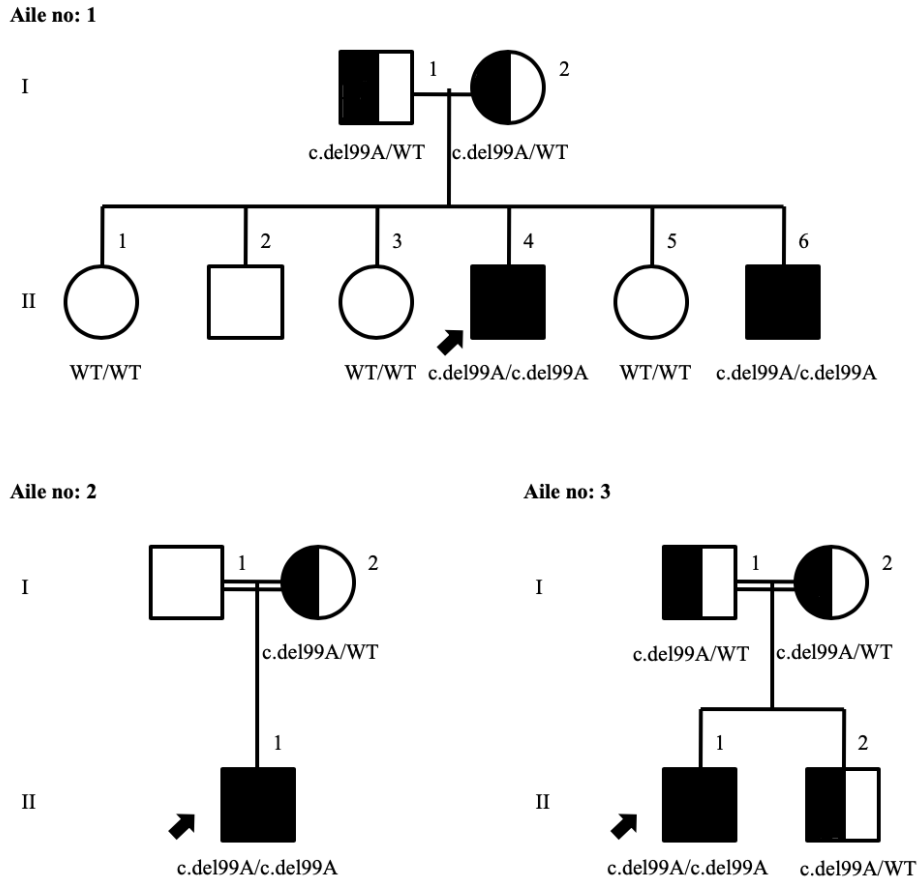
Aminoasit no	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Triplet	GGG	GAA	AGA	GAG	ATG	CCG	AAA	ATT	TGA	-
Aminoasit	Gly	Glu	Arg	Glu	Met	Pro	Lys	Ile	Ter	-

Sanger sekansı ve aile içi segregasyon çalışmaları ile birinci ailede ebeveynlerin delesyon için heterozigot olduğu (c.99delA/WT), genetik çalışması yapılabilen sağlıklı kardeşlerin ise her iki alelinde de mutasyon taşımadığı (wild-type, WT) (WT/WT) tespit edilmiştir. İkinci ailede kan örneğine ulaşılabilen ebeveynin heterozigot olduğu, üçüncü

ailede ise ebeveynler ve sağlıklı kardeşin mutasyonu heterozigot (c.del99A/WT) taşıdığı belirlenmiştir (Şekil 1, 2). Hastaların eksom verilerinde delesyonun bulunduğu alan incelenmesinde, aile 1 (II-4) 21.5-35.4 Mb, aile 2 (II-1) 22.9-41.8 Mb ve aile 3 (II-1) 12.4-52.7 Mb aralığında homozigot bölgeye sahip olduklarını belirlenmiştir.



**Şekil 1.** *GNRHI* c.del99A delesyonu sanger sekans dizilemesi. Üst sıra homozigot normal dizi (WT/WT), orta sıra heterozigot mutant dizi (c.del99A/WT), alt sıra homozigot mutant dizi (c.del99A/c.del99A) gösterilmektedir



**Şekil 2.** c.99delA mutasyon segregasyonunun aile ağacı üzerinde gösterimi. Yuvarlak şekiller kadın, kareler erkeği temsil etmektedir. İçi tamamen taranmış şekiller delesyonu homozigot taşıyan bireyleri, yarım taranmış şekiller heterozigot taşıyan bireyleri, ok ise indeks olguyu göstermektedir. Çift çizgi ebeveynler arasında akrabalık olduğunu belirtmektedir

#### IV. TARTIŞMA

Bu çalışmada *GNRHI* geninde yineleyen bir şekilde gözlenen ve IHH kliniğine yol açan c.99delA çerçeve kayması mutasyonu klinik ve moleküler genetik özellikleri açısından incelenmiştir. Çerçeve kayması (frameshift, fs) mutasyonları, mRNA okunmasının standart kurallar dahilinde lokal değişiklikler ile yeniden dizilenmesidir. Bu gibi okuma çerçevesini değiştirebilen olaylar, oldukça nadir görülmesine karşın protein üretimini ciddi düzeyde etkileyebilecek güçtedir [10]. Bir aminoasidi temsil eden kodonun ikinci nükleotidinde başlayan protein translasyonları “+1 çerçeve kayması”, üçüncü nükleotidinde başlayanlar ise “-1 çerçeve kayması” olarak tanımlanmaktadır [11]. Primatların mitokondriyal genomlarında yapılan taksonomik çalışmalarda, +1 çerçeve kayması mutasyonlarının -1’e oranla daha fazla stop kodonu kombinasyonuna sahip olduğu bildirilmiştir

[11,12]. Bu durumdan ortaya çıkan, +1 çerçeve kaymaları yoluyla doğal seleksiyonun optimize edildiği önermesi, +1 mutasyonlarının -1’e göre daha patojenik sonuçları olduğunu düşündürmektedir [12]. IHH kliniğindeki hastalarımızda tespit edilen c.99delA mutasyonu +1 sınıflandırmasına girmektedir. Delesyonun sebep olduğu kayma sonucu yeniden düzenlenen okuma çerçevesinde, mutant bölgeden sekiz aminoasit sonra stop kodonunun (Termination, Ter) erken kodlanmasıyla dizi sonlanmıştır (p.Gly34GlufsTer8) (Tablo 1a,b). Çerçeve kayması mutasyonları sonrası oluşan yeni diziden sentezlenen peptidler çoğunlukla sitotoksik etkidir [11,13]. Bu gibi prematür stop kodonu taşıyan mRNA’lar, zarar verici nitelikteki normal dışı protein üretiminin engellenebilmesi için nonsense-mediated decay (NMD) adlı mekanizma ile elimine edilmektedir [14]. c.99delA mutasyonunun VarSome veritabanı incelenmesi, ACMG/AMP

2015 (The American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology) kriterlerince hastalık yapıcı düzeyde PVS1 (pathogenic, very strong), PM2 (pathogenic, moderate), PP5 (pathogenic, supporting) ile skorlanmış ve delesyonun patojenik olduğu sonucuyla değerlendirilmiştir [15]. *In silico* programlarca çok yüksek ihtimalle NMD mekanizmasını aktive etmesi tahmin edilen c.99delA delesyonunu taşıyan hastalarımızda mutasyonunun bir sonucu olarak ilgili genden protein üretiminin olmaması ve GnRH aktivitesinin total kaybı beklenmektedir. Bu öngörüyle uyumlu olarak literatürdeki her iki c.del99A homozigot mutasyonlu hastada da komplet IHH mevcuttur [4,7]. Benzer şekilde daha sonra tanı koyulan hastalarımız da (Aile 1, II-4; Aile 2, II-1) IHH'nin en ağır klinik belirtisi sayılan inmemiş testis/mikropenis ile başvurmuştur. İnmemiş testis/mikropenis varlığı bu bireylerde hipotalamo-hipofizer-gonadal eksenin embriyonik ve fetal gelişimi sırasında *GNRH1*'in kodladığı GnRH'nin üretiminin ağır bir şekilde azalmış olduğunu telkin etmektedir.

Geçmiş çalışmalarda homozigot c.99delA mutasyonu Chan ve ark. tarafından beyaz Avrupa kökenli bir ailede, Mengen ve ark. tarafından ise Türk kökenli bir ailede (Aile 3, II-1) bildirilmiştir [4,7]. Bu çalışmadaki olgular dahil yayınlanmış bütün c.del99A delesyonlu hastalar dikkate alındığında tüm olguların Avrupa'dan bildirildiği gözlenmektedir. Bu durum, c.99delA delesyonunun atasal olarak ilk kez Avrupa'dan köken almış olabileceği ve ataların birinden doğup Avrupa'da yaşayan nesiller boyunca yayılan eski bir kurucu mutasyonu (founder mutation) temsil etmesinin olasılığını düşündürmüştür [16]. Bu görüşün netleşmesi için haplotip analizi ve bağımlı analizi yöntemleri uygulanabilmektedir. Etkilenmiş bireyler arasında paylaşılan homozigot bölgelerin belirlenmesi esasına dayanan homozigosite haritalaması, otozomal resesif geçişli Mendel hastalıklarına neden olan genlerin tanımlanmasında kullanılan başarılı bir yöntemdir ve ebeveynlerden kalıtılan resesif hastalığa sahip bireylerde polimorfik belirteçlerin genomda taranması ile yapılmaktadır [17]. Tüm eksom sekanslaması tekniğini de kapsayan yeni nesil sekanslama verileri kullanılarak homozigotluk haritası oluşturulup, nedensel olabilecek değişiklikleri içeren bölgeler belirlenebilmektedir [18]. İlgili konumlanma, haritalaması yapılan üç hasta birey için de ortak homozigot bölge kapsamında bulunmaktadır. Ancak her üç hastanın da homozigot alan büyüklükleri, başlangıç ve bitim noktaları birbirinden farklıdır. Bu durumda c.99A delesyonunun ortak bir atadan kaynaklanması yerine aynı pozisyonda tekrarlayan bir mutasyon olabileceğini güçlü bir şekilde düşündürmektedir. Bu gibi belirli noktalara konsantr olmuş mutasyonlar, nükleotid sekansları boyunca

mutasyona yatkın bölge (hotspot) olarak adlandırılan alanların varlığını işaret edebilmektedirler [19].

## V. SONUÇ

*GNRH1* homozigot mutasyonları IHH için halen nadir görülen nedenlerden biridir. Gendeki c.99delA delesyonunun IHH'ye sebep olduğu, çalışmamız ile birlikte toplamda üç farklı etnisitede değişik homozigot haplotip boyutlarıyla gösterilmiştir. Dolayısıyla IHH hastalarında nedensel *GNRH1* taraması yapılırken c.99delA mutasyonu bir hotspot olarak öncelikli bakılması gereken noktaların başında gelmektedir. IHH'de aynı mutasyonların farklı klinik özelliklere neden olabileceği çeşitli kereler bildirilmişken, c. del99A mutasyonuna sahip hastaların hemen hemen aynı derecede ağır bir kliniğe sahip oldukları bu çalışmada gözlenmiştir. Bununla birlikte belirli bir popülasyondaki kurucu mutasyonların ve/veya hotspotların tanımlanması, moleküler tanıya ve ilerleyen dönemlerde genetik danışmanlığa katkıda bulunacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri No: 11364 ve 4579 ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Topaloglu, A.K. (2010). Update on the Genetics of Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism, *J Clin Res Pediatr Endocrinol*, 9, 113-122.
- [2] Chan, Y.M. (2011). A needle in a haystack: mutations in *GNRH1* as a rare cause of isolated GnRH deficiency, *Mol Cell Endocrinol*, 346, 51-56.
- [3] Bouligand, J., Ghervan, C., Tello, J.A., Brailly-Tabard, S., Salenave, S., Chanson, P., Lombes, M., Millar, R.P., Guiochon-Mantel, A., Young, J. (2009). Isolated familial hypogonadotropic hypogonadism and a *GNRH1* mutation, *N Engl J Med*, 360, 2742-2748.
- [4] Chan, Y.M., de Guillebon, A., Lang-Muritano, M., Plummer, L., Cerrato, F., Tsiaras, S., Gaspert, A., Lavoie, H.B., Wu, C.H., Crowley, Jr. W.F., Amory, J.K., Pitteloud, N., Seminara, S.B. (2009). *GNRH1* mutations in patients with idiopathic hypogonadotropic hypogonadism, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 106, 11703-11708.
- [5] Maione, L., Albarel, F., Bouchard, P., Gallant, M., Flanagan, C.A., Bobe, R., Cohen-Tannoudji, J., Pivonello, R., Colao, A., Brue, T., Millar, R.P., Lombes, M., Young, J., Guiochon-Mantel, A., Bouligand, J. (2013). R31C *GNRH1* mutation and congenital hypogonadotropic hypogonadism, *PLoS One*, 8, e69616.

- [6] Bouligand, J., Ghervan, C., Trabado, S., Brailly-Tabard, S., Guiochon-Mantel, A., Young, J. (2010). Genetics defects in GNRH1: a paradigm of hypothalamic congenital gonadotropin deficiency, *Brain Res*, 1364, 3-9.
- [7] Mengen, E., Tunc, S., Kotan, L.D., Nalbantoglu, O., Demir, K., Gurbuz, F., Turan, I., Seker, G., Yuksel, B., Topaloglu, A.K. (2016). Complete Idiopathic Hypogonadotropic Hypogonadism due to Homozygous GNRH1 Mutations in the Mutational Hot Spots in the Region Encoding the Decapeptide, *Horm Res Paediatr*, 85, 107-111.
- [8] Beranova, M., Oliveira, L.M., Bedecarrats, G.Y., Schipani, E., Vallejo, M., Ammini, A.C., Quintos, J.B., Hall, J.E., Martin, K.A., Hayes, J.F., Pitteloud, N., Kaiser, U.B., Crowley, Jr.W.F., Seminara, S.B. (2001). Prevalence, phenotypic spectrum, and modes of inheritance of gonadotropin-releasing hormone receptor mutations in idiopathic hypogonadotropic hypogonadism, *J Clin Endocrinol Metab*, 86, 1580-1588.
- [9] Kopanos, C., Tsiolkas, V., Kouris, A., Chapple, C.E., Albarca Aguilera, M., Meyer, R., Massouras, A. (2018). VarSome: The Human Genomic Variant Search Engine, *Bioinformatics*, DOI 10.1093/bioinformatics/bty897.
- [10] Gupta, A., Singh, T.R. SHIFT: server for hidden stops analysis in frame-shifted translation, *BMC research notes*, 6, 68.
- [11] Seligmann, H., Pollock, D.D. (2004). The ambush hypothesis: hidden stop codons prevent off-frame gene reading, *DNA Cell Biol*, 23, 701-705.
- [12] Singh, T.R. (2013). Mitochondrial Genomes and Frameshift Mutations: Hidden Stop Codons, their Functional Consequences and Disease Associations, *Journal of Clinical & Medical Genomics*, 1.
- [13] Singh, T.R., Pardasani, K.R. (2009). Ambush hypothesis revisited: Evidences for phylogenetic trends, *Comput Biol Chem*, 33, 239-244.
- [14] Holbrook, J.A., Neu-Yilik, G., Hentze, M.W., Kulozik, A.E. (2004). Nonsense-mediated decay approaches the clinic, *Nat Genet*, 36, 801-808.
- [15] Richards, S., Aziz, N., Bale, S., Bick, D., Das, S., Gastier-Foster, J., Grody, W.W., Hegde, M., Lyon, E., Spector, E., Voelkerding, K., Rehm, H.L., A.L.Q.A. Committee, (2015). Standards and guidelines for the interpretation of sequence variants: a joint consensus recommendation of the American College of Medical Genetics and Genomics and the Association for Molecular Pathology, *Genetics in medicine : official journal of the American College of Medical Genetics*, 17, 405-424.
- [16] Charoute, H., Bakhchane, A., Benrahma, H., Romdhane, L., Gabi, K., Rouba, H., Fakiri, M., Abdelhak, S., Lenaers, G., Barakat, A. (2015). Mediterranean Founder Mutation Database (MFMD): Taking Advantage from Founder Mutations in Genetics Diagnosis, Genetic Diversity and Migration History of the Mediterranean Population, *Hum Mutat*, 36, E2441-2453.
- [17] Botstein, D., Risch, N. (2003). Discovering genotypes underlying human phenotypes: past successes for mendelian disease, future approaches for complex disease, *Nat Genet*, 33 Suppl, 228-237.
- [18] Wakeling, M.N., Laver, T.W., Wright, C.F., De Franco, E., Stals, K.L., Patch, A.M., Hattersley, A.T., Flanagan, S.E., Ellard, S., D.D.D. Study. (2019). Correction: Homozygosity mapping provides supporting evidence of pathogenicity in recessive Mendelian disease, *Genetics in medicine : official journal of the American College of Medical Genetics*, 21, 766.
- [19] Rogozin, I.B., Pavlov, Y.I. (2003). Theoretical analysis of mutation hotspots and their DNA sequence context specificity, *Mutat Res*, 544, 65-85.

# Coğrafi Sosyo-Ekonomik Mahrumiyetin ve Hava Kirleticilerinin Bebek Doğum Ağırlığı Üzerindeki Etkisi

## Impacts of Geospatial Socio-Economic Deprivation and Air Pollutants on Infant Birth Weight

Nur H. ORAK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

### Öz

Klasik çevresel sağlık risk tahmin yöntemleri, insan-çevre sistemlerinin döngüsellğine çözüm getirmede ve çevresel kirletici değişkenlerinin insan sağlığı üzerindeki olası etkilerinin incelenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada Bayesian yöntemleri kullanarak nitrojen dioksit (NO<sub>2</sub>) maruziyeti, partikül madde (PM), sosyoekonomik mahrumiyet ve bebek doğum ağırlığı arasındaki ilişkinin New York şehri örneği üzerinde araştırılması hedeflenmiştir. Epidemiyolojide NO<sub>2</sub> ve PM<sub>2.5</sub> maruziyetinin olası karıştırıcı etkenler (ör. vücut kitle indeksi) üzerindeki etkilerini göz önüne alabilmek için, ve NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> ve değişkenlerin (ör. sosyoekonomik mahrumiyet) teorik etkileri arasında iki yönlü ilişkinin incelenmesi için Bayesian Ağ (BA) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen PM-NO<sub>2</sub>-BA etki modeli ile farklı türdeki bilgileri biraraya getirerek risk analizi gerçekleştirilmiştir. Bu makalede sunulan modelleme yaklaşımı halk sağlığına etki eden risk faktörleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin değerlendirilmesi konusunda önemli katkıda bulunacaktır. Düşük Vücut Kitle İndeksine (VKI) sahip annelerin hava kirleticilerine maruziyeti ve buna bağlı olarak bebek doğum ağırlığı riskinin etkilendiği gözlenmiştir. Normal VKI'ne sahip annenin yüksek NO<sub>2</sub> konsantrasyonuna maruziyeti sonucunda düşük doğum riski %7 iken düşük VKI'ne sahip annenin yüksek NO<sub>2</sub> kirliliğine maruz kalması sonucunda bu risk %36'ya çıkmaktadır. Farklı sosyo-ekonomik mahrumiyet indeksine (SMI) ait vakalar kirleticilere maruziyet sonucunda farklı risklerle karşılaşmaktadır. NO<sub>2</sub> maruziyetine benzer olarak PM<sub>2.5</sub> maruziyeti düşük SMI'da yüksek risk (%27) oluştururken daha yüksek indekse sahip grupta bu riskin azaldığı elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çevresel istatistik, risk analizi, maruziyet-sağlık ilişkisi, halk sağlığı, hava kirliliği, sosyoekonomik mahrumiyet

### Abstract

Conventional environmental health risk estimation methods are insufficient to solve the cyclicity of human-environmental systems and to examine the possible effects of environmental pollutant variables on human health. In this study, it is aimed to investigate the relationship between nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) exposure, particulate matter (PM) exposure, socioeconomic deprivation and infant birth weight by using Bayesian methods on the New York City example. In order to consider the effects of NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> exposure on possible confounding factors in epidemiology, and to investigate the two-way relationship between theoretical effects of NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> and variables (e.g. socioeconomic deprivation), Bayesian Network (BN) model has been developed. Risk analysis was carried out by combining different types of information based on literature knowledge and data. The proposed modeling approach presented in this article will make a significant contribution to assessing the nonlinear relationship between risk factors affecting public health. It was observed that mothers with Low Body Mass Index (BMI) were exposed to air pollutants and consequently the risk of infant birth weight was affected. While the risk of low birth is 7% as a result of exposure to high NO<sub>2</sub> concentration of the mother with normal BMI, this risk increases to 36% as a result of the exposure of the mother with low BMI to high NO<sub>2</sub> pollution. Cases of different socio-economic deprivation index (SMI) face different risks as a result of exposure to pollutants. Similar to NO<sub>2</sub> exposure, PM<sub>2.5</sub> exposure poses a high risk (27%) in low SMI, whereas this risk decreases in the higher index group.

**Keywords:** Environmental statistics environmental risk analysis, exposure-health relationship, public health, air pollution, socioeconomic deprivation

## I. GİRİŞ

Çevresel sağlık araştırmalarında sosyo-ekonomik etkenlerin ve çevresel kirleticilere maruziyetin entegre edilme ihtiyacı uzun süredir bilinmektedir [1, 2]. Aynı zamanda günümüzde gebelik sürecinde hava kirleticilerine maruziyetin olumsuz etkilerini inceleyen araştırma sayısı artmaktadır [3]. Birçok literatür çalışması hava kirliliğinin doğum sürecini ve sonuçlarını olumsuz etkilediğini, buna sebep olan biyolojik mekanizmayı ve sistematik oksidatif stres etkenlerini ortaya koymaktadır [4]. Ancak az sayıda çalışma bu korelasyon ile ilişkili sosyo-ekonomik etkenleri incelemektedir. Bunun sebebi kirleticilere maruziyetin tahmin yöntemleri veya ölçüm hatası [5] gibi farklı ispat aşamalarında belirsizliklerin olmasıdır. Ayrıca, karıştırıcı etkenlerin analiz eksikliği de bu tutarsızlığa neden olmaktadır. Mevcut çalışmalar arasında ortak amaçlardan biri sosyo-ekonomik mahrumiyet ile coğrafi kirlenme maruziyeti arasındaki korelasyonun etkin bir şekilde incelenmesidir [6]. Bireysel sosyo-ekonomik düzeyin (SED) dikkate alındığı birçok çalışma, coğrafi mahrumiyetin hamilelik sonuçlarına olumsuz etki ettiğini göstermektedir [7]. Ancak, bu çalışmaların çok azı hava kirleticilerine maruziyetin ve gebelik gelişimi sonuçları arasındaki diferansiyel ilişkiyi sosyo-ekonomik düzlemde incelemiştir. Bu çalışma kapsamında Bayesian yöntemleri kullanılarak sosyo-ekonomik etkenler, hava kirliliği parametreleri ve doğum ağırlığı arasındaki doğrusal olmayan ilişki olasılıksal olarak incelenmiştir.

Hızlı ve düzensiz şehirleşme hava kirleticileri ile insan sağlığı arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin incelenmesini kritik hale getirmiştir. Tıp ve çevre bilimlerinin uyguladığı yöntemler sınırlı olmakla birlikte, çevresel boyutun analizinde yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada örnek bir durum üzerinden çevresel ve sağlıksal etkenleri entegre edecek istatistiksel bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Hava kirleticilerinin halk sağlığı üzerinde uzun süreli kritik etkileri bulunmaktadır. Bu risk ile ilişkili etkilerin en aza indirgenbilmesi için öncelikle oluşma sürecinin ve etkenler arasındaki korelasyonun tespiti gerekmektedir. Sosyo-ekonomik düzeyin tanımlanması ve hesaplanmasında birçok farklı görüş bulunmaktadır. Temel etkenler arasında ırk, eğitim seviyesi ve gelir düzeyi sayılabilir. Ancak her çalışmada SED' e etki eden değişkenler farklıdır, bu nedenle fikir birliği sağlayacak bir tespit metodu önermek bugüne kadar mümkün olmamıştır. SED değişkenlerinin önemi ve risk oluşumuna katkısı senaryo bazında değişmektedir. Bu problem holistik bir yaklaşımın gerekliliğini göstermektedir.

Çevre sağlığı araştırmalarında kimyasal ve kimyasal olmayan etkenlerin insan sağlığı üzerine olan birleşik etkisine olan ilgi uzun bir süredir artmaktadır [1, 2, 8, 9]. Yeni

araştırma sonuçları kronik psikososyal stresin, kirleticilerin insan sağlığı üzerine etkisini modifiye eden bir etken olduğunu bir takım epidemiyolojik ve toksikolojik kanıtlar ile ortaya koymaktadır [10, 11]. Araştırmacıların sosyal ve fiziksel çevre arasındaki ilişkiyi anlayabilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Psikososyal stres genel olarak sosyal stres faktörlerine (olay, durum, fiziksel veya psikolojik bir etken ile karşılaşılması) maruziyet sonucu gelişir. Bireylerin kaldırabileceğinin ötesinde stres faktörüne düzenli olarak maruz kalması sonucunda stres kronik hale gelir. Kronik psikososyal stres olumsuz duygu durumları ile ilişkilidir, bu durum immün, endokrin, ve metabolik fonksiyonlara etki eder [12]. Bu fizyolojik değişimler bireylerin kimyasal maruziyetlere (örn. kirleticiler, patojenler) olan tepkisine etki edebilir ve bu grupların birçok hastalığa olan maruziyet riskini artırabilir [13]. Bunun bir sonucu, kronik olarak sosyal stres faktörlerine maruz kalan birey ve toplumlar çevresel kirleticilerin olumsuz sağlık etkilerine daha hassas olabilir [14]. Stres faktörlerinin ölçümü öncelikli olarak bireysel anketlere veya stresli olayların tahmini için kullanılan biomarker verisine [14], stres oluşumuna sebep olabilecek durumlara [15], ve akıl sağlığına etki eden kronik stres faktörlerine bağlıdır [16].

Kronik psikososyal stresin değerlendirilmesine odaklanan birçok epidemiyolojik çalışma bireysel seviyede stresi ölçemediğinden toplumsal indikatörleri kullanmaktadır (suç oranı, fakirlik seviyesi, muhit güvenliği, finansal stres gibi). Ancak her bireyin toplumsal stres faktörlerine karşı vereceği tepki farklıdır. Sosyal ve çevresel etkenlerin birleşik sonuçlarını inceleyen birçok epidemiyolojik çalışma SED ve demografik ölçümleri kullanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak SED indikatörlerinin sosyal ve psikososyal stres maruziyetini ifade etmede yeterli olması konusunda belirsizlik doğmaktadır. Çok sayıda araştırma bölgesel mahrumiyetin ve SED'in doğum sonuçlarına olumsuz etki ettiğini göstermektedir [17]. Ancak bu çalışmalardan pek azı hava kirleticilerine maruziyet ile bebek doğum ağırlığı arasındaki ilişkiyi incelemiştir.

Bu çalışmada gebelik sürecinde NO<sub>2</sub>, partikül madde PM<sub>2.5</sub> maruziyeti ve coğrafi sosyo-ekonomik mahrumiyetin bebek gelişimine etkisini incelemek için istatistiksel bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu yöntem tıbbi bilimlerde hasta durum analizinin gerçekçi bir şekilde yapılmasında kullanılabilecektir. Bu entegre yaklaşım hava kirleticilerinin ve farklı SED değişkenlerinin kümülatif etkisini değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmada test edilmesi ve cevaplanması planlanan hipotez ve soruların başlıcaları: Ayrı ayrı ve birleşik olarak NO<sub>2</sub> ve PM<sub>2.5</sub>'in hangi konsantrasyon seviyeleri doğum



ağırlığı üzerinde en yüksek riski oluşturmaktadır, değişkenler (doğum ağırlığı, annenin eğitim seviyesi, sağlık güvencesi, gibi) ve stres faktörleri arasındaki olasılıksal ilişki nedir, hangi senaryolar en yüksek riski oluşturur, bu etkenler ile ilgili olarak hangi anne adayları grubu hamilelik sonucunda en yüksek düşük riski ile karşı karşıyadır.

## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Gebelik sürecinde NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> maruziyeti ve coğrafi sosyo-ekonomik mahrumiyetin bebek gelişimine etkisini incelemek için detaylı veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu araştırmanın gerçekleştirilebilmesi için ABD'deki New York Şehri örnek olarak incelenmiştir. Bu şehrin seçilmesinin nedeni gerekli veri bankasının bulunmasıdır. Bu çalışmada Shmool ve diğ. (2015) [18] tarafından raporlanan ve 2008-2010 yılları arasında dört mevsim süresince New York City Community Air Survey (NYCCAS) tarafından toplanan yüksek çözünürlüklü coğrafi hava kirliliği verisi ve 2008-2010 yılları arasında New York Şehri hastane doğum kayıtlarını (n=243,853) özetleyen sonuçlar kullanılarak (Tablo 1) Koşullu Olasılık Tabloları (KOT) oluşturulmuştur. Buradaki amaç mekansal mahrumiyetin tanımlanabilmesi için doğum sonuçlarıyla ilişkili coğrafi tabanlı değişkenlerin kategorize edilmesidir.

Bu çalışmada kullanılan değişkenler: doğum ağırlığı, annenin eğitim seviyesi, sağlık güvencesi durumu, ırk, annenin yaşı, doğum öncesi vücut kitle indeksi, gebelik süresince sağlık hizmeti alma durumu, toplam gerçekleştirdiği doğum sayısı, gestasyonel yaş (hafta), yıl, konutsal bölgedeki NO<sub>2</sub> konsantrasyonu (ppb), konutsal bölgedeki PM<sub>2.5</sub> konsantrasyonudur (µg/m<sup>3</sup>).

Sosyo-ekonomik mahrumiyet indeksi (SMI) referans olarak kullanılan Shmool ve diğ. (2015) çalışmasına bağlı olarak modellenmiştir. Referans çalışmanın komposit indeksin hesaplanmasında baz aldığı yaklaşım Messer ve diğ. (2006) [19] çalışmasında belirtilen coğrafi tabanlı mahrumiyet indeksi hesabıdır. Bu indeksin amacı şehrin farklı bölgelerindeki heterojen patenleri yeni bir jeostatistik yaklaşım ile kategorize etmektir.

Bayesian modelleri GeNIe (Graphical Network Interface) programı ile geliştirilmiştir. GeNIe son yirmi yılda geliştirilen Bayesian tabanlı bir network programıdır [20]. Bayesian Ağları 1980'lerin sonlarında değişkenler arasındaki olasılık ilişkisini anlamak için olasılıklı bağımlılık modellerini yönlendirilmiş asiklik grafiklerle (DAG) görselleştirmek için geliştirilmiştir [21, 22]. BA'lar güçlü karar verme araçlarıdır ve diğer modelleme yaklaşımlarına kıyasla nispeten basittir [23]. Değişkenler arasındaki

bağlantıların karakterizasyonu, hem nicel hem de nitel bilgilerin kullanılmasına izin verecek şekilde deterministikten ziyade, tipik olarak olasılıksaldır. KOT'lar üst hücrelerdeki olası her bir durum kombinasyonu için alt hücredeki her olası durumun olasılığını verir. Bayes kuralı (Denk. 1) aşağıdaki her bir düğümün inanç olasılığını sürekli olarak günceller [24]:

$$p(X = x|Y = y) = \frac{p(X = x, Y = y)}{p(Y = y)} = \frac{p(X = x)p(Y = y|X = x)}{\sum_{x'} p(X = x')p(Y = y|X = x')} \quad (1)$$

Burada X olasılığını hesaplamak istediğimiz olay, Y ise X ile ilgili olan yeni kanıtlardır. İncelenen senaryoda X ve Y'nin aldığı değerler x ve y olarak belirtilmiştir. p(X|Y) posterior olarak adlandırılır, bu bizim tahmin etmeye çalıştığımız koşullu değerdir. p(Y|X) ilk hipotezimizi gözönüne aldığımızda yeni kanıtların gözlenme olasılığıdır. İlk olarak konsept model oluşturulmuştur. Konsept model iki önemli aşamadan oluşmaktadır: ağ değişkenlerinin belirlenmesi ve bu değişkenleri kullanarak model iskeletinin (etki diagramı) oluşturulması. Bayesian Ağ Modelleri sebep-sonuç ilişkisini etki diagramları üzerinden tanımladığı için bu aşama model oluşturmanın önemli bir aşamasıdır. Konsept model oluşturma konusunda birçok farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım uzman görüşü ile veri kaynaklı elde edilen bilginin birleştirilmesidir. Buna hibrid model de denilebilir. Veri kaynaklı etkileşim bilgilerinin elde edilmesi konusunda birçok farklı algoritma kullanılmıştır. Bunlar arasında Bayesian Search, PC, Essential Graph Search, Greedy Thick Thinning, Tree Augmented Naive Bayes (TAN), Augmented Naive Bayes, ve Naive Bayes bulunmaktadır. Modelin bu aşamasında birçok iterasyon adımı gerçekleştirilmiştir.

Etki diagramı oluşturulduktan sonra Bayesian Ağ modelindeki her bir hücre için KOT'lar referans çalışmaya göre tahmin edilir, başka bir deyişle BA modelindeki her bir hücre için gerekli olan koşullu olasılık tabloları veri kaynaklı öğrenilir. Model tamamlandıktan sonra Şekil 1'de örneklendirildiği şekilde BA modeli oluşturulmuş olur. Bu model ile çeşitli senaryolar incelenerek doğum ağırlığı üzerindeki kümülatif etkisi incelenmiştir. Kirletici konsantrasyonlarının farklı risk faktörleri ile biraraya gelerek oluşturduğu doğum ağırlığı riski incelenmiştir. Bu sayede düşük yapma riski yüksek olan anne adaylarının dahil olduğu grup olasılıksal olarak belirlenmiştir.

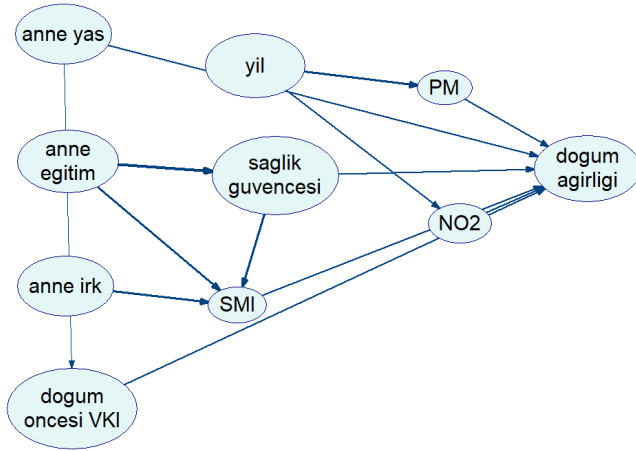
**Tablo 1.** Popülasyon karakteristikleri (Shmool ve diğ. 2015 [18] çalışmasından uyarlanmıştır). Parantez içindeki değerler ilgili kategorideki hasta sayısıdır.

	<b>Çalışma popülasyon n=243,853</b>
<b>Doğum ağırlığı (g)</b>	% (n)
<1500	0,04 (88)
1500-2499	2,6 (6402)
2500-3999	90,3 (220,156)
4000	7,1 (17,207)
<b>Anne eğitim düzeyi (yıl)</b>	% (n)
<9	8,1 (19731)
9-11	17,6 (42819)
12 (lise)	23,9 (58286)
13-15	21,9 (53376)
16 (lisans)	16,3 (39793)
>16	12,2 (29857)
<b>Sosyal güvence</b>	
Evet	61,1 (149106)
Hayır	38,9 (94,747)
<b>Anne ırk</b>	
ABD doğumlu – beyaz	19,4 (47233)
Yabancı-beyaz	9,4(22912)
ABD doğumlu-siyahi	12,0 (29339)
Yabancı-siyahi	9,8 (23856)
ABD doğumlu – hispanic	12,4 (30346)
Yabancı-hispanic	21,8 (53248)
ABD doğumlu-Asyalı	1,2 (2899)
Yabancı-Asyalı	14,0 (34,020)
<b>Maternal (anne) yaş</b>	%(n)
<20	6,6 (16108)
20-25	20,8 (50608)
25-30	26,6 (64814)
30-35	26,4 (64481)
35-40	15,3 (37246)
≥40	4,4 (10596)
<b>Doğum öncesi Vücut Kitle İndeksi (VKI)</b>	
<18,5 (düşük)	5,5 (13445)
18,5<25 (normal)	54,3 (132442)
25<30 (yüksek)	23,7 (57842)
≥30 (obez)	16,5 (40124)
<b>Veri Yılı</b>	
2007	
2008	
2009	
2010	
Yerleşim birimine yakın ortalama NO <sub>x</sub> (ppb)	26,8 (5,3)
Yerleşim birimine yakın ortalama PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	11,8 (1,9)

Belirtilen bilgilere dayanarak konsept Bayesian ağ modeli Şekil 1’de gösterildiği formuyla oluşturulmuştur. BA modelinde 10 (on) adet hücre bulunmaktadır. Her bir hücre farklı sayıda kategorilere ayrılmıştır. “anne yaş” hücresi 6 kategoriye (20 yaş ve altı, 20-25 yaş aralığı, 25-30 yaş

aralığı, 30-35 yaş aralığı, 35-40 yaş aralığı, 40 yaş ve üzeri), “anne eğitim” hücresi 8 kategoriye (9 yıldan az, 9-11 yıl arası, 12 yıl/lise, 13-15 yıl arası, 16 yıl/lisans, 16 yıl üzeri eğitim), “anne ırk” hücresi beş kategoriye (beyaz, ABD doğumlu siyahi, ülke dışı doğumlu siyahi, hispanic, asyalı),

“SMI” hücresi üç kategoriye (<1,5, 1,5-2,5 aralığı, >2,5), “PM” hücresi 4 kategoriye (<10 µg/m<sup>3</sup>, 10-11 µg/m<sup>3</sup> arası, 11-12 µg/m<sup>3</sup> arası, >12 µg/m<sup>3</sup>), “NO<sub>2</sub>” hücresi dört kategoriye (<23 ppb, 23-26 ppb, 26-29 ppb, >29 ppb), “dogum oncesi VKI” hücresi dört kategoriye (zayıf, normal, aşırı kilolu, obez), hedef hücre olan “dogum araligi” hücresi dört kategoriye (<3040 g, 3040-3320 g, 3320-3625 g, >3625) ayrılmıştır.



Şekil 1. Konsept Bayesian Ağ Modeli

İkinci adım olarak her bir hücre için referans çalışmada verilen ortalama verilere ve literatürden elde edilen bilgilere göre KOT'lar oluşturuldu. EK-Şekil 1’de her bir hücre için oluşturulan KOT'lara ait histogramlar gösterilmiştir. Şekil 3, KOT'lar ile öğrenilmiş revize Bayesian ağ modelini göstermektedir.

Model tarafından sağlanabilecek öngörü türlerini vurgulamak için çeşitli alternatif senaryolar incelenmiştir. Bunlar:

- Farklı SMI kategorilerinin doğum ağırlığını nasıl etkilediği
- Artan hava kirletici konsantrasyonlarının (PM<sub>2,5</sub> ve NO<sub>2</sub>) doğum ağırlığını nasıl etkilediği
- Doğum öncesi annenin VKI'nin doğum ağırlığını nasıl etkilediği

Bu amaçla simüle edilen yirmidört senaryo Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Simüle edilen yirmidört senaryo (Düşük ve yüksek konsantrasyon ifadelerinin solundaki maddeler simülasyon numaralarıdır.)

		SMI Senaryo					
		s1		s2		s3	
VKI Senaryo	Düşük	NO <sub>2</sub>	PM	NO <sub>2</sub>	PM	NO <sub>2</sub>	PM
			1) düşük s1_below_23 2) yüksek s4_29_up	13) düşük s1_below_10 14) yüksek s4_12_up	5) düşük s1_below_23 6) yüksek s4_29_up	17) düşük s1_below_10 18) yüksek s4_12_up	9) düşük s1_below_23 10) yüksek s4_29_up
	Normal	3) düşük s1_below_23 4) yüksek s4_29_up	15) düşük s1_below_10 16) yüksek s4_12_up	7) düşük s1_below_23 8) yüksek s4_29_up	19) düşük s1_below_10 20) yüksek s4_12_up	11) düşük s1_below_23 12) yüksek s4_29_up	23) düşük s1_below_10 24) yüksek s4_12_up

Model tamamlandıktan sonra hedef (H) hücre olarak “dogum araligi” hücresi belirlenmiştir ve modele duyarlılık testi GeNIe tarafından dahili sağlanan test özelliği ile yapılmıştır. Türev, hedef hücrenin sonsal (posterior) olasılık H’ın senaryodaki p parametresine olan ilk türevinin aldığı değerdir. Sonsal olasılık, aşağıdaki lineer rasyonel fonksiyonel form ile ifade edilir<sup>20</sup>:

$$H = \frac{a \times p + b}{c \times p + d}$$

Duyarlılık analizi algoritması dört sabiti hesaplar; a, b, c ve d. Dört sabit hesaplandıktan sonra türev alınarak hedef sonsal olasılık hesap edilir. Türevin formülü:

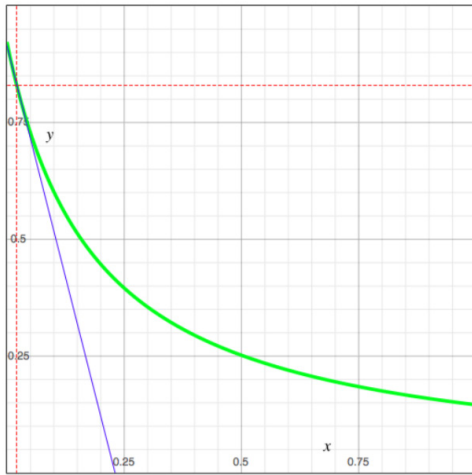
$$D = \frac{a \times d - b \times c}{(c \times p + d)^2}$$

Payda pozitif olduğundan türevin işareti p’nin tüm değerleri için sabittir ve fonksiyon monotonik veya sabittir. İlk denklemden p olasılığına göre p’nin bütün aralıkta değişmesiyle sonsal olasılığın ne kadar değişeceği hesaplanır. Aralık şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$p_1 = \frac{b}{d}$$

$$p_2 = \frac{a+b}{c+d}$$

$a \times d - b \times c$  terimi hangi değerin ( $p_1$  ve  $p_2$ 'den) minimum ve maksimum olduğuna karar verir. Şekil 2 hassasiyet testinin nasıl uygulandığını göstermektedir. X-ekseni  $p$ 'nin aldığı değeri, y ise H hedef hücrenin seğili kategorisinin aldığı sonsal olasılığı göstermektedir. Yeşil grafik çizgisi çalışmada baz alınan parametrenin sonsal olasılığını, mavi çizgi ise türevini ifade etmektedir.

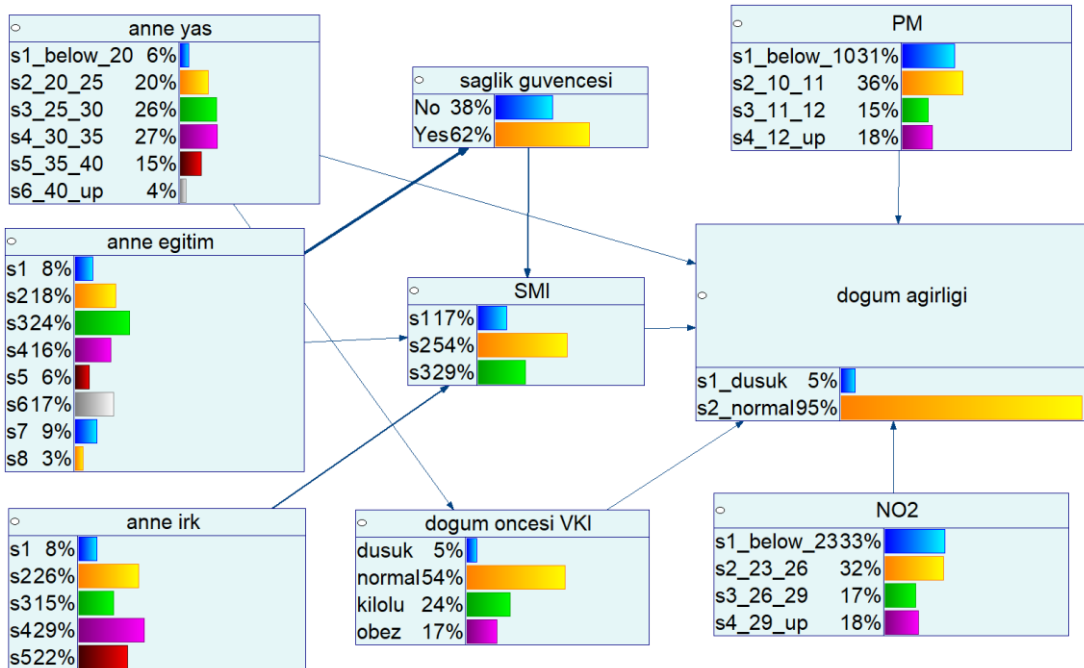


Şekil 2. GeNiE duyarlılık testi örneği [20]

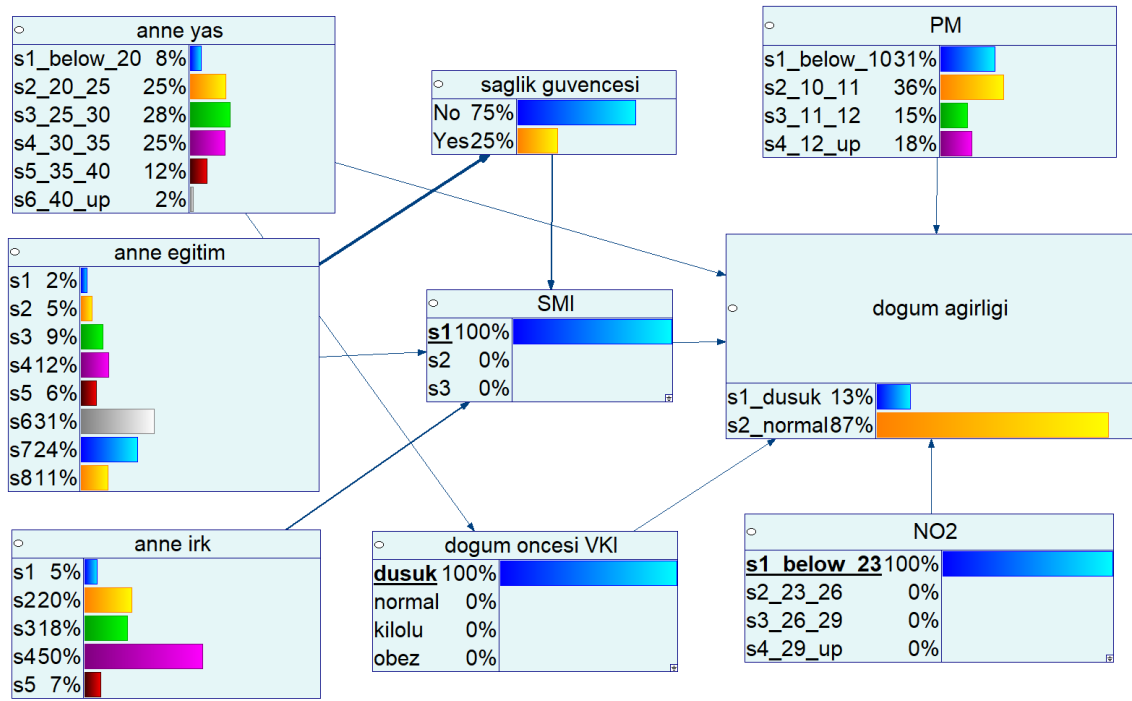
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3'te öğrenilmiş revize Bayesian Ağ modeli gösterilmiştir. *Anne yas* ve *anne eğitim* değişkenlerinde normal dağılım gözlenmektedir. Düşük olarak belirtilen 2500 g ve altı doğum ağırlıklarının ortalama olasılığı %5 olarak belirtilmiştir. Bu ağ modelini baz alarak yapılan yirmidört simülasyonun ilki Şekil 4'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere düşük VKI'ya sahip düşük SMI'ndeki annenin 23 ppb altında  $NO_2$  kirliliğine maruz kalması durumunda bebek doğum ağırlığının düşük aralıkta olma riski %5'ten %13'e çıkmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için benzer şekilde Tablo 2'de belirtilen yirmidört senaryo simüle edilmiştir.

Tablo 3 bütün senaryolar için simüle edilen sonuçları özetlemektedir. Annenin düşük VKI'ne sahip olması hava kirleticilerine maruziyetini ve buna bağlı olarak bebek doğum ağırlığı riskini etkilemektedir. S1 indeksindeki normal VKI'ne sahip annenin düşük  $NO_2$  konsantrasyonuna maruz kalması sonucunda düşük doğum ağırlığı riski %2 iken, aynı şartlarda düşük VKI'ne sahip olması riski %13'e çıkarmaktadır. VKI'nin etkisi yüksek  $NO_2$  konsantrasyonuna maruziyette daha önemli boyutta görülmektedir. Normal VKI'ne sahip annenin yüksek  $NO_2$  konsantrasyonuna maruziyeti sonucunda düşük doğum riski %7 iken düşük VKI'ne sahip annenin yüksek  $NO_2$  kirliliğine maruz kalması sonucunda bu risk %36'ya çıkmaktadır. Diğer iki SMI kategorisinde de yaklaşık olarak benzer trendler görülmektedir. S2 indeksinde yüksek  $NO_2$  maruziyeti normal



Şekil 3. Koşullu Olasılık Tabloları ile öğrenilmiş revize Bayesian Ağ Modeli (Her bir kategori için olasılıklar yüzde olarak gösterilmiştir, her bir hücrenin olasılıklarının toplamı 100 etmektedir.)



Şekil 4. Senaryo 1-Bayesian Ağ Modeli

VKI'ne sahip annede %4 düşük doğum riski oluştururken bu risk düşük VKI'de %17'e çıkmaktadır. S3 indeksinde de benzer bir ilişki görülmektedir. Düşük VKI'nin  $PM_{2.5}$  konsantrasyonuna maruziyet sonucunda normal VKI'ne sahip adaylara göre düşük doğum ağırlığı riskinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin s1 indeksindeki bir annenin normal VKI'ya sahip olması durumunda düşük  $PM_{2.5}$  konsantrasyonu maruziyeti sonucunda düşük doğum ağırlığı riski %5 iken, düşük VKI'ya sahip olması durumunda bu risk %27'e çıkmıştır. Ancak aynı VKI'ne sahip annede artan PM maruziyetinin doğum ağırlığı riskini artırdığı gözlenmemiştir. Farklı SMI kategorilerini karşılaştıracak olursak farklı kirleticilere maruziyet ve farklı VKI kategorisine aidiyet etkileri farklılaştırmaktadır, diğer bir deyişle

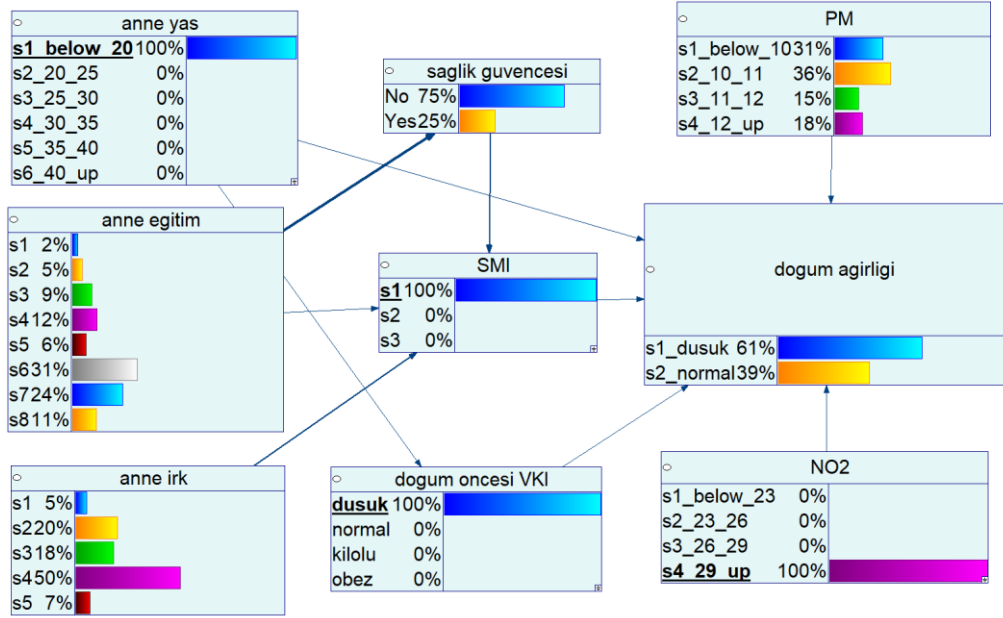
tek bir trend gözlenmemiştir. Örneğin, düşük VKI kategorisine bakacak olursak s1 indeksinde yüksek  $NO_2$  kirleticisine maruz kalma sonucu %36 risk oluşurken bu risk s2'de %17'ye, s3 indeksinde %23'e düşmektedir. Benzer trend düşük kirletici konsantrasyonunda gözlenmemiştir. Normal VKI kategorisinde ise yüksek  $NO_2$  konsantrasyonunda düşük doğum ağırlığı riski artan SMI indeksinde s1-s2 arasında azalma, s2-s3 arasında artış göstermiştir. Ancak s2 ve s3 arasındaki fark istatistiksel olarak belirgin değildir.  $NO_2$  maruziyetine benzer olarak  $PM_{2.5}$  maruziyeti düşük SMI'da yüksek risk (%27) oluştururken daha yüksek indekse sahip grupta bu riskin azaldığı ancak s3'de aynı kaldığı elde edilmiştir. Benzer ilişki yüksek kirletici konsantrasyonunda da elde edilmiştir.

**Tablo 3.** Yirmidört senaryo için simülasyon sonucunda elde edilen düşük doğum ağırlığı olasılıkları (Tablo 2'de belirtilen her bir senaryo numarasının yanında yüzde olarak düşük doğum riski belirtilmiştir)

		SMI Senaryo					
		s1		s2		s3	
		$NO_2$	$PM_{2.5}$	$NO_2$	$PM_{2.5}$	$NO_2$	$PM_{2.5}$
VKI Senaryo	Düşük	1) %13 2) %36	13) %27 14) %18	5) %10 6) %17	17) %16 18) %13	9) %31 10) %23	21) %27 22) %31
	Normal	3) %2 4) %7	15) %5 16) %3	7) %3 8) %4	19) %5 20) %2	11) %8 12) %8	23) %4 24) %9

Şekil 5'te görüldüğü gibi düşük SMI indeksindeki genç anne kategorisi yüksek NO<sub>2</sub> kirliliğine maruz kaldığında en yüksek doğum ağırlığı riskini göstermektedir. Annenin yaşı 20'nin altına düştüğünde kümülatif düşük doğum ağırlığı riski %61'e çıkmaktadır. Aynı şartlarda annenin obez aralığına çıkması durumunda risk neredeyse aynı kalmakta (%60) ancak normal ve kilolu aralığına düşmesi durumunda risk %45'e gerilemektedir. VKI'nın hava

kirleticilerinden etkilenme mekanizmasına ve sonuç olarak doğum ağırlığı riskiyle olan ilişkisi önemlidir. Ayrıca aynı şartlara sahip annenin s3 kategorisine dahil olması durumunda %61'lik risk %17'e gerilemektedir. Bu sonuç sosyal mahrumiyet indeksinin yüksek kirleticilere maruz kalırsa dahili dolaylı oluşturduğu şartlardan dolayı düşük doğum ağırlığı riskini önemli ölçüde pozitif doğrultuda etkilediğini göstermektedir.



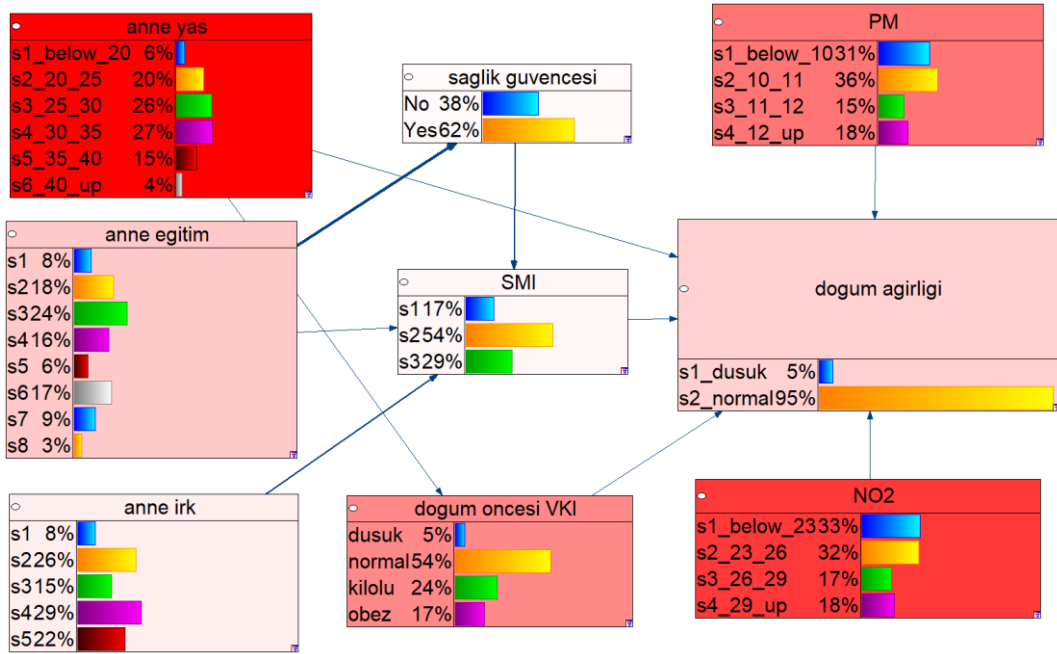
Şekil 5. Senaryo: Anne yas: <20, SMI: s1, doğum öncesi VKI: düşük, NO<sub>2</sub>: >29 ppb

Bu çalışmada duyarlılık analizi ile geliştirilen Bayesian modelin hedef hücrene etki eden en önemli değişkenler tespit edilmiştir. Ancak araştırmanın doğası gereği bir takım kısıtlamalar bulunmaktadır. Referans alınan çalışmada yalnızca bir bebeğe hamile, sigara içmeyen, 37-42 haftayı tamamlayan doğumlar veri olarak kabul edilmiştir. Ayrıca anne adaylarının gündelik yaşam tarzlarıyla ilgili hiçbir ölçüm kullanılmamıştır. Anne adaylarının hamilelik süresince ikamet değiştirmedikleri varsayılmıştır.

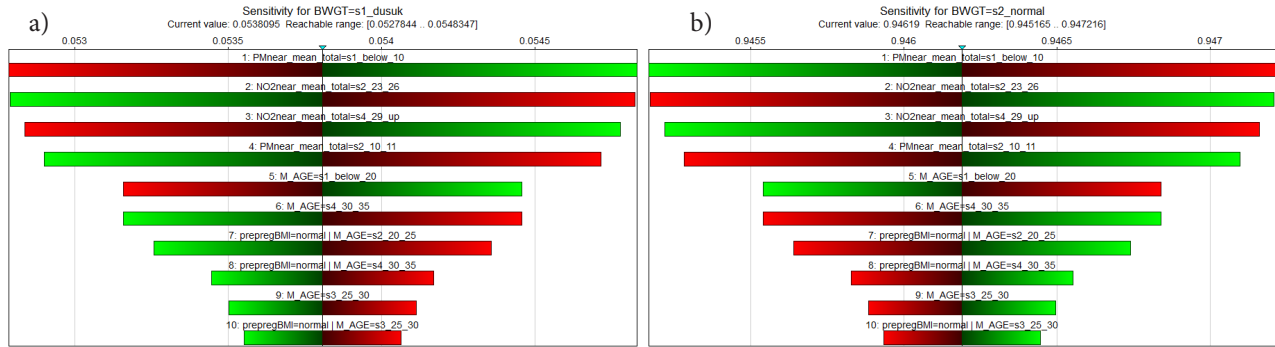
Şekil 6'da hedef hücre olan *dogum ağırlığı*'na etki eden hücrelerin duyarlılık derecesi gösterilmiştir. En koyu kırmızı en güçlü ilişkiyi, en açık kırmızı tonu en zayıf ilişkiyi temsil etmektedir. Hiçbir senaryo belirtilmeyen ve KOT'larının öğrenildiği bu ham modelde doğum ağırlığının duyarlılığı en fazla anne yaşına ve hava kirleticilerine maruziyete bağlıdır.

Şekil 7'de hassasiyet testi sonucunda elde edilen tornado diyagramları gösterilmektedir. Şekil 7a'da hedef hücre için sonsal olasılık aralığı görülmektedir. Minimum ve

maksimum değerler seçilen senaryoya bağlı olarak değişmektedir. Diyagram en duyarlı değişkenden en az duyarlı değişkene doğru sıralanmaktadır. Bar rengi hedef hücredeki değişimin hangi yönde olduğunu göstermektedir; kırmızı negatif, yeşil pozitif değişimi belirtmektedir. Yöntem bölümünde açıklanan a, b, c ve d katsayılarına bağlı olarak hesaplanan türev geliştirilen ağırlık parametrelerinin ne kadar net olduğu konusunda bilgi verir. Eğer parametre p'nin türevi büyükse p değerindeki küçük değişiklikler bile hedef hücrenin sonsalında büyük değişiklikler olmasına neden olabilir. Eğer türevi küçükse, parametredeki büyük değişiklikler sonsalında çok küçük değişikliklere sebep olacaktır. Düşük doğum ağırlığı kategorisi en fazla düşük PM<sub>2,5</sub> konsantrasyonlarından, normal ve çok yüksek NO<sub>2</sub> konsantrasyonundan etkilenmektedir. Hava kirletici konsantrasyonlarını takip eden en hassas değişken annenin 20 yaşın altında olma kategorisidir. Benzer trend *normal* doğum ağırlığı kategorisi için de geçerlidir (Şekil 7b).



Şekil 6: Öğrenilmiş Bayesian Ağ Modeli duyarlılık testi



Şekil 7: Öğrenilmiş Bayesian Ağ Modeli Tornado Diyagramı

#### IV. SONUÇ

Mevcut teknolojik gelişmeler yüksek çözünürlüklü veri teminini mümkün kılmıştır. Ancak veri analizi konusunda benimsenen klasik istatistiksel yöntemler veriden öğrenilebileceğimiz bilgiyi kısıtlamaktadır. Tıbbi bilimlerde çevresel kirleticilerin halk sağlığı üzerindeki etkisini inceleyen bilimsel gruplar verilerin değerlendirmesi ve değişkenlerin kümülatif etkisini inceleme konusunda zorluk yaşamaktadır. Bu zorluklar ve belirsizlikler halk sağlığını koruma amaçlı etkin mevzuat değişikliklerinin yapılmasını engellemektedir. Bu çalışmada halk sağlığına etki eden risk faktörleri arasındaki doğrusal olmayan ilişkinin değerlendirilmesi konusunda yeni bir yöntem sunulmuştur. Geleneksel yaklaşım olan değişkenler arasındaki ikili ilişkilerin değerlendirilmesinden farklı olarak risk faktörleri arasındaki ilişkiler ağ analizi ile incelenmiştir. Örnek olarak seçilen New York

şehri hava kalitesi (PM<sub>2,5</sub> ve NO<sub>2</sub> konsantrasyonları), sosyoekonomik mahrumiyet ve doğum ağırlığı arasındaki ilişki olasılıksal olarak incelenmiştir. Yirmidört farklı vaka senaryosu oluşturularak meydana gelebilecek risk seviyeleri karşılaştırılmıştır. Bebek doğum ağırlığına hava kirleticilerinin, annenin yaşının ve doğum öncesi VKI'sının önemli etkide bulunduğu gösterilmiştir. VKI'nin etkisi yüksek NO<sub>2</sub> konsantrasyonuna maruziyette daha önemli boyutta görülmektedir. Ayrıca annenin dahil olduğu SMI'nın hava kirleticilerine olan maruziyeti ve bunun sonucunda doğum ağırlığına etki ettiği gösterilmiştir. Düşük VKI kategorisine bakacak olursak s1 indekisinde yüksek NO<sub>2</sub> kirleticisine maruz kalma sonucu %36 risk oluşurken bu risk s2'de %17'ye, s3 indekisinde %23'e düşmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların halk sağlığı-çevresel risk analizi alanlarına birçok önemli katkısı bulunacaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında

geliştirilen holistik değerlendirme çerçevesi farklı çevresel risk senaryolarına uygulanarak çok sayıda risk faktörü ve değişken aynı anda değerlendirilebilir.

### Teşekkür

Bu araştırma kamu, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından özel bir fon almamıştır. Bu makalede geliştirilen modeller, BayesFusion, LLC, <http://www.bayesfusion.com/> adresinden akademik araştırma kullanımı için ücretsiz olan GeNIe Modeller kullanılarak oluşturulmuştur.

### KAYNAKÇA

- [1] Gee, G.C. and D.C. Payne-Sturges, Environmental health disparities: A framework integrating psychosocial and environmental concepts. *Environmental Health Perspectives*, 2004. 112(17): p. 1645-1653.
- [2] Morello-Frosch, R. and E.D. Shenassa, The environmental "Riskscape" and social inequality: Implications for explaining maternal and child health disparities. *Environmental Health Perspectives*, 2006. 114(8): p. 1150-1153.
- [3] Stieb, D.M., et al., Ambient air pollution, birth weight and preterm birth: a systematic review and meta-analysis. *Environ Res*, 2012. 117: p. 100-11.
- [4] Burton, G.J. and E. Jauniaux, Oxidative stress. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 2011. 25(3): p. 287-299.
- [5] Dadvand, P., et al., Maternal Exposure to Particulate Air Pollution and Term Birth Weight: A Multi-Country Evaluation of Effect and Heterogeneity. *Environmental Health Perspectives*, 2013. 121(3): p. 367-373.
- [6] Tian, N., J. Xue, and T.M. Barzyk, Evaluating socioeconomic and racial differences in traffic-related metrics in the United States using a GIS approach. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2013. 23(2): p. 215-222.
- [7] Blumenshine, P., et al., Socioeconomic Disparities in Adverse Birth Outcomes A Systematic Review. *American Journal of Preventive Medicine*, 2010. 39(3): p. 263-272.
- [8] Nweke, O.C., et al., Symposium on Integrating the Science of Environmental Justice into Decision-Making at the Environmental Protection Agency: An Overview. *American Journal of Public Health*, 2011. 101: p. S19-S26.
- [9] Sexton, K. and S.H. Linder, Cumulative Risk Assessment for Combined Health Effects From Chemical and Nonchemical Stressors. *American Journal of Public Health*, 2011. 101: p. S81-S88.
- [10] Zota, A.R., E.D. Shenassa, and R. Morello-Frosch, Allostatic load amplifies the effect of blood lead levels on elevated blood pressure among middle-aged US adults: a cross-sectional study. *Environmental Health*, 2013. 12.
- [11] Hicken, M.T., et al., Do Psychosocial Stress and Social Disadvantage Modify the Association Between Air Pollution and Blood Pressure? The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *American Journal of Epidemiology*, 2013. 178(10): p. 1550-1562.
- [12] McEwen, B.S., Stress, adaptation, and disease – Allostasis and allostatic load, in *Neuroimmunomodulation: Molecular Aspects, Integrative Systems, and Clinical Advances*, S.M. McCann, et al., Editors. 1998. p. 33-44.
- [13] McEwen, B.S. and T. Seeman, Protective and damaging effects of mediators of stress – Elaborating and testing the concepts of allostasis and allostatic load, in *Socioeconomic Status and Health in Industrial Nations: Social, Psychological, and Biological Pathways*, N.E. Adler, et al., Editors. 1999. p. 30-47.
- [14] Attar, B.K., N.G. Guerra, and P.H. Tolan, Neighborhood Disadvantage, Stressful Life Events, and Adjustment in Urban Elementary-School-Children. *Journal of Clinical Child Psychology*, 1994. 23(4): p. 391-400.
- [15] Ross, C.E. and J. Mirowsky, Disorder and decay – The concept and measurement of perceived neighborhood disorder. *Urban Affairs Review*, 1999. 34(3): p. 412-432.
- [16] Cohen, S., T. Kamarck, and R. Mermelstein, A Global Measure of Perceived Stress. *Journal of Health and Social Behavior*, 1983. 24(4): p. 385-396.
- [17] Pickett, K.E. and R.G. Wilkinson, Income inequality and health: a causal review. *Soc Sci Med*, 2015. 128: p. 316-26.
- [18] Shmool, J.L., et al., Area-level socioeconomic deprivation, nitrogen dioxide exposure, and term birth weight in New York City. *Environ Res*, 2015. 142: p. 624-32.
- [19] Messer, L.C., et al., The development of a standardized neighborhood deprivation index. *Journal of Urban Health-Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 2006. 83(6): p. 1041-1062.
- [20] Bayesfusion.com. GeNIe software, available from <http://www.bayesfusion.com/> 2016 [cited 2016; Available from: software, available from <http://www.bayesfusion.com/>].
- [21] Newton, A.C., Bayesian Belief Networks in Environmental Modeling: A Review of Recent Progress. *Environmental Modelling* 2009: p. 13-50.
- [22] Pearl, J., Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. 1988, Los Angeles: Morgan Kaufmann Publishers.
- [23] Pollino, C.A. and C. Henderson, Bayesian networks: A guide for their application in natural resource management and policy, 2010, Australian Government.
- [24] Murphy, K.P., Machine Learning A Probabilistic Perspective. 2012, Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press.



# The CFD Analysis of Ventilation and Smoke Control System with Jet Fan in A Parking Garage

## Kapalı Bir Otoparkın Jet Fanlı Havalandırma ve Duman Kontrol Sisteminin CFD Analizi

Sinem SULTANSU<sup>1</sup> , Ayhan ONAT<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Marmara University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering, İstanbul, Turkey

<sup>2</sup>Marmara University, Technology Faculty, Department of Mechanical Engineering, İstanbul, Turkey

### Abstract

Basements of buildings are generally used as parking garages and vehicles located in there release harmful gases. It is generally not possible to ventilate parking garages with natural ventilation methods. For this reason, ventilation systems should be used to keep the concentration of harmful gases below certain limits. One of these ventilation systems is jet fan system. It can also be used for smoke control and exhaust of harmful gases in case of fire. In this study, the jet fan system was designed for a parking garage and its performance has been observed by Computational Fluid Dynamics (CFD). Carbon monoxide concentration and air velocity parameters were investigated according to the different car occupancy rates with the CFD analyses for daily ventilation. In the results, when the number of cars increased, the air velocities decreased in the areas where the cars located and exhaust of the CO gas took longer time. In fire analyses, the same parameters were analyzed according to the different jet fan hanging heights. In the fire ventilation results, when the jet fan hanging height was increased, distribution of the air velocity profiles changed and it took longer time to exhaust the CO gas from the car park.

**Keywords:** CFD, Parking garages, Smoke control, Jet fan, Car park ventilation

### Öz

Binaların genellikle bodrum katları kapalı otopark alanı olarak kullanılmakta ve otoparklarda bulunan araçlardan zararlı gazlar yayılmaktadır. Otoparkları doğal havalandırma yöntemleriyle havalandırmak genellikle mümkün değildir. Bu nedenle, zararlı gaz konsantrasyonunu belirli sınırların altında tutmak için havalandırma sistemleri kullanılmalıdır. Bu havalandırma sistemlerinden biri jet fan sistemidir. Ayrıca bu sistem yangın durumunda duman kontrolü ve zararlı gazların atılması için de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bir otopark için jet fan sistemi tasarlanmış ve sistemin performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile gözlemlenmiştir. Günlük havalandırma için karbon monoksit konsantrasyonu ve hava hızı parametreleri farklı araç doluluk oranlarında incelenmiştir. Sonuçlarda, araba sayısı arttıkça araçların konumlandığı bölgelerde hava hızının azaldığı ve CO gazının daha uzun sürede egzoz edildiği gözlemlenmiştir. Yangın analizlerinde, aynı parametreler farklı jet fan asma yüksekliklerine göre analiz edilmiştir. Yangın havalandırması sonuçlarına göre, jet fanların asıldığı yükseklik arttırıldığında, hava hızı profillerinin dağılımının değiştiği ve CO gazının daha uzun sürede egzoz edildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** CFD, Otoparklar, Duman kontrolü, Jet fan, Otopark havalandırma

## I. INTRODUCTION

In recent years, jet fan system is preferred more than ducted system for parking garages due to its advantages. This system can be used to provide daily ventilation and smoke control in case of fire. Jet fans are used in locations that need large amounts of air with high velocity for example in car parks and tunnels [1]. Jet fans accelerate fresh air supplied from fresh air sources inside parking lot and transmit it to exhaust fans by the effect of thrust power. In the event of a possible fire in parking garages or tunnels, toxic gases and fumes generated by the combustion will spread rapidly into the car park and the spread smoke will limit the visibility. If the ventilation system is not installed in the area, it will be difficult for firefighters

to intervene the fire. Many national and international studies on smoke exhaust systems are conducted.

S. Lu et al. [2] investigated smoke control capacity of jet fan system in a parking garage. The study also includes the comparison of jet fan system with ducted system. According to the results, increased jet fan air speed can cause smoke circulation. The results show that the jet fan system not only prevents smoke spreading, but also provides good visibility to fire fighters when compared to the ducted ventilation system. Z. Spiljar et al. [3] examined effect of partition walls of parking garage on the jet fan system. According to the results jet fan system is not suitable for all parking garages that especially includes partition walls. Because, these walls obstruct to air distributions. For such garages, ducted ventilation systems are more suitable than jet fan system. X. Decckers et al. [4] examined the effects of the smoke heat control system in case of fire with CFD simulation. According to the results, in cases where the flow is unilateral, increasing the rate of heat release and decreasing the smoke exhaust rate causes back layering of the smoke. In addition, it was observed that when smoke recirculation occurred, increasing the exhaust rate did not constitute a solution. S.C. Li et al. [5] investigated the influence of the make-up air amount on smoke exhaust efficiency by performing numerical simulations. An atrium fire is analyzed with simulations. According to the results, the amount of make-up air should be 30% of the amount of smoke exhaust. Because it is observed that the efficiency decreases when the amount of supply air is increased. The jet fan system is used to reduce density of toxic gases in daily ventilation, to reduce the smoke density during the fire and to increase the visibility for tunnels and parking garages. It is difficult to ventilate the underground parking garages by natural ventilation so special ventilation systems are needed to remove the dirty exhaust air emitted by motor vehicles. Dirty and harmful gases emitted from vehicle engines are generally CO, hydrocarbons and nitrogen oxides. The most important factor in terms of human health is the density of CO, so studies to improve air quality in car parks are generally focused on CO gas, but nitrogen oxides, sulfur oxides, other odorous and polluted gases cause the air quality of the car parks to decrease [6]. CO is an odorless, colorless and toxic gas. It is not possible to see, taste or smell this gas. It is possible to be exposed to this gas without notice. The CO joins the hemoglobin faster than oxygen and prevents the oxygen from entering the body by forming oxy-hemoglobin [7]. Many institutions around the world have published criteria for acceptable levels of concentrations for toxic gases. The US EPA accepts 35 ppm concentration limit value for 1 hour exposure. [8]

Jet fans are mounted near the ceiling. In cases where the jet fans are very close to the walls, the air flow becomes adhered to the surface because of the induced air and low pressure due to unilateral in near wall installations. This situation is called as coanda effect. Witt K.C et al. were studied with Witt & Sonn AG [9] related with the jet fans that are used in tunnels. They compared traditional jet fans with banana jets for observing the effect of coanda. Banana jet is formed by bending the silencers at the suction and blowing side of the conventional jet fans at certain angles. Thus, coanda effect was reduced with the use of banana jet.

In this study, a suitable jet fan system was designed for the parking garage according to the needed capacity of fans of the system and checked them by CFD analyses. According to the analyses results, there is no dead space unventilated. Thus, the accuracy of the jet fan system and the equipment layouts has been confirmed. Three dimensional drawing of the car park were made by Blender program and CFD analyses were carried out with Fire dynamic simulator (FDS) program that was developed on fire simulations. The car park was drawn in full scale and its physical structures that are ramps, beams, columns, fresh air shaft, exhaust shafts and cars were added to the drawing. Jet fans and exhaust fans of the system were drew and their technical properties were processed to the FDS program. For daily ventilation analyses, air velocity profiles and CO concentration in the closed parking garage were investigated with CFD analyses according to the different car occupancy rates. In the fire analyses of this study, air velocity profiles and CO concentrations were observed according to the different jet fan hanging heights.

## II. MATERIAL AND METHOD

### 2.1 CO Emission Calculation

A vehicle emits CO in two conditions. These are the cold emission when the engine is started up and the hot emission when the engine is warm. Motor vehicle emission factors for hot and cold-start operation given in ASHRAE 2007 Handbook are shown in Table 1.

**Table 1.** Predicted CO Emissions in Parking Garages [10]

Season	Hot emission (mg/s)		Cold emission (mg/s)	
	1991	1996	1991	1996
Summer, 32°C	42,33	31,5	71,17	61
Winter, 0 °C	60,17	56,33	345,67	316

The CO generation rate per unit floor area  $G$  (mg/m<sup>2</sup>s) rate can be determined using Equation (1) [10].

$$G=N \times E / A_f \tag{1}$$

N is number of cars in parking garage, E (mg/s) is average CO emission rate for a typical car, and  $A_f$  (m<sup>2</sup>) is total floor area of parking garage.

### 2.2 Exhaust Fan Selections

According to the regulation on fire protection of buildings of Turkey at least 10 air changes per hour extract rate must be provided in the parking garages [11]. Area of the parking garage is 2033m<sup>2</sup> and ceiling height is 4.75 m. The exhaust flow rate, Q (m<sup>3</sup>/h) can be determined using Equation (2).

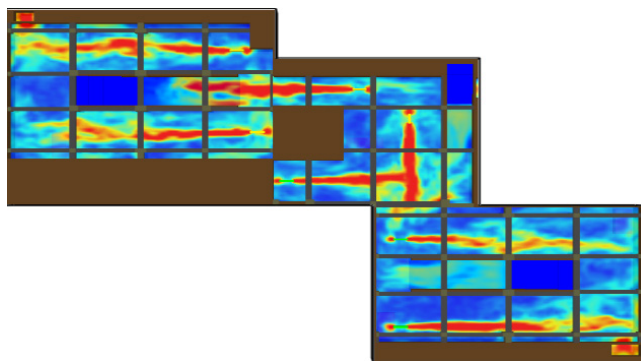
$$Q= A \times h \times ACH \tag{2}$$

Q is exhaust flow rate, h is ceiling height and ACH is air change per hour. Calculated exhaust flow rate is 96567.5 m<sup>3</sup>/h. The exhaust flow rate is provided by two pieces exhaust fans. They were selected from a manufacturer catalog and they were located in the exhaust shafts of the parking garage. Flow rates of the selected exhaust fans are shown Table 2.

**Table 2.** The air flow rates of the exhaust fans

Fans	Flow rate (m <sup>3</sup> /h)
EF-1	51277
EF-2	51277

Total 7 pieces jet fans were placed in the parking garage and it was checked whether any unventilated areas. The velocity contours are shown in Figure 1. As can be seen in Figure 1, there is no dead or unventilated areas that are not ventilated by the jet fan system.



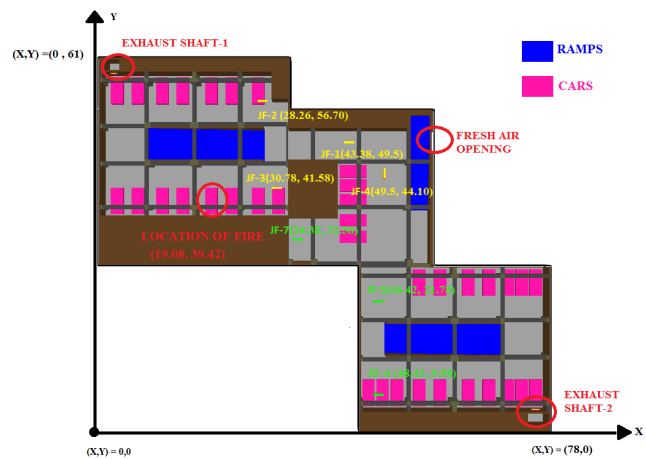
**Figure 1.** The ventilated areas by jet fans

The thrust powers and blowing distances of the jet fans are given in Table 3.

**Table 3.** The thrust powers and blowing distances of the jet fans

Jet Fan Number	Thrust Power (N)	Blowing Distances (m)
1	50	34
2	50	34
3	50	34
4	50	34
5	80	50
6	80	50
7	80	50

Location of the jet fans, fresh air opening, exhaust shafts, garage and fire(burning car) are shown in Figure 2.



**Figure 2.** The Jet fans, exhaust shafts and fresh air openings

### 2.3 Inputs of Daily and Fire Ventilation Simulations

There are 9 case studies about daily and fire ventilation of the parking garage. Case Study-1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 are belong to the the daily ventilation simulations. In these studies, influence of the number of cars and car occupancy rates on performance of the jet fan system were observed. For fire analyses, Case-8 and 9 were performed and the effect of the jet fan hanging heights were compared on the jet fan system performance.

#### 2.3.1 Daily Ventilation

The parking garage was filled with 50 ppm CO in initial conditions. Simulation time is 900 seconds for all daily ventilation case studies. The CO concentration and exhausting time were examined according to the different car occupancy rates of the car park.

Maximum 38 pieces car can be parked in the parking garage. Case study-1, Case Study-2 and Case-Study-3 were performed to examine the effect of the cars located in the garage on air velocity profiles. In the case studies, 4, 19 and 38

cars were placed in the simulations, respectively. Dimensions of the cars are 2.16 m width, 4.168 m length and 1.1 m height. Each one is defined as an obstacle at a height of 1.1 meters and air velocity profiles were examined at a height of 0.55 meters from the floor.

In the Case Study-4, Case Study-5, Case Study-6 and Case Study-7, car occupancy rates were increased as 10%, 25%, 50% and 100% respectively. To measure the CO concentrations, 13 measuring points are determined in the parking lot. These points are located at 2.1 meters height from the floor and distributed throughout parking garage. Location of the measuring points are shown in Figure 3.

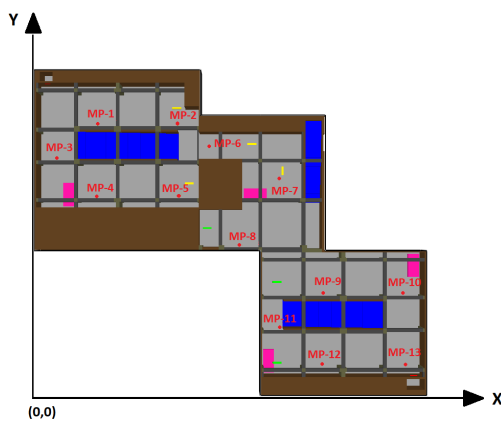


Figure 3. Locations of the measuring points

Coordinates of the measuring points are given in Table 4.

Table 4. Coordinates of the measuring points

Numbers of Measuring Points	Coordinates (x,y) (m)
1	12.24,56.52
2	28.44,56.52
3	3.96 ,49.68
4	12.24,42.12
5	28.44,42.12
6	34.74,49.14
7	48.96,42.84
8	41.04,32.40
9	57.60,22.68
10	74.16,23.04
11	49.32,15.84
12	57.60 , 8.28
13	74.16 , 8.28

During 900 seconds time period, changing of CO concentrations are measured from the points. After measuring CO concentrations, the average of CO values the points were calculated every two seconds of 900 seconds time period. In addition

the CO concentrations at the 1.65 meters height section of the parking garages were given in the results of this study.

### 2.3.2 Fire Ventilation

Case Study-8 and Case Study-9 have been performed with CFD analyses to observe and compare the air velocities and exhaust time of CO due to the jet fan hanging heights. In these simulations, 4 MW HRR a car fire were analyzed. The center point of the burning car is (19.08, 39.42) on X-Y coordinates of the parking garage. The jet fans started to work in 300<sup>th</sup> seconds and the fire reached the maximum level in 900 seconds. The total simulation time is 1500 seconds. The jet fans hanging heights are 2.91 m and 3.63 m, for Case-8 and Case-9 respectively. The heights of analyses result section for both cases are 1.65 meters. This height is from the floor to the ceiling.

## III. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1 Daily Ventilation Simulation Results

According to the CFD results, air velocities was low in the regions where the cars were located and high in the empty regions without the cars. Air velocity profiles for Case Study-1, 2 and 3 are shown in Figure 4. In study of Ž. Špiljar et al. [3], partition walls have been found to cause air stagnation. In our study also, cars that are identified as obstacle in CFD, caused to air stagnation where they located. It is seen that all kinds of obstacles placed in the parking lot causes air stagnation. Therefore, the placement of the jet fan system is very important for efficient ventilation.

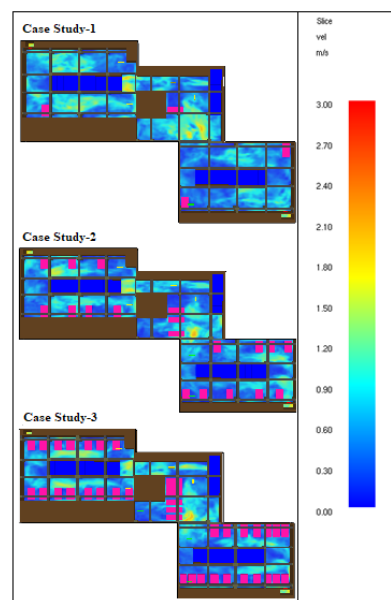


Figure 4. The air velocity contours according to the number of cars at 0.55 meter height from the floor

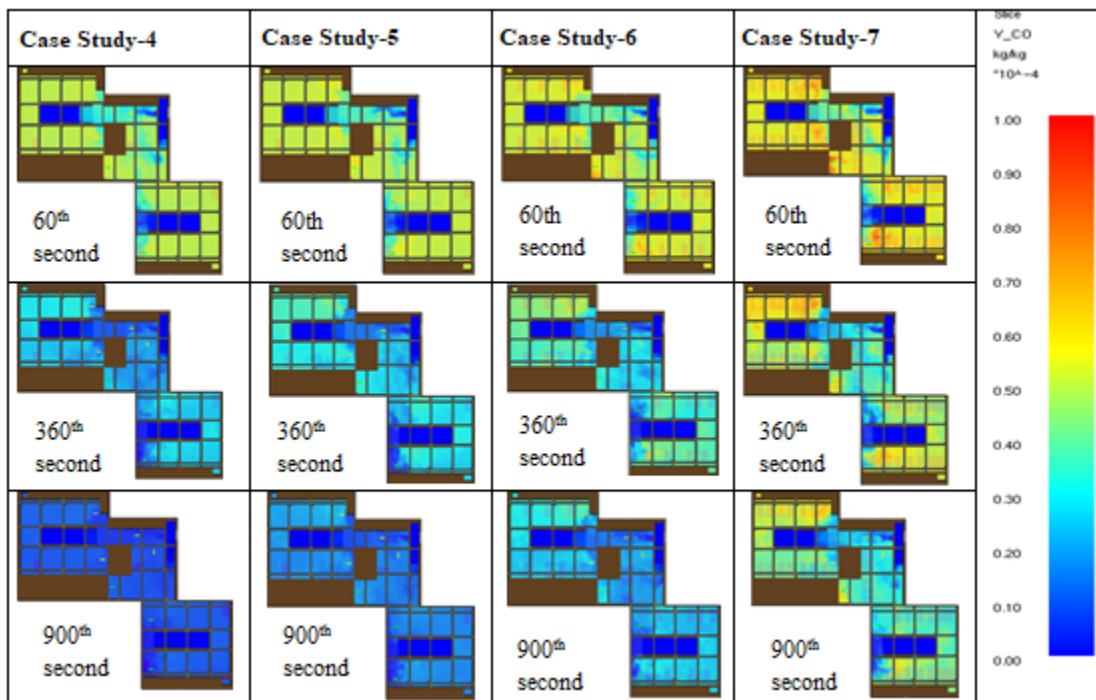
For Case Study-4, Case Study-5, Case Study-6 and Case Study-7, the car occupancy rates are 10%, 25%, 50% and 100%, respectively. In this study, E value were assumed 46.25 mg/s. This value is average of the 31.5 mg/s (hot emission) and 61 mg/s (cold emission) from Table 1. Calculated generations rates of the Case Study-4, Case-Study 5, Case-Study 6 and Case-Study-7 are given in Table 5.

CO Concentrations of the Case Study-4, Case Study-5, Case Study-6 and Case Study-7 are between 0-15 ppm, 0-29 ppm, 0-45 ppm and 0-67 ppm respectively, at the end of simulations and at 1.65 meters height from the floor. Simulation results of the each case studies depends on time are shown in Figure 5.

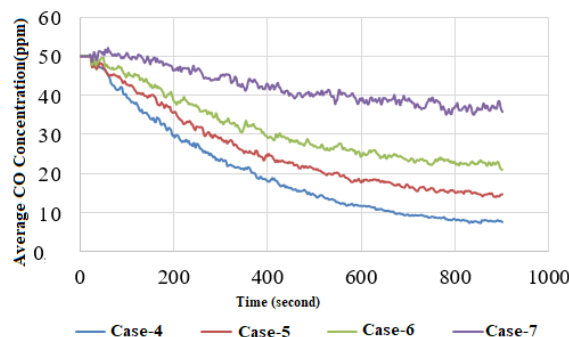
The graph that includes the variation of the CO concentrations depends on time for each cases is shown in Figure 6. The results that are shown in the graph are obtained from the measuring points located in 2.1 meter height from the floor of the parking garage. As shown in Figure 6, CO concentrations increased due to the increased car occupancy rates.

**Table 5.** Calculated CO generation rates due to the car occupancy rates

Case study number	Car occupancy rate	E, Average CO emission rate (mg/s)	G,CO generation rate (mg/m <sup>2</sup> s)
4	10%	46.25	0.086448598
5	25%	46.25	0.216121495
6	50%	46.25	0.432242991
7	100%	46.25	0.864485981



**Figure 5.** The CO concentration variations of Case-4, 5, 6 and 7 at 1.65 meter height from the floor



**Figure 6.** The variations of the CO concentration depend on time

### 3.2 Fire Ventilation Simulation Results

Air velocity profiles are shown in Figure 7 for Case Study-8 and 9. CFD simulations shows that as jet fans move away from the ceiling, jet profile improves and air velocity increases in the cross section. In the opposite case, as jet fans close the ceiling, the jet speed profile takes a form that is adhered to the wall and the air velocity in the cross section drops with the effect of coanda.

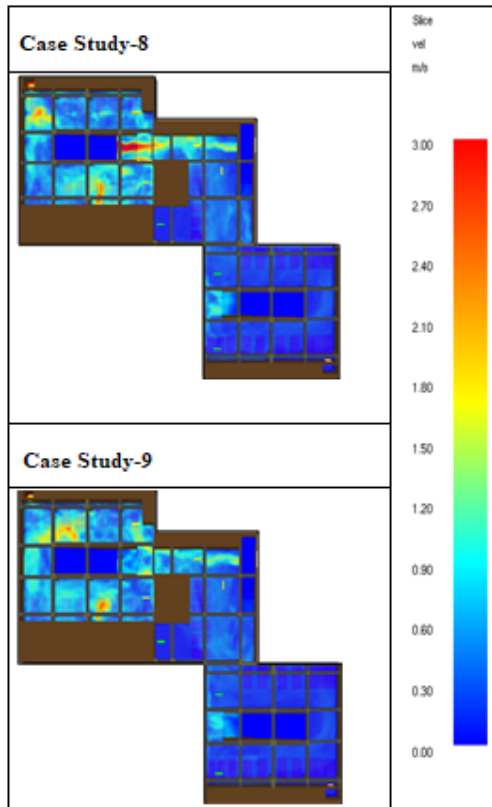


Figure 7. Air velocity profiles of Case-8 and Case-9 at 1.65 meter section height from the floor

Results of CO gas analyses show that jet fan hanging height have influence on exhaust of the CO gas. Air velocities decreased with coanda effect when jet fans closed to the ceiling. In the literature, the coanda effect has been generally investigated for jet fans used in tunnels. One of these studies is belong to the Witt K.C et al. [9]. They mentioned in their work that air adhere to the wall with the effect of coanda. The same result was observed in the results of our study. The graph of the CO concentration variation depends on time around the fire source is shown in Figure 8. As shown in the graph, the CO concentration of the Case-9 more than Case-8. The CO concentrations were measured by Measuring Point-4 (MP-4) which is near the fire source.

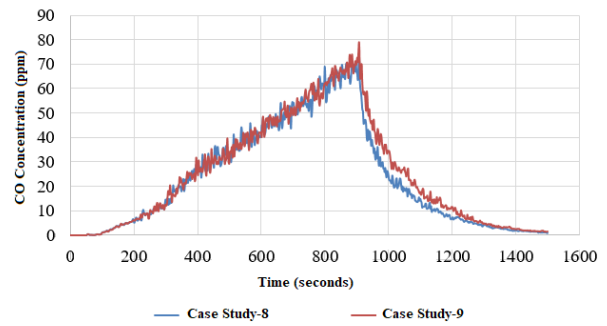


Figure 8. The CO concentration variations around the fire for Case Study-8 and 9

It was observed that exhaust of CO gas took longer time in Case Study-9 when compare with Case Study-8. According to the results, time of decreasing CO concentration below 35 ppm is 1020 seconds in Case Study-8 and 1058 seconds in Case Study-9. The simulation results CO concentrations variations depends on time for both case studies is shown in Figure 9. As it can see from the simulation results, jet fans hanging height has significant effect on CO exhaust.

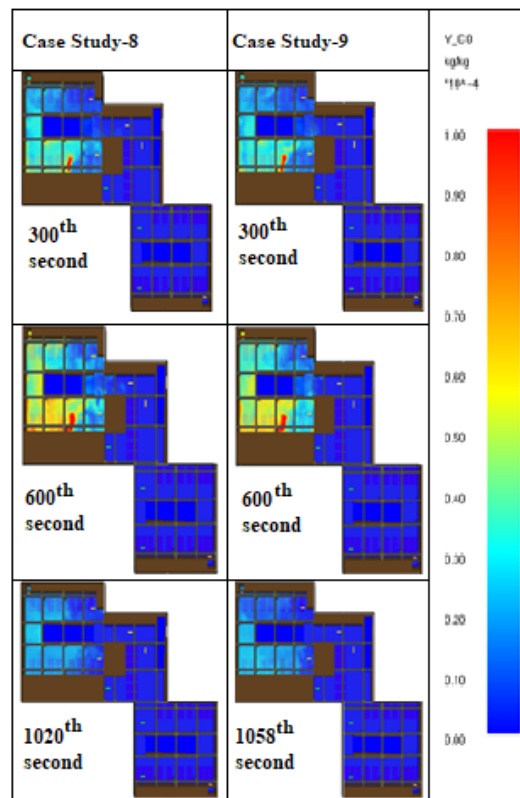


Figure 9. The CO concentration simulation results for the Case Study-8 and 9 @1.65 meter section height from the floor.

#### IV. CONCLUSIONS

In this study, the jet fan system was designed for the parking garage. The applicability of the jet fan system has been checked by means of CFD analyses and it has been seen that the designed jet fan system is suitable. Both daily ventilation analyses and fire ventilation analyses were performed for the parking garage and the simulation results were shared.

CO concentrations and air velocity profiles depending on car occupancy rate were investigated in daily ventilation simulations. In Case Study-1, 2 and 3 the number of cars were changed and air velocities were examined in the regions where the cars were placed. Cars were defined as 1.1 meter height obstacles in FDS software. When the velocity profiles were examined, it was observed that the air velocity was low in the areas where the obstacles located.

In case studies 4, 5, 6 and 7, it was observed that the CO concentrations increased as the car occupancy rate increased. Thus, CO exhaust time is increased as car occupancy rate increased. For Case Study-4, 5, 6 and 7 the concentration of CO are between 0-15 ppm, 0-29 ppm, 0-45 ppm and 0-67 ppm respectively at the end of 900 seconds simulation time.

In the fire ventilation analyses that are Case Study-8 and Case Study-9, the effect of jet fans hanging heights on air velocity and CO exhaust time in fire ventilation analyses have been investigated. In Case Study – 8 and 9 jet fans were hanging 2,91 meter and 3,63 height from the floor, respectively. In this way, coanda effect was observed. When the jet fans near the ceiling, it was observed that the air velocity profile adhered to the ceiling. In this case, the CO exhaust time is longer in Case Study-9 when compared with Case Study-8. In Case Study-8 and Case Study-9, CO concentration decreased below to 35 ppm in 1020 and 1058 seconds time, respectively. Therefore, it was concluded that the jet fans hanging heights should be well optimized.

#### REFERENCES

- [1] Giesen, B.J.M., Penders, S.H.A., Loomans, M.G.L.C., Rutten, P.G.S., & Hensen, J.L.M. (2011). Modelling and simulation of a jet fan for controlled air flow in large enclosures. *Environmental Modelling & Software*, 26(2), 191-200.
- [2] Lu, S., Wang, Y.H., Zhang, R.F., & Zhang, H.P. (2011). Numerical Study on Impulse Ventilation for Smoke Control in an Underground Car Park. *Procedia Engineering*, 11, 369-378.
- [3] Špiljar, Ž., Drakulić, M., & Schneider, D.R. (2018). Analysis of Jet Fan Ventilation System installed in an Underground Car Park with Partition Walls. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(2), 228-239.
- [4] Deckers, X., Haga, S., Tilley, N., & Merci, B. (2013). Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*, 57, 22-34.
- [5] Li, S.C., Chen, Y., Chen, X., & Jing, G.G. (2011). Engineering Numerical Simulation on the Amount of Make-up Air for Mechanical Smoke Exhaust in Atrium. *Procedia Engineering*, 11, 379-384.
- [6] Goel, R.K., Singh, B., & Zhao, J. (2012). Ventilation in Underground Car Parks. In *Underground Infrastructures – Planning, Design, and Construction*, Elsevier, USA, pp. 118-119
- [7] United States Environmental Protection Agency. (n.d.). Carbon Monoxide's Impact on Indoor Air Quality. Retrieved from EPA: [https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality#Health\\_Effects](https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality#Health_Effects)
- [8] United States Environmental Protection Agency. (n.d.). NAAQS Table. Retrieved from EPA: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- [9] Witt, K., Schütze, J., & Witt&Sohn AG. (2008). Effective Thrust Transformation Inside Tunnels with Jet Fans (Banana Jet). *4th International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation'*. Graz.
- [10] Owen M.S.(Ed.). (2007). *2007 ASHRAE Handbook—HVAC Applications (SI)*. ASHRAE.
- [11] Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik. *T.C. Resmi Gazete* (26735, 19.12.2007).

# Ağsız Yöntem Uygulamaları için Trigonometri Tabanlı Radyal Özelliğe Sahip Yeni Bir Temel Fonksiyon

## A New Trigonometric Based Radial Basis Function for Meshless Method Applications

Atakan ALTINKAYNAK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, Beyoğlu, İstanbul, Türkiye*

### Öz

Bu çalışmada, ağsız yöntemler için radyal özelliğe sahip yeni bir temel fonksiyon önerilmiştir. Önerilen fonksiyon, iki boyutta, dört farklı problemde, ağsız yöntemlerde sıklıkla kullanılan Ters Multikvadrik ve Gauss fonksiyonlarıyla birlikte test edilmiştir. Test problemlerinin üç tanesi 2. mertebeden mühendislik problemlerini içerirken son test problemi 4. mertebeden bir mühendislik problemi uygulaması olmuştur. 2. mertebeden test problemlerinde farklı sınır koşulları ve problem türleri incelenmiştir. Yapılan sayısal deneyler, önerilen fonksiyonun Ters Multikvadrik ve Gauss fonksiyonlarına kıyasla daha az nokta sayılarında benzer mertebedeki hatalara ulaşabildiğini göstermiştir. Ayrıca nokta sayısının artmasıyla aynı mertebedeki hatalar için kullanılacak şekil/ölçek parametresinin ( $\epsilon$ ) diğer iki fonksiyona kıyasla daha geniş bir aralıkta seçilebildiği gösterilmiştir. Dolayısıyla, önerilen fonksiyon, ağsız yöntem uygulamalarında bir alternatif olarak kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Radyal özelliğe sahip temel fonksiyon, trigonometri, ağsız yöntemler, Multikvadrik, Gauss

### Abstract

In this study, a new radial basis function for meshless method is proposed. The proposed function was tested on four different 2D problems along with the two well-known IMQ and Gauss functions. Three of the test problems include 2<sup>nd</sup> order engineering problems whereas the last test problem was a 4<sup>th</sup> order engineering problem. 2<sup>nd</sup> order engineering problems were used to investigate the type of boundary conditions and problems. Numerical experiments suggested that similar order of error can be obtained using the proposed function with less number of nodes compared to IMQ and Gauss functions. Besides that, with an increase on the number of nodes, the range of shape/scale parameter ( $\epsilon$ ) for the proposed function is broader than that for the other two functions. Thus, the proposed function is a good candidate for meshless method applications.

**Keywords:** Radial basis function, trigonometry, meshless methods, Multiquadric, Gauss

## I. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik problemlerinin sayısal çözümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi [1], Sonlu Hacimler Yöntemi [2], Sınır Elemanlar Yöntemi [3], Ağsız Yöntemler [4] gibi farklı araçlar kullanılmaktadır. Özellikle son 30 yıldır süren yoğun geliştirmeler sonucunda, Sonlu Elemanlar Yöntemi artık diferansiyel denklem çözümlerinde standart olarak kullanılan bir yöntem haline almıştır [5]. Bunun yanı sıra, bir ağ yapısı gerektirmemesi ve çok sayıda bağımsız değişkenli problemler için kolaylıkla uygulanabilir olması, ağsız yöntemlerin uygulama alanını gün geçtikçe genişletmektedir. Ağsız yöntemlerin bir kolu olan radyal özelliğe sahip temel fonksiyonlar (RTF), son yıllarda öne çıkan yöntemlerden birisidir [5]. RTF fonksiyonların iki temel özelliği olan fonksiyon merkezinden eşit uzaklıkta fonksiyonun aynı değeri alması (radyal) ve fonksiyonun her derecede türevinin olması, bu fonksiyonların uygulama alanını genişletmiştir. İlk olarak Kansa [6, 7], Multikvadrik RTF fonksiyonunu diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanarak RTF ağsız yöntemlerin mühendislik uygulamalarında



kullanılmasının önünü açmıştır. Günümüzde Gauss, Ters Multikvadrik, Bessel ve Wendland gibi çok farklı RTF fonksiyonlarının mühendislik problemlerine uygulamaları mevcuttur [8].

Diferansiyel denklemlerin çözümünde RTF kullanılarak üssel yakınsama hızları elde edilebilmiştir [9]. Fakat burada önemli olan hususlardan biri, RTF'yi oluşturan ve genelde  $\epsilon$  ile tanımlanan şekil/ölçek parametresinin optimum değerinin belirlenmesidir. Şekil parametresinin küçük değerleri için daha kesin sonuçlar elde edilebilirken bu değerdeki düşüş çözümde sayısal kararsızlıklara ve iraksamalara neden olmaktadır [10]. Bu kararsızlıkların giderilmesinde Contour-Pade [11] ve RBF-QR [12] gibi temel değişiklikler gerektiren yöntemler dışında, matris değişikliği içeren ön koşullandırma (preconditioning) [13] ve noktalar arası ilişkinin tüm çözüm bölgesi yerine yerel bir bölge için tanımlanması (local support) [14] gibi yöntemler geliştirilmiştir. Optimum  $\epsilon$  değeri, problemin ve kullanılan RTF'nin türünden, sınır koşullarından, nokta dağılımından ve nokta sayısından oldukça etkilenmektedir. Dolayısıyla, optimum  $\epsilon$  değerinin belirlenmesi günümüzde üzerinde araştırma yapılan konulardan biridir [15-17].

Yapılan çalışmalarda her ne kadar çok sayıda RTF geliştirilmiş olsa da, literatürde trigonometrik fonksiyon temelli bir RTF'ye rastlanılmamıştır. Yapılan çalışmada, trigonometrik fonksiyon temelli yeni bir RTF ortaya konmuştur. Bu RTF, 2-boyutta, dört farklı problemde ve farklı sınır koşullarında kullanılarak çözümler elde edilmiştir. Bu çözümler, Gauss ve Multikvadrik RTF çözümleri ile kıyaslanarak geliştirilen RTF'nin karakteristik özellikleri belirlenmiştir.

## II. SAYISAL YÖNTEM

### 2.1 Noktasal RTF Yöntemi

Genel bir kısmi diferansiyel denklem Eşitlik (1) ve (2)'deki gibi verilebilir:

$$\mathcal{L}\phi = f(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (1)$$

$$\mathcal{B}\phi = g(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega \quad (2)$$

Bu denklemlerde  $\mathcal{L}$  diferansiyel operatörünü,  $\mathcal{B}$  Dirichlet, Neumann gibi sınır koşulları operatörünü,  $\Omega$  çözüm bölgesini,  $\partial\Omega$  ise çözüm bölgesi sınırlarını ifade etmektedir. Noktasal RTF yönteminde, diferansiyel denklemde çözülmeye çalışılan bağımsız bilinmeyen  $\phi$ 'nin  $\mathbf{x}_i$  noktasındaki değeri, RTF'nin bu nokta temel alındığında, diğer tüm merkez noktadaki değerlerinin doğrusal kombinasyonu olarak Eşitlik (3) ve (4)'teki gibi yazılabilir:

$$\phi(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N_c} c_j \varphi_j(\mathbf{x}_i) \quad (3)$$

$$\phi'(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N_c} c_j \varphi_j'(\mathbf{x}_i) \quad (4)$$

Bu denklemlerde;  $\mathbf{x}_i$ ,  $i$ 'nci çözüm bölgesi noktasını,  $N_c$ , merkez nokta sayısını,  $\varphi(\mathbf{x})$ , RTF'yi,  $c$  ise  $\phi, \phi', \dots$  gibi bağımsız bilinmeyen fonksiyonların yaklaşık değerinin belirlenebilmesi için hesaplanması gereken sabitleri ifade etmektedir. Eşitlik (3) ve (4)'ten görülebileceği gibi,  $c$  katsayıları sabit olduğundan dolayı  $\phi$ 'nin  $n$ . mertebeden türevinin yaklaşık değerinin belirlenebilmesi için RTF fonksiyonunun  $n$ . mertebeden türevinin kullanılması gerekmektedir. RTF fonksiyonlarının her dereceden türevleri bulunduğundan dolayı bu işlem rahatlıkla yapılabilmektedir. Eşitlik (3) ve (4)'teki denklemler, Eşitlik (1) ve (2)'deki diferansiyel denklem ve sınır koşulları denklemlerinde yerine konulduğunda noktasal yaklaşık çözüm için gerekli olan  $c$  sabitleri Eşitlik (5) kullanılarak elde edilebilir:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathcal{L}\phi(\mathbf{x}) \\ \mathcal{B}\phi(\mathbf{x}) \end{bmatrix}}_A \{c\} = \{0\} \quad (5)$$

$c$  sabitleri belirlendikten sonra Eşitlik (3)'te yerine konularak yaklaşık çözüm elde edilmektedir. Eşitlik (5)'in çözülebilmemesi için  $A \neq 0$  olması gerekmektedir. RTF kullanılması durumunda,  $A$  matrisi pozitif tanımlı matris olmaktadır ve bu durum da bir çözüm elde edilebileceğini göstermektedir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken durum; problem türü, sınır koşulları, RTF türü, nokta dağılımı, nokta sayısı, çözüm bölgesi noktalarının etkileşimde olduğu merkez noktası sayısı vb. etkenlerin  $A$  matrisinin karakteristiğini etkileyerek matrisin determinantının sıfıra yaklaşmasına neden olmasıdır (kötü koşullanma –ill conditioning). Bu durum da çözümde kararsızlıklar ortaya çıkarmaktadır.

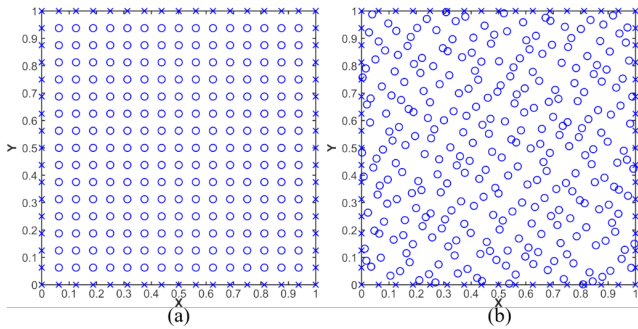
Diferansiyel denklem çözümlerinde sıkça kullanılan RTF örnekleri Tablo 1'de verilmektedir. Tablo 1'de  $r = \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2$ , çözüm bölgesi noktaları ile merkez noktaları arasındaki mesafeyi,  $\epsilon$ , şekil/ölçek parametresini,  $K$ , ikinci türden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu ve  $d$  boyutu ifade etmektedir. Genel Multikvadrik fonksiyonunda  $\beta$  değerinin negatif olduğu durumda fonksiyon Ters Multikvadrik, pozitif olduğu durumda ise Multikvadrik olarak adlandırılmaktadır. Çözüm bölgesi noktaları, çözüm bölgesi içinde ve sınırlarında olabilirken, merkez noktaları, çözüm bölgesi dışında da olabilmektedir. Uygulamalarda, çözüm bölgesi sınırlarındaki noktalar için belirlenen merkez noktalarının, çözüm bölgesi dışında olması durumunda hatanın azaldığı gözlemlenmiştir

[18]. Bu bulgu henüz herhangi bir teoriye dayanmadığından dolayı, genelde yapılan çalışmalarda merkez noktaları, çözüm bölgesi noktaları ile aynı koordinatlarda seçilmektedir [5].

Nokta sayısı ve dağılımının  $A$  matrisinin karakteristiğini etkilediğinden bahsedilmiştir. Literatürde düzgün, Halton, Chebyshev, Glacier, Optimal gibi çok sayıda nokta dağılımı yöntemi bulunmaktadır [10]. Örnek olarak, düzgün ve Halton nokta dağılımı Şekil 1'de verilmektedir. Halton nokta dağılımı durumunda, noktalar çözüm bölgesi içerisinde düzgünvari şekilde rastgele olarak dağılmaktadırlar. Bu durumda, tamamen rastgele duruma göre daha kesin sonuçlar elde edilmektedir [19]. Şekil 1'de sadece çözüm bölgesi noktaları gösterilmekte, merkez noktaları ise gösterilmemektedir. Yapılan çalışmada, merkez noktaları, çözüm bölgesi noktalarıyla aynı koordinatlarda seçilmiştir.

**Tablo 1.** Diferansiyel denklem çözümlerinde kullanılan RTF örnekleri

İsim	Formül $\varphi(x)$	
Gauss	$e^{-(\varepsilon r)^2}$	$\varepsilon > 0$
Genel Multi-kvadrik	$(1+(\varepsilon r)^2)^\beta$	$\varepsilon > 0, \beta \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{N}_0$
Matern	$\frac{K_{\frac{d}{2}-\beta}(\varepsilon r)}{(\varepsilon r)^{\frac{d}{2}-\beta}}$	$\varepsilon > 0, \beta > \frac{d}{2}$



**Şekil 1.** Çözüm bölgesi içerisinde (o) ve sınırlarındaki (x) örnek nokta dağılımı (289 adet nokta için): (a) Düzgün dağılım, (b) Halton dağılımı

## 2.2 Yeni Bir RTF: Sinüs-RTF

Yapılan çalışmada trigonometrik fonksiyon temelli yeni bir RTF fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu fonksiyon Eşitlik (6)'da verilmektedir.

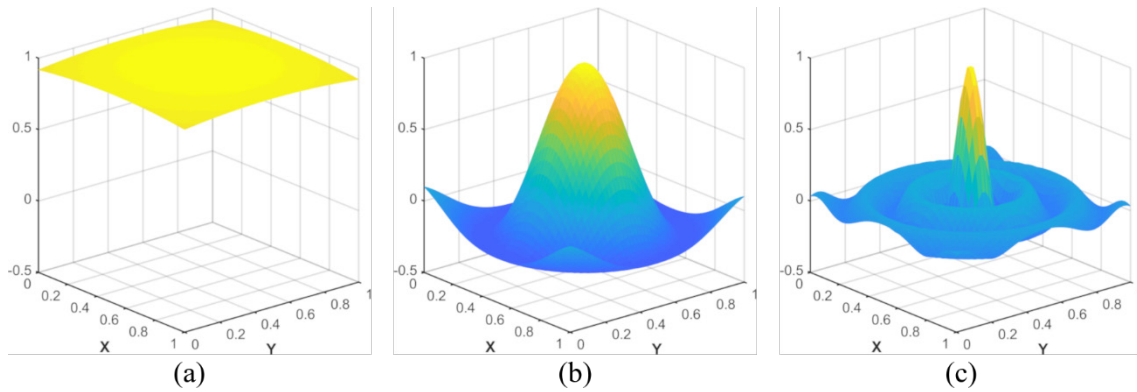
$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\varepsilon r)}{\varepsilon r} & , r > 0 \\ 1 & , r = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Sinüs-RTF fonksiyonunun  $(x, y) \in [0,1]^2$  çözüm bölgesi içerisinde  $(0,5,0,5)$  noktası için davranışı Şekil 2'de verilmektedir.  $\varepsilon$  parametresinin değeri azaldıkça Gauss ve Ters Multikvadrik RTF'de olduğu gibi Sinüs-RTF de yataya yakın bir fonksiyon halini almakta ve bu durum  $A$  matrisinin kötü koşullanmasına neden olmaktadır.  $\varepsilon$  değeri arttıkça farklı RTF'ler farklı karakteristik göstermektedir. Fakat genel olarak  $\varepsilon$  değeri arttıkça çözüm kararlılığı artmakla birlikte hata miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla, optimum bir  $\varepsilon$  değerinin belirlenmesi gerekmektedir.  $\varepsilon$  değeri arttıkça Gauss ve Ters Multikvadrik fonksiyonların davranışı, çözüm noktası civarında sivri bir tepe ve diğer kısımlarda sıfıra yakın yatay bir davranış şeklinde olurken, Sinüs-RTF'in davranışı sivri tepe dışındaki kısımlarda fonksiyon tanımı itibarıyla salınım şeklindedir (Şekil 2). Ayrıca, Sinüs-RTF'nin radyal karakteristiği Şekil 2'de gözükmemektedir.

Sinüs-RTF fonksiyonunun parçalı fonksiyon olarak tanımlanmasının nedeni,  $\frac{\sin(\varepsilon r)}{\varepsilon r}$  teriminin  $r = 0$ 'da tanımsız olmasıdır. Çözüm bölgesi ile merkez noktasının aynı olduğu durumlarda  $r = 0$  olmakta ve  $\frac{\sin(\varepsilon r)}{\varepsilon r}$  terimi tanımsız olmaktadır. Bu durumda bir çözüm elde edilememektedir.  $r = 0$  dışındaki (çözüm bölgesi ve merkez noktalarının farklı koordinatlarda olma durumu) tüm reel sayılar için ise bu fonksiyon tanımlı ve süreklidir. Bu tür süreksizlikler, kaldırılabilir süreksizlik olarak ifade edilmekte ve fonksiyonun tanımlı olmadığı noktalarda fonksiyonun limit değeri kullanılarak giderilebilmektedir. Bu sebepten dolayı, Sinüs-RTF fonksiyonu parçalı fonksiyon olarak tanımlanarak  $r = 0$  için Eşitlik (7)'de verilen limit değeri kullanılmıştır. Böylece fonksiyon sürekli hale getirilmiştir. Benzer şekilde, Sinüs-RTF'nin farklı mertebelerdeki türevlerinin de diferansiyel denklem çözümlerinde  $r = 0$  için tanımlanması gerekmektedir. Örnek olarak, Sinüs-RTF'nin, Laplace problemi için tanımı Eşitlik (8)'deki gibi olmaktadır. Benzer RTF, kosinüs fonksiyonu kullanılarak elde edilememektedir çünkü kosinüs fonksiyonunun  $r \rightarrow 0$  durumu için limiti bulunmamaktadır.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sin(\varepsilon r)}{\varepsilon r} = 1 \quad (7)$$

$$\nabla^2 \varphi(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\varepsilon r) - \varepsilon r (\cos(\varepsilon r) + \varepsilon r \sin(\varepsilon r))}{\varepsilon r^3} & , r > 0 \\ -\frac{2\varepsilon^2}{3} & , r = 0 \end{cases} \quad (8)$$



Şekil 2. Sinüs-RTF fonksiyonunun (0,5,0,5) noktası için  $[0,1]^2$  çözüm bölgesinde davranışı: (a)  $\epsilon = 1$ , (b)  $\epsilon = 10$ , (c)  $\epsilon = 30$

### III. SAYISAL DENEYLER ve TARTIŞMALAR

Önerilmiş olan radyal özelliğe sahip temel fonksiyon Sinüs-RTF'nin davranışı, farklı sayısal problemler için test edilmiştir. Bu bölümde seçilen problemler, mühendislik problemlerinde sıklıkla karşılaşılan 2-boyutlu eliptik diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Problemlerin belirlenmesinde analitik çözümün olmasına dikkat edilmiş, böylece hatanın hassas bir şekilde belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Problemlerde çözüm bölgesinin  $(x, y) \in \Omega = [0,1]^2$  olduğu kabul edilmiştir. Çözümler, düzgün ve Halton nokta dağılımı durumunda ve farklı nokta sayıları için elde edilmiştir. Çözüm bölgesinde hatayı belirlemek için düzgün olarak dağılmış  $40 \times 40$  değerlendirme noktasında, analitik çözüm ile sayısal çözümler karşılaştırılarak karesel hata (RMS) ve maksimum hata değerleri elde edilmiştir. Karesel hata değeri Eşitlik (9) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mathbf{x}_{analitik} - \mathbf{x}_{sayisal})^2}{n}} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da  $n$  çözüm bölgesinde bulunan toplam nokta sayısını ifade etmektedir.

Temel olarak, Eşitlik (1)'deki  $\mathcal{L}$  operatörü, değişken katsayılarla sahip eliptik bir operatör olarak Eşitlik (10)'daki gibi tanımlanabilir. Eşitlik (10), iki boyutta süresiz (heterojen) ve yöne bağlı (anisotropik) ortamlardaki sızıntı akışı mühendislik problemine karşılık gelmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ b(x, y) \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] = f(x, y) \quad (10)$$

Eşitlik (10)'da  $a(x, y) = 1$  ve  $b(x, y) = 1$  olarak seçilmesi durumunda, standart Poisson problemi elde edilmektedir. Poisson problemi mühendislikte elektrostatik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği, difüzyon problemleri gibi birçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla, ilk aşamada farklı sınır koşulları için Poisson problemi, önerilen Sinüs-RTF

kullanılarak çözülmüştür. Sayısal sonuçlar, Gauss ve İMQ ( $\beta = -0.5$ ) RTF'leri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı RTF'lerin bu problemlerdeki davranışları hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

#### 3.1 Poisson Problemi-1

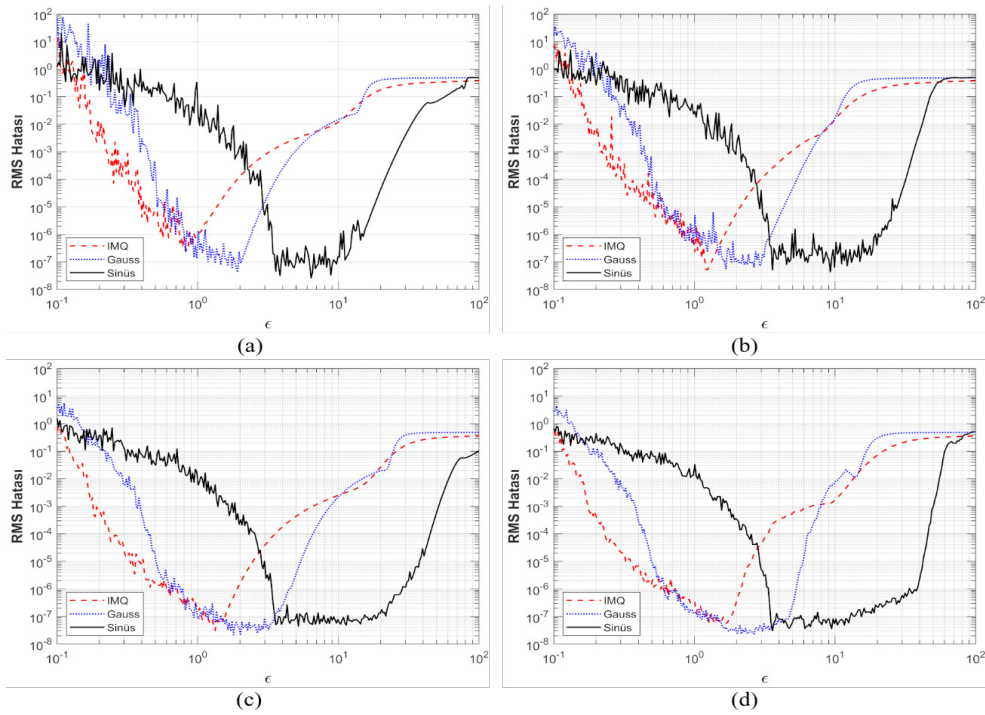
İlk Poisson problemi, Dirichlet sınır koşullarına sahiptir ve Eşitlik (11)'deki gibi tanımlanmıştır [20].

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi(x, y) &= -\frac{5\pi^2}{4} \sin(\pi x) \cos\left(\frac{\pi y}{2}\right), \\ \phi(x, y) &= \sin(\pi x), \quad (x, y) \in \Gamma_1, \\ \phi(x, y) &= 0, \quad (x, y) \in \Gamma_2, \\ \Gamma_1 &= \{(x, y): 0 \leq x \leq 1, y = 0\}, \Gamma_2 = \partial\Omega \setminus \Gamma_1 \end{aligned} \quad (11)$$

Eşitlik (11)'den görüldüğü gibi, bu problemde  $y = 0$  olan sınır için  $\phi(x, y) = \sin(\pi x)$  ve diğer sınırlar için ise  $\phi(x, y) = 0$  Dirichlet sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu problemin analitik çözümü

$$\phi(x, y) = \sin(\pi x) \cos\left(\frac{\pi y}{2}\right) \quad (12)$$

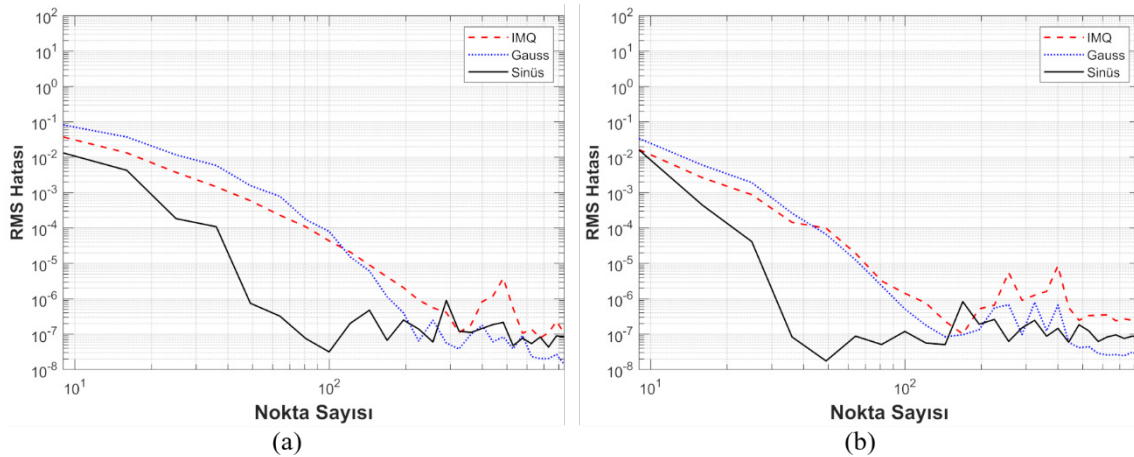
olarak elde edilmektedir. Bu problemde; farklı  $\epsilon$  değerleri için Sinüs-RTF, Multiküadrik ve Gauss RTF kullanılarak elde edilen karesel hata (RMS) değerleri Şekil 3'de verilmektedir. Şekil 3'ten görülebileceği gibi, en düşük karesel hatanın elde edildiği  $\epsilon$  değerini RTF türünün yanı sıra nokta sayısı ve nokta dağılımı da etkilemektedir. Ayrıca, sayısal yöntemin kararlılığı  $\epsilon$  değerinden oldukça etkilenmektedir. Bu durum, daha önceki yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [5, 21]. Nokta sayısının artması ve  $\epsilon$  değerinin azalması (fonksiyonun düz yatay çizgiye yaklaşması),  $A$  matrisinin kötü koşullanmasına neden olarak Şekil 3'te görülen kararsızlıkları oluşturmaktadır. Bu kararsızlıkların giderilmesinde kullanılan farklı yöntemlerden "Giriş" bölümünde bahsedilmiştir. Ayrıca, Şekil 3'teki sonuçlara bakıldığında, Sinüs-RTF için  $10^{-6}$ 'dan daha düşük hata değerlerinin elde edildiği  $\epsilon$  aralığının, diğer iki RTF'e göre daha geniş olduğu görülmektedir. Bu durumun, özellikle en uygun  $\epsilon$  parametresinin belirlenmesinde avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 3. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre karesel hatanın değişimi: (a) 225 nokta düzgün dağılım, (b) 625 nokta düzgün dağılım, (c) 225 nokta Halton dağılımı, (d) 625 nokta Halton dağılımı

Şekil 4'te karesel hatanın, sabit  $\epsilon$  parametresi için nokta sayısına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. IMQ, Gauss ve Sinüs RTF'ler için sırasıyla  $\epsilon = 1$ ,  $\epsilon = 2$  ve  $\epsilon = 4$  olarak alınmıştır. Nokta sayısı düzgün dağılım için 100'e, Halton dağılım için ise 50'ye kadar arttıkça, Sinüs-RTF kullanılarak elde edilen karesel hata, diğer iki RTF'ye göre daha hızlı bir şekilde azalmaktadır. Nokta sayısı daha fazla arttığında ise hata kararsız ve genel olarak yatay bir seyir izlemiştir. Bu durumun nedeni, nokta sayısının daha fazla artmasıyla A

matrisinin boyutunun büyüyerek kötü koşullanmasıdır. IMQ ve Gauss RTF'lerinde daha fazla nokta sayısı için kararlı sonuçlar elde edilerek hatanın azaltılması sağlanabilmektedir. Sinüs-RTF ile 80 nokta kullanılarak elde edilen hata mertebelerine IMQ ve Gauss RTF'lerinde 200 ve daha fazla nokta kullanıldığı durumda ulaşılmaktadır. Dolayısıyla, Sinüs-RTF kullanılması durumunda benzer hata mertebelerine daha az nokta kullanılarak erişilebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için karesel hatanın değişimi: (a) Düzgün nokta dağılımı, (b) Halton nokta dağılımı

Hatanın çözüm bölgesindeki davranışı Halton ve düzgün nokta dağılımı durumunda incelenen tüm RTF'ler için Şekil 5'te verilmiştir. Sonuçlar, 81 nokta için elde edilen değerlerdir ve sonuçların daha iyi yorumlanabilmesi için renk aralıkları her bir durum için elde edilen maksimum hataya göre belirlenmiştir. IMQ, Gauss ve Sinüs-RTF'ler için  $\epsilon$  değerleri sırasıyla  $\epsilon = 1$ ,  $\epsilon = 2$  ve  $\epsilon = 4$  olarak sabit tutulmuştur. IMQ ve Gauss RTF'lerin kullanıldığı durumda Halton nokta dağılımı, düzgün nokta dağılımına göre daha az hata oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca düzgün nokta dağılımında hata genelde sınırlara yakın artış gösterirken, Halton nokta dağılımında bu davranış köşelere yakın gözlemlenmiştir. Sinüs-RTF kullanılması durumunda her iki nokta dağılımı için IMQ ve Gauss RTF'den daha düşük hata elde edilmiştir. Düzgün ve Halton nokta dağılımında ise diğer iki RTF'nin aksine hata mertebeleri birbirine yakındır. Hatanın genel davranışı incelendiğinde, Sinüs-RTF kullanıldığı durumda hatanın sınırlarda yoğunlaşmadığı, aksine tüm çözüm bölgesine dağılarak tepecikler şeklinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu davranışın elde edilmesindeki en büyük etkenin, her bir nokta için RTF fonksiyonunun çözüm bölgesinde gösterdiği

davranış olduğu söylenebilir. Bu sebepten dolayı, aynı  $\epsilon$  değeri kullanıldığı durumda, Sinüs-RTF'de nokta sayısı belli bir değerün üstüne çıktığında hatada fazla bir değişim gözükmemektedir. Gauss ve IMQ RTF için ise nokta sayısındaki artış, köşe ve kenardaki hataların azalmasını sağlayarak genel hatanın düşme eğilimine girmesini sağlamıştır.

### 3.2 Poisson Problemi-2

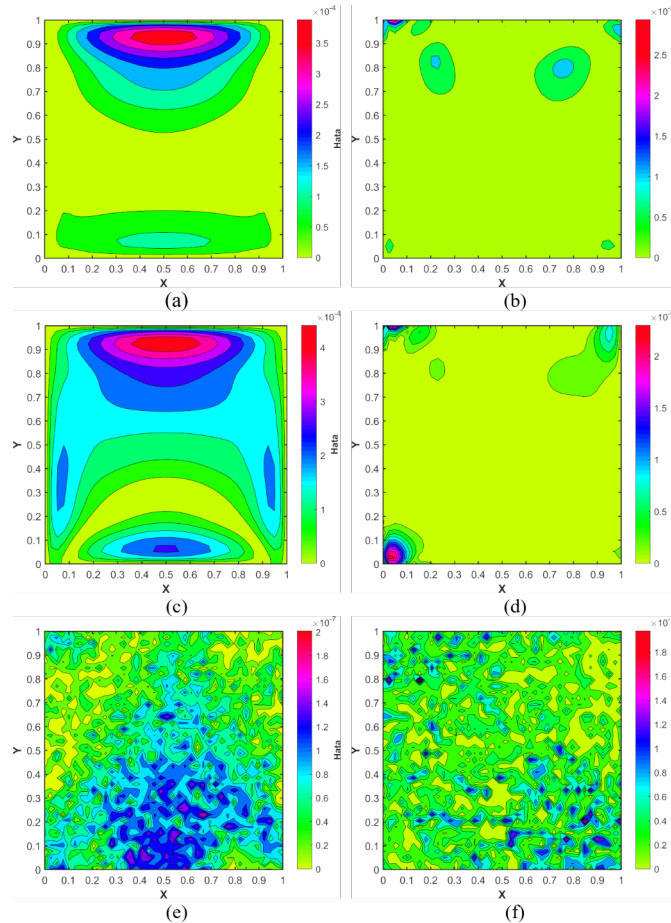
İkinci Poisson probleminde Dirichlet ve Neumann sınır koşulları beraber bulunmaktadır [20]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi(x, y) &= -5,4x, \\ \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}}(x, y) &= 0, \quad (x, y) \in \Gamma_1 \cup \Gamma_3, \\ \phi(x, y) &= 0, 1, \quad (x, y) \in \Gamma_2, \\ \phi(x, y) &= 1, \quad (x, y) \in \Gamma_4, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \{(x, y): 0 \leq x \leq 1, y = 0\}, \Gamma_2 = \{(x, y): x = 1, 0 \leq y \leq 1\} \\ \Gamma_3 &= \{(x, y): 0 \leq x \leq 1, y = 1\}, \Gamma_4 = \{(x, y): x = 0, 0 \leq y \leq 1\} \end{aligned}$$

Eşitlik (13)'ten görüldüğü gibi bu problemde  $y = 0$  ve  $y = 1$  olan sınırlarda Neumann sınır koşulları diğer sınırlar için ise Dirichlet sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu problemin analitik çözümü Eşitlik (14)'te verilmektedir.

$$\phi(x, y) = 1 - 0,9x^3 \quad (14)$$

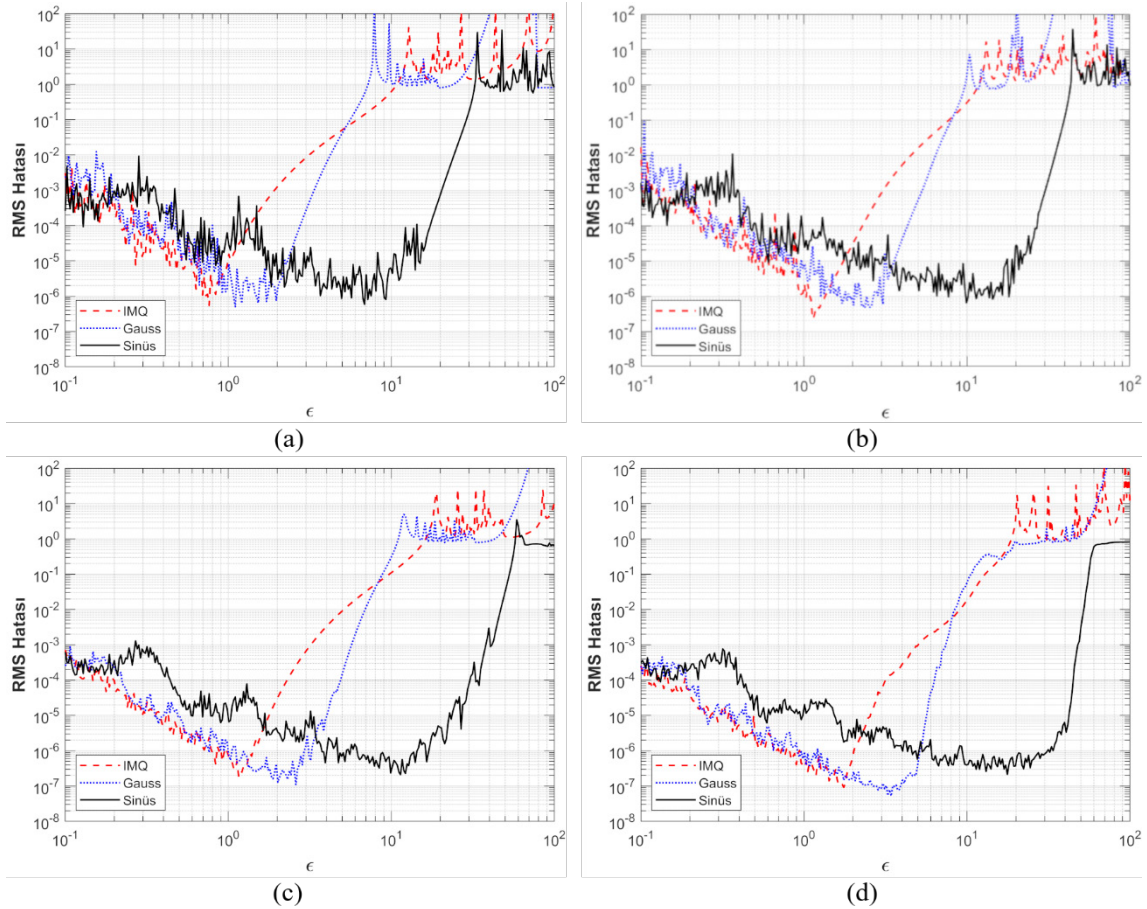


Şekil 5. 81 nokta sayısı için farklı nokta dağılımında çözüm bölgesindeki hata davranışı: (a) IMQ-Düzgün nokta dağılımı, (b) IMQ-Halton nokta dağılımı, (c) Gauss-Düzgün nokta dağılımı, (d) Gauss-Halton nokta dağılımı, (e) Sinüs RTF-Düzgün nokta dağılımı, (f) Sinüs RTF-Halton nokta dağılımı

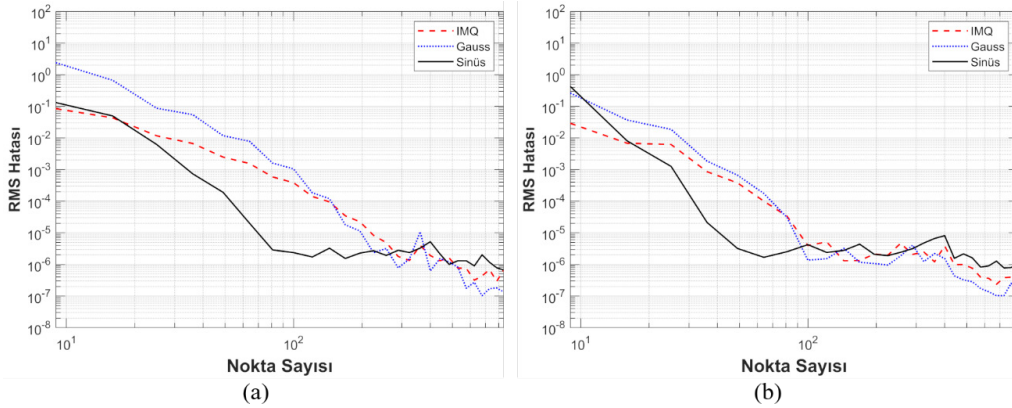
IMQ, Gauss ve Sinüs RTF'leri kullanılarak elde edilen karesel hatanın farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 3 ve 6'da verilen hata sonuçları kıyaslandığında, en düşük karesel hatanın elde edildiği  $\epsilon$  parametresinin, nokta sayısı ve dağılımı dışında probleme ve sınır koşullarına da bağlı olduğu görülmektedir. Benzer duruma daha önce yapılan çalışmalarda da rastlanılmıştır [22]. Bu problemde, nispeten düşük  $\epsilon$  değerleri dışında, yüksek  $\epsilon$  değerleri için de sayısal kararsızlık bölgesiyle karşılaşmıştır. Bu duruma Poisson-1 probleminde rastlanılmamıştır. Yüksek  $\epsilon$  değerleri için hatada oluşan kararsızlığın Neumann sınır koşullarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun dışında, Poisson-1

probleminde olduğu gibi bu problemde de Sinüs-RTF fonksiyonu için hatanın düşük seviyelerde kaldığı  $\epsilon$  değerleri geniş bir aralıktadır. Bu özellik, Sinüs-RTF için diğer fonksiyonlarla kıyaslandığında bir avantaj olmaktadır.

Şekil 7'de karesel hatanın sabit  $\epsilon$  parametresi için nokta sayısına bağlı olarak değişimi Poisson-2 problemi için gösterilmiştir. RTF'ler için kullanılan  $\epsilon$  değerleri Poisson-1 problemiyle aynı olarak alınmıştır. Bu problemde hatanın nokta sayısına göre değişimi Poisson-1 probleminde gözlenen duruma benzerdir. Poisson-1 probleminde farklı olarak, IMQ ve Gauss RTF'ler için nokta sayısı arttıkça hatanın aşağı eğimli bir seyir izlemesi daha belirgindir.

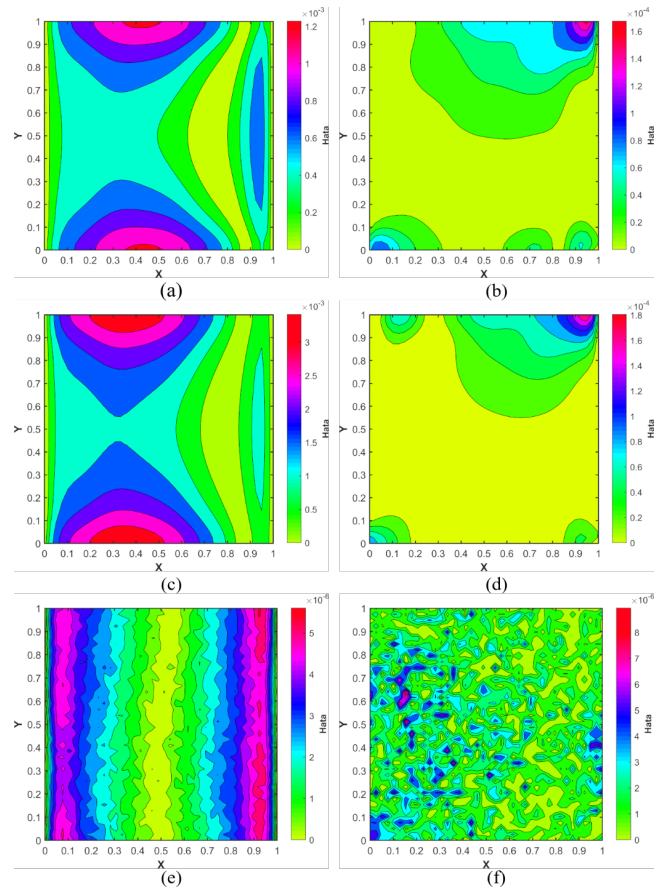


Şekil 6. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre karesel hatanın değişimi: (a) 225 nokta düzgün dağılım, (b) 625 nokta düzgün dağılım, (c) 225 nokta Halton dağılımı, (d) 625 nokta Halton dağılımı



Şekil 7. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için karesel hatanın değişimi: (a) Düzgün nokta dağılımı, (b) Halton nokta dağılımı

Şekil 4 ve 7 incelendiğinde, aynı nokta sayısındaki hata değerlerinin, tüm RTF'ler için Poisson-1 problemine göre yaklaşık 10 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durumun daha iyi irdelenebilmesi için 81 nokta için çözüm bölgesindeki hata davranışı Şekil 8'de gösterilmiştir. Düzgün nokta dağılımı durumunda, IMQ ve Gauss RTF'leri için özellikle Neumann sınır koşullarının tanımlandığı kenarlarda hatanın  $10^{-3}$  mertebelerinde olduğu görülmüştür. Bu durum, Halton nokta dağılımında ortadan kalkmıştır. Poisson-1 problemine benzer şekilde, hata, düzgün nokta dağılımında kenarlara yakın yüksek değerlerdeyken, Halton nokta dağılımında köşelere yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, köşe ve kenarlarda bulunan nokta sayısının artmasıyla hata belirli bir değere kadar azaltılabilmektedir. Sinüs-RTF sonuçlarına bakıldığında ise, hatanın Halton nokta dağılımı için Poisson-1 problemine benzer şekilde genele yayıldığı görülmüştür. Düzgün nokta dağılımı için ise Dirichlet sınır koşullarının tanımlandığı kenarlara doğru hatanın arttığı gözlemlenmiştir. IMQ, Gauss ve Sinüs-RTF için gözlemlenen bu davranışlar, hatanın Poisson-1 problemine göre daha yüksek mertebelerde olmasına neden olmuştur. Fakat bu davranışların en önemli nedeni, nokta sayısına göre en düşük hatayı veren  $\epsilon$  değerinin belirlenerek Şekil 8'in oluşturulmamasıdır. Örnek olarak, Sinüs-RTF'de düzgün nokta dağılımı için  $\epsilon = 2$  değeri seçilerek analiz yapılması durumunda daha düşük mertebede genele yayılmış bir hata davranışı gözlemlenmiştir.



Şekil 8. 81 nokta sayısı için farklı nokta dağılımında çözüm bölgesindeki hata davranışı: (a) IMQ-Düzgün nokta dağılımı, (b) IMQ-Halton nokta dağılımı, (c) Gauss-Düzgün nokta dağılımı, (d) Gauss-Halton nokta dağılımı, (e) Sinüs RTF-Düzgün nokta dağılımı, (f) Sinüs RTF-Halton nokta dağılımı

### 3.3 Problem 3 – Genel Eliptik Problem (Sızıntı Akışı)

$a(x, y) = 2 - x^2 - y^2$ ,  $b(x, y) = e^{x-y}$  değişkenlerine sahip bu genel eliptik problemde Dirichlet sınır koşulları

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{a(x, y) \partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{b(x, y) \partial \phi}{\partial y} \right] = -xe^{x-y}(1-x)(3-2y) + 2y(1-y)(3x^2 + y^2 - x - 2), \quad (15)$$

$$\phi(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \Gamma = \partial\Omega$$

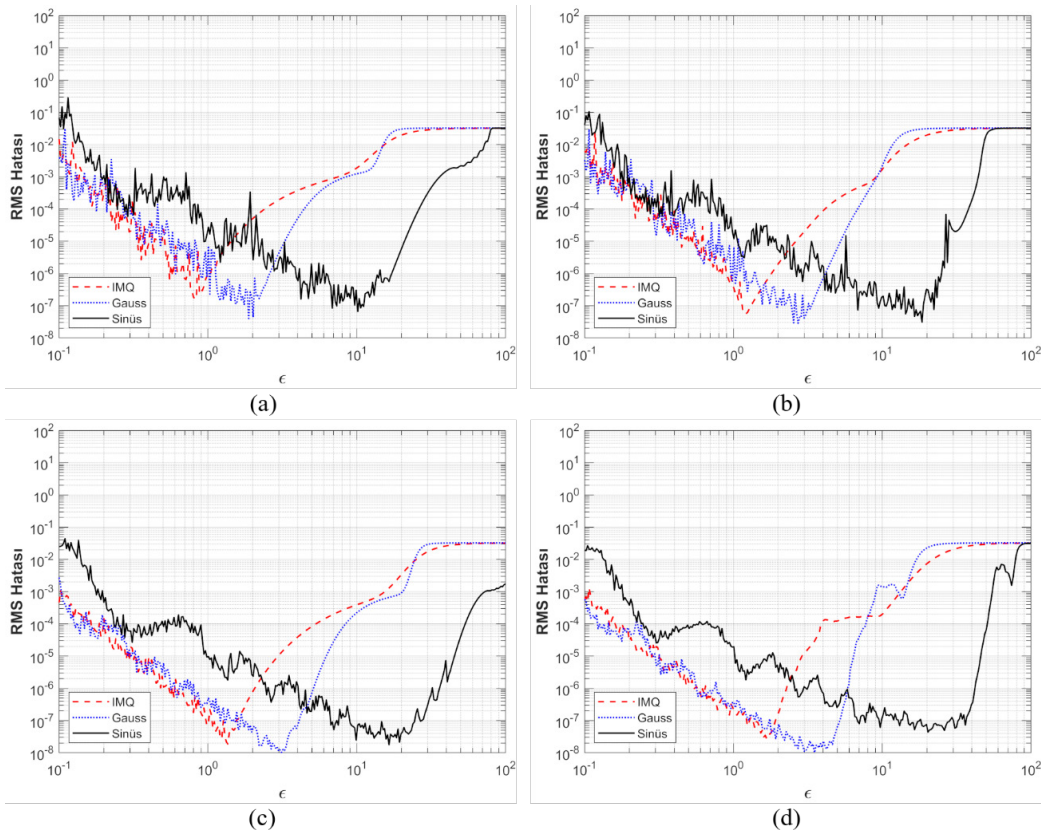
Bu problemin analitik çözümü Eşitlik (16) ile verilmektedir.

$$\phi(x, y) = xy(1-x)(1-y) \quad (16)$$

Şekil 9’da genel eliptik problem için karesel hatanın farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre değişimi verilmiştir. Bu davranış ilk iki test problemiyle benzerlik göstermektedir. Bu test probleminde, hata değerlerinin  $10^{-8}$  mertebelerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir.

bulunmaktadır [20]. Problem tanımı Eşitlik (15)’te verilmektedir:

Fakat burada dikkat edilmesi gereken husus, ilk iki test probleminde analitik çözüm değerleri yaklaşık  $10^{-1}$  mertebelerinde iken bu problemde  $10^{-2}$  mertebesinde olmasıdır. Dolayısıyla hata değerlerinde meydana gelecek yaklaşık 10 katlık azalma göreceli olarak benzer davranışa tekabül etmektedir. Bu problemde Sinüs-RTF, ilk iki test problemine benzer özellikler göstermiştir ve hatanın  $10^{-6}$ ’dan daha düşük elde edilebileceği geniş bir  $\epsilon$  aralığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre karesel hatanın değişimi: (a) 225 nokta düzgün dağılım, (b) 625 nokta düzgün dağılım, (c) 225 nokta Halton dağılımı, (d) 625 nokta Halton dağılımı

Şekil 10’da karesel hatanın sabit  $\epsilon$  parametresi için nokta sayısına bağlı olarak değişimi genel eliptik problem için gösterilmiştir.  $\epsilon$  değerleri ilk iki problemde olduğu gibi; IMQ, Gauss ve Sinüs RTF’ler için sırasıyla  $\epsilon = 1$ ,  $\epsilon = 2$  ve  $\epsilon = 4$  olarak sabit alınmıştır. Genel eliptik problem için karesel hatanın genel

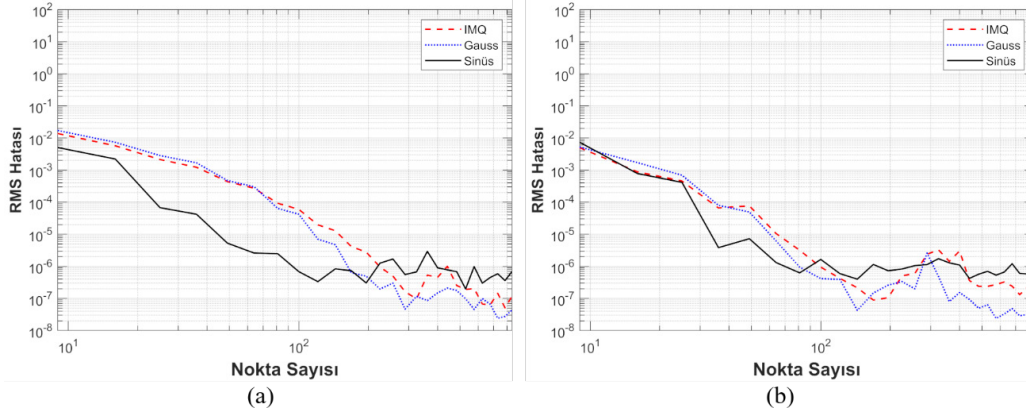
davranışı ilk iki test problemiyle benzerdir. Bu problemde, Gauss RTF özellikle düşük nokta sayılarında Poisson-2 problemine kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir.

Çözüm bölgesindeki hata davranışı 81 nokta için Şekil 11’de verilmiştir. İlk iki problemle kıyaslandığında düzgün

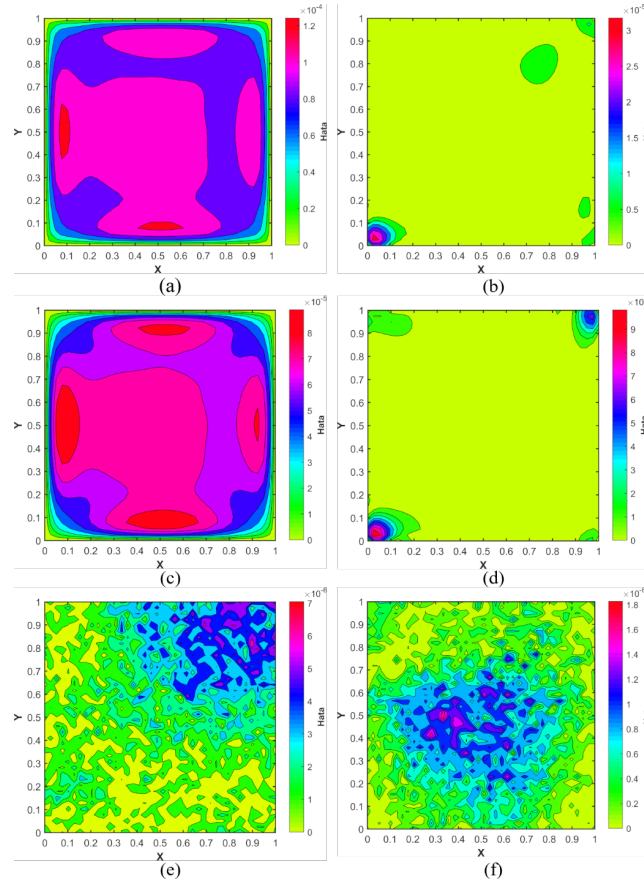


nokta dağılımı durumunda IMQ ve Gauss RTF'leri için hata davranışının farklı olduğu ve hatanın çözüm bölgesi geneli boyunca yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Diğer durumlar için elde edilen sonuçlar ise Poisson-1 problemiyle benzerlik göstermektedir. Şekil 5, 8, ve 11'de verilen hata sonuçları incelendiğinde, hata davranışının IMQ ve Gauss

RTF'leri için problemten ve sınır koşullarından oldukça etkilendiği gözlemlenmiştir. Sinüs RTF için ise hata davranışındaki farklılıklar diğer iki RTF için gözlemlenen farklılıklar kadar belirgin olmamakla birlikte hatanın bazı bölgelerde artış eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 10. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için karesel hatanın değişimi: (a) Düzgün nokta dağılımı, (b) Halton nokta dağılımı



Şekil 11. 81 nokta sayısı için farklı nokta dağılımında çözüm bölgesindeki hata davranışı: (a) IMQ-Düzgün nokta dağılımı, (b) IMQ-Halton nokta dağılımı, (c) Gauss-Düzgün nokta dağılımı, (d) Gauss-Halton nokta dağılımı, (e) Sinüs RTF-Düzgün nokta dağılımı, (f) Sinüs RTF-Halton nokta dağılımı

### 3.4 Problem 4 – 4. Mertebe Eliptik Problem (Kirchhoff Plaka Eğilmesi)

Yayıllı yük altında eğilmeye maruz kalan homojen,

$$\nabla^4 \phi = \frac{p}{D},$$

$$\phi(x, y) = 0, \quad (x, y) \in \Gamma = \partial\Omega,$$

$$M_n = -D \left\{ \nu \nabla^2 \phi(x, y) + (1 - \nu) \left( \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial x^2} + \sin^2 \alpha \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial y^2} + \sin 2\alpha \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial x \partial y} \right) \right\} = 0, \quad (x, y) \in \Gamma = \partial\Omega$$

(17)

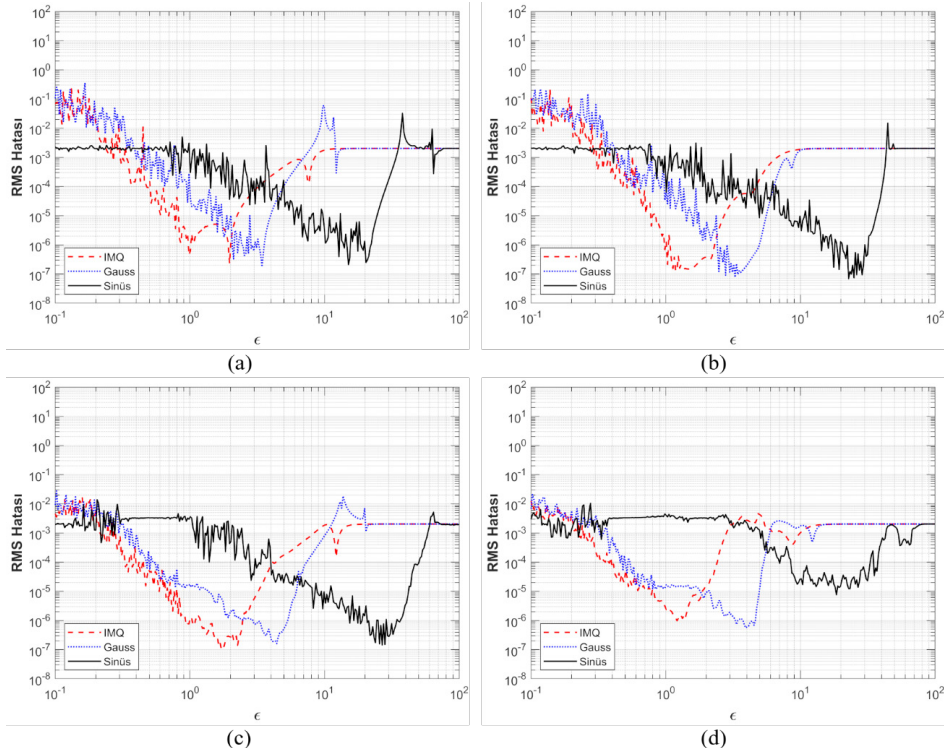
Bu denklemde  $p$  yayıllı yükü,  $D$  plakanın eğilme rijitliğini,  $\nu$  Poisson's oranını,  $\alpha$  ise sınırlarda yüzey normalinin  $x$ -ekseni ile yapmış olduğu açığı ifade etmektedir. Problemde sınır koşulları olarak deformasyon ve moment sıfır olarak tanımlanmaktadır. Problemin analitik çözümü (Navier seri çözümü) Eşitlik (18) ile verilmektedir [23].

$$\phi(x, y) = \frac{16p}{\pi^6 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(m\pi x) \sin(n\pi y)}{mn(m^2 + n^2)^2} \quad (18)$$

Eşitlik (18)'de  $m$  ve  $n$  tek sayıdır. Analitik çözümün elde edilmesinde ilk 100 terim kullanılmıştır. Bu değer seçilmesinin nedeni, diğer tüm terimlerin toplam etkisinin  $10^{-10}$ 'dan daha az olmasıdır. Test probleminde  $p/D = 1$  olarak alınmıştır.

yönden bağımsız özelliklere sahip basit mesnetli ince plakada meydana gelen deformasyon Eşitlik (17)'deki diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır [23]:

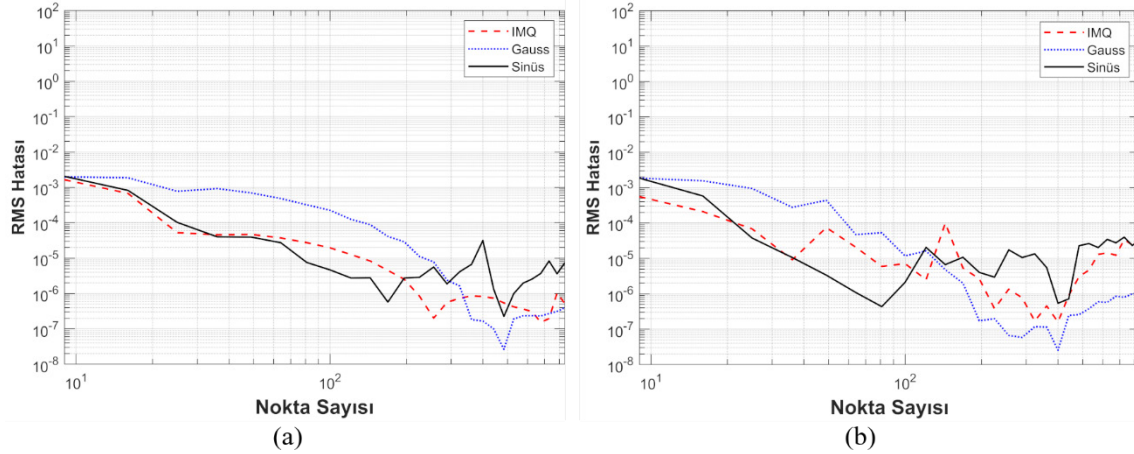
Şekil 12'de plaka eğilmesi problemi için karesel hatanın farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre değişimi verilmiştir. Test edilen diğer problemlerde olduğu gibi IMQ ve Gauss RTF'lerinde hatayı minimum yapan optimum bir  $\epsilon$  değeri hem düzgün hem de Halton nokta dağılımı için gözlemlenmiştir. Benzer davranış Sinüs-RTF için 225 nokta sayısında gözlemlenmiştir. Nokta sayısı 625 olduğunda ise, diğer test problemlerinde olduğu gibi Sinüs-RTF için hatanın belirli bir değerden düşük olduğu bir  $\epsilon$  aralığı ortaya çıkmıştır. 625 nokta sayısı ve Halton nokta dağılımında tüm RTF'ler için minimum hata değerleri diğer test problemlerine kıyasla artmıştır fakat bu oran Sinüs-RTF için daha belirgindir. Sonuçların daha iyi değerlendirilebilmesi için minimum karesel hata ve bu hatanın elde edildiği  $\epsilon$  parametresi değerleri tüm RTF'ler için Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 12. Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için  $\epsilon$  parametresine göre karesel hatanın değişimi: (a) 225 nokta düzgün dağılımı, (b) 625 nokta düzgün dağılımı, (c) 225 nokta Halton dağılımı, (d) 625 nokta Halton dağılımı

**Tablo 2.** Minimum karesel hatanın elde edildiği  $\epsilon$  değerleri

İsim	IMQ				Gauss				Sinüs			
	225	625	225	625	225	625	225	625	225	625	225	625
Nokta sayısı ve dağılımı (H-Halton, D-Düztün)	D	D	H	H	D	D	H	H	D	D	H	H
Minimum hata ( $\times 10^{-7}$ )	2.29	1.00	1.05	12.11	0.98	1.95	0.66	6.71	0.47	1.43	0.75	74.29
$\epsilon$	1.97	1.71	1.11	1.18	3.43	4.22	3.06	4.52	20.78	22.28	22.80	18.52

**Şekil 13.** Farklı nokta dağılımı ve nokta sayısı için karesel hatanın değişimi: (a) Düztün nokta dağılımı, (b) Halton nokta dağılımı

Karesel hatanın sabit  $\epsilon$  parametresi için nokta sayısına bağlı olarak değişimi 4. mertebe eliptik problem için Şekil 13'te gösterilmiştir. Diğer problemlerden farklı olarak,  $\epsilon$  değerleri IMQ, Gauss ve Sinüs RTF'ler için sırasıyla  $\epsilon = 2$ ,  $\epsilon = 4$  ve  $\epsilon = 10$  olarak alınmıştır. Karesel hatanın genel davranışı, Sinüs ve IMQ RTF'leri için benzerlik göstermektedir. Gauss RTF ise özellikle fazla nokta sayılarında daha iyi performans sergilemektedir. Nokta sayısı belirli bir değeri aştığında diğer test problemlerinde olduğu gibi hata davranışında kararsızlıklar oluşmuştur. Bu kararsızlıklar Halton nokta dağılımı için daha belirgindir.

Çözüm bölgesindeki hata davranışı 81 nokta için Şekil 14'te verilmiştir. Bu problemin Eşitlik (18)'de verilen analitik çözümü eksel simetrik. Düztün nokta dağılımı için Gauss ve IMQ RTF'leri için yaklaşık çözümün de simetrik olduğu hata sonuçlarından anlaşılmaktadır. Fakat Halton nokta dağılımında, noktaların düztün olmayan dağılımından dolayı bu davranış bozulmaktadır. Sinüs RTF'de ise fonksiyonun harmonik davranışından dolayı düztün nokta dağılımı olduğu durumda dahi tam simetrik sonuç elde edilememiştir. Diğer test problemlerinde, bu problemde tüm RBF'ler için ortaya çıkan genel hata davranışı gözlemlenmemiştir. Ayrıca, bu test probleminde Halton nokta dağılımı düztün nokta dağılımına göre daha düşük hata oluşmasını sağlamıştır.

### 3.5 Sinüs-RTF Sonuçları ve Tartışmaları

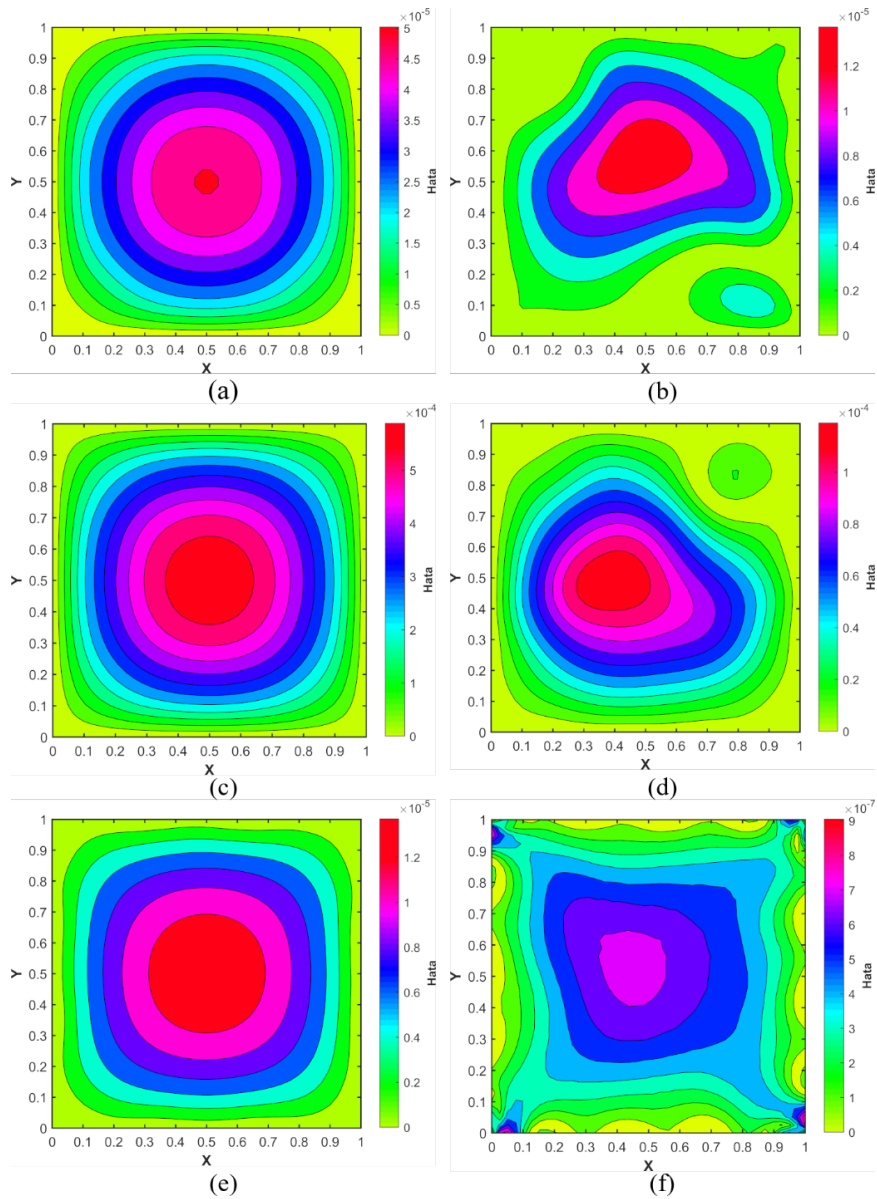
Şekil 3, 6, 9 ve 12'de verilen sonuçlar incelendiğinde, Sinüs-RTF kullanıldığı durumlarda hatanın minimum olduğu bir  $\epsilon$  aralığının olduğu ve bu aralığın problemin türüne, nokta dağılımına ve nokta sayısına göre farklılık gösterdiği görülmüştür. Örnek olarak, 2. mertebe diferansiyel denklem içeren ilk üç test probleminde düztün nokta dağılımı ve 225 nokta sayısı için hatanın minimum olduğu aralık yaklaşık olarak  $4 < \epsilon < 11$  olarak değişirken, Halton nokta dağılımı durumunda aralık  $4 < \epsilon < 20$  olarak gözlemlenmiştir. Nokta sayısı 625'e çıktığında ise bu aralığın özellikle üst sınırının arttığı görülmüştür. Dolayısıyla nokta sayısı ile  $\epsilon$  üst sınırı arasında bir ilişkiden söz edilebilir. 4. mertebe diferansiyel denklem içeren son test probleminde ise 225 nokta sayısı için düztün ve Halton nokta dağılımı durumunda bu aralık sırasıyla  $7 < \epsilon < 23$  ve  $14 < \epsilon < 32$  olarak değişmiştir. Her ne kadar sınır koşullarında 1. mertebe terimler içeren üçüncü test probleminde ilk iki test problemine kıyasla  $\epsilon$  aralığında ufak farklılıklar olsa da, bu farklılıklar 2. mertebe terimleri içeren son test probleminde belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır.

Test edilen problemlerde Sinüs-RTF'nin farklı nokta sayılarında ve  $\epsilon$  değerlerinde nasıl bir davranış gösterdiği Şekil 15'te gösterilmektedir. 2. mertebe problemlerde geniş bir  $\epsilon$  aralığında ve düşük nokta sayılarında düşük hata mertebelerine erişilebilmiştir. Düztün nokta dağılımında 50, Halton nokta dağılımında ise 40 nokta sayısından

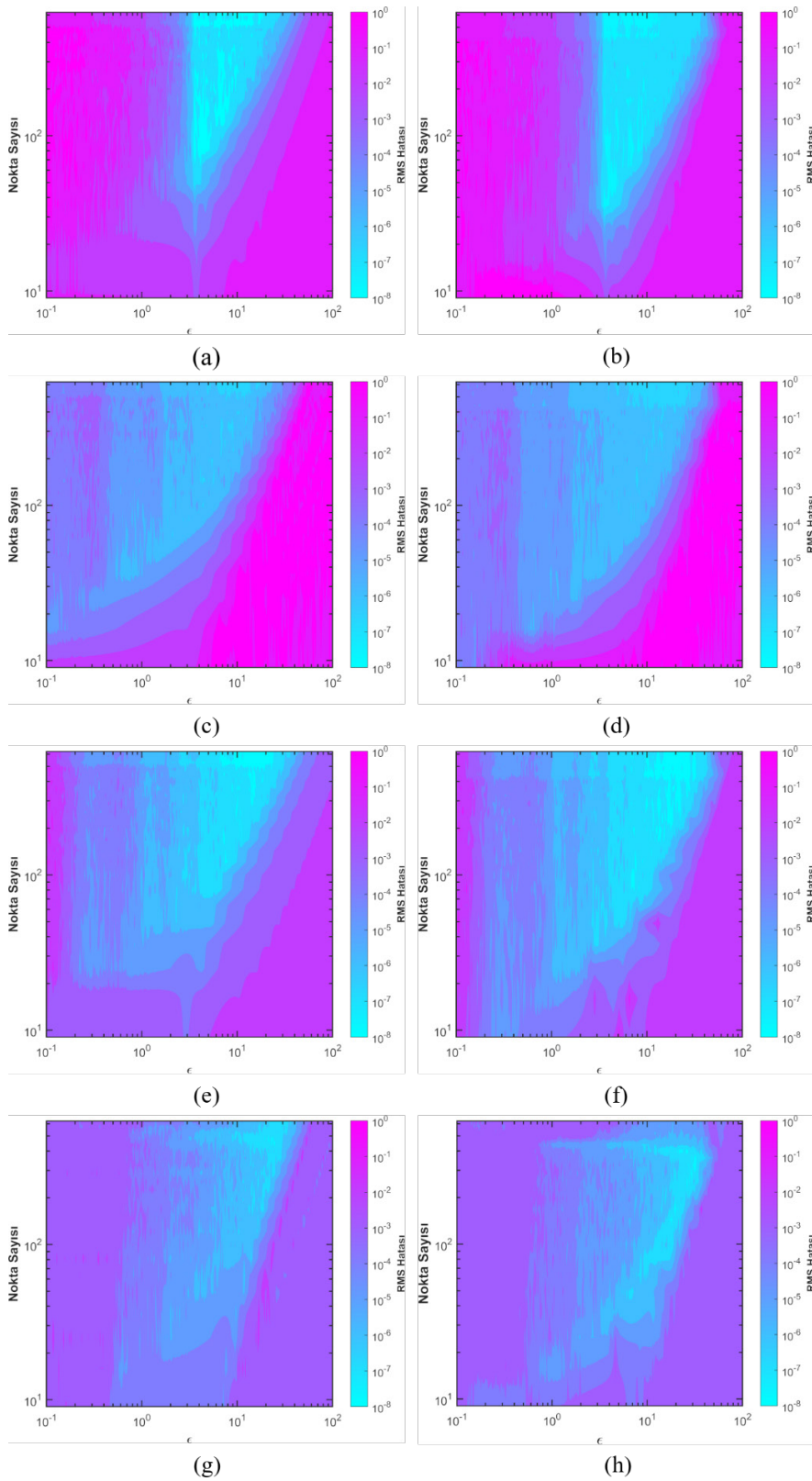
başlayarak nokta sayısındaki artış ile orantılı olarak genişleyen bir  $\epsilon$  aralığında düşük hatalar elde edilebilmiştir. Plaka eğilmesi probleminde ise optimum  $\epsilon$  aralığının daha dar olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle Halton nokta dağılımında nokta sayısının 500'ün üzerine çıkmasıyla sayısal kararsızlıklar nedeniyle diğer problemlerde hatanın düşük olduğu  $4 < \epsilon < 40$  aralığında daha yüksek hataların oluştuğu görülmüştür. Bu davranışa neden olan en önemli etken 4. mertebe problemlerde türevlerin daha fazla sayıda terime sahip olması ve çözümün bu terimlerin hassas olarak elde edilmesine yakından bağlı olmasıdır.

#### IV. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada ağırsız yöntemlerin bir kolu olan radyal özelliğe sahip temel fonksiyon yöntemi için yeni bir fonksiyon önerilmiştir. Önerilen fonksiyon dört farklı problemde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen Sinüs-RTF'nin, IMQ ve Gauss RTF'ye göre daha az nokta sayılarında daha düşük hata değerlerine ulaşabildiğini göstermiştir. Ayrıca, nokta sayısının artmasıyla kullanılabilir optimum  $\epsilon$  aralığının genişlediği ve nokta sayısı ile  $\epsilon$  üst değerinin ilişkili olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, önerilen Sinüs-RTF'nin ağırsız yöntemlerde, IMQ ve Gauss RTF'ye kıyasla bir alternatif olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir.



**Şekil 14.** 81 nokta sayısı için farklı nokta dağılımında çözüm bölgesindeki hata davranışı: (a) IMQ-Düzyük nokta dağılımı, (b) IMQ-Halton nokta dağılımı, (c) Gauss-Düzyük nokta dağılımı, (d) Gauss-Halton nokta dağılımı, (e) Sinüs RTF-Düzyük nokta dağılımı, (f) Sinüs RTF-Halton nokta dağılımı



**Şekil 15.** Farklı nokta dağılımı, nokta sayısı ve  $\epsilon$  parametresine göre Sinüs-RTF için karesel hatanın değişimi: **(a)** Poisson 1-Düzenli nokta dağılımı, **(b)** Poisson 1-Halton nokta dağılımı, **(c)** Poisson 2-Düzenli nokta dağılımı, **(d)** Poisson 2-Halton nokta dağılımı, **(e)** Problem 3-Düzenli nokta dağılımı, **(f)** Problem 3-Halton nokta dağılımı, **(g)** Problem 4-Düzenli nokta dağılımı, **(h)** Problem 4-Halton nokta dağılımı

## KAYNAKLAR

- [1] Altinkaynak, A., Gupta, M., Spalding, M. A., & Crabtree, S. L. (2011). Melting in a Single Screw Extruder: Experiments and 3D Finite Element Simulations. *International Polymer Processing*, 26(2), 182-196.
- [2] Uygun, M., & Kırkköprü, K. (2011). Katı yakıtlı roket motorlarında daimi olmayan akışların ikili zaman adımlaması yöntemi ile sayısal benzetimi. *İTÜDERGİSİ/d*, 8(2).
- [3] Kığılı, H. N. (2006). *Tünel Üst Yapı Etkileşim Problemlerinin Sınır Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4] Rodrigues, D., Belinha, J., Pires, F., Dinis, L., & Jorge, R. N. (2018). Homogenization technique for heterogeneous composite materials using meshless methods. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 92, 73-89.
- [5] Fasshauer, G., & McCourt, M. (2015). *Kernel-based approximation methods using Matlab* (Vol. 19): World Scientific Publishing Company.
- [6] Kansa, E. J. (1990b). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—II solutions to parabolic, hyperbolic and elliptic partial differential equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 19(8), 147-161.
- [7] Kansa, E. J. (1990a). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—I surface approximations and partial derivative estimates. *Computers & Mathematics with Applications*, 19(8), 127-145.
- [8] Fornberg, B., & Flyer, N. (2015b). Solving PDEs with radial basis functions. *Acta Numerica*, 24, 215-258.
- [9] Fornberg, B., & Flyer, N. (2005). Accuracy of radial basis function interpolation and derivative approximations on 1-D infinite grids. *Advances in Computational Mathematics*, 23(1-2), 5-20.
- [10] Fasshauer, G. E. (2007). *Meshfree approximation methods with MATLAB* (Vol. 6): World Scientific.
- [11] Fornberg, B., & Wright, G. (2004). Stable computation of multiquadric interpolants for all values of the shape parameter. *Computers & Mathematics with Applications*, 48(5-6), 853-867.
- [12] Larsson, E., Lehto, E., Heryudono, A., & Fornberg, B. (2013). Stable computation of differentiation matrices and scattered node stencils based on Gaussian radial basis functions. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 35(4), A2096-A2119.
- [13] Fasshauer, G. E. (1999). Solving differential equations with radial basis functions: multilevel methods and smoothing. *Advances in Computational Mathematics*, 11(2-3), 139-159.
- [14] Chou, C., Sun, C., Young, D., Sladek, J., & Sladek, V. (2015). Extrapolated local radial basis function collocation method for shallow water problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 50, 275-290.
- [15] Farahani, B. V., Berardo, J., Belinha, J., Ferreira, A., Tavares, P. J., & Moreira, P. (2017). On the optimal shape parameters of distinct versions of RBF meshless methods for the bending analysis of plates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 84, 77-86.
- [16] Xia, C.-c., Jiang, T.-t., & Chen, W.-f. (2016). Particle Swarm Optimization of Aerodynamic Shapes With Nonuniform Shape Parameter-Based Radial Basis Function. *Journal of Aerospace Engineering*, 30(3), 04016089.
- [17] Biazar, J., & Hosami, M. (2017). An interval for the shape parameter in radial basis function approximation. *Applied Mathematics and Computation*, 315, 131-149.
- [18] Larsson, E., & Fornberg, B. (2003). A numerical study of some radial basis function based solution methods for elliptic PDEs. *Computers & Mathematics with Applications*, 46(5), 891-902.
- [19] Fornberg, B., & Flyer, N. (2015a). *A primer on radial basis functions with applications to the geosciences*: SIAM.
- [20] Li, J., Cheng, A. H.-D., & Chen, C.-S. (2003). A comparison of efficiency and error convergence of multiquadric collocation method and finite element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 27(3), 251-257.
- [21] Golbabai, A., Mohebianfar, E., & Rabiei, H. (2015). On the new variable shape parameter strategies for radial basis functions. *Computational and Applied Mathematics*, 34(2), 691-704.
- [22] Schaback, R. (2009). Solving the Laplace equation by meshless collocation using harmonic kernels. *Advances in Computational Mathematics*, 31(4), 457.
- [23] Leitao, V. M. (2001). A meshless method for Kirchhoff plate bending problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52(10), 1107-1130.