

EUROPEAN JOURNAL OF
**ENGINEERING AND
APPLIED SCIENCES**

ISSN:2651-3412. Volume:6 Number: 2



European Journal of Engineering and Applied Sciences

Volume: 6 Number: 2 December 2023

Eur J Eng Appl Sci

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ejeas>

email: ejeas@nku.edu.tr

ISSN: 2651-3412



Owner



On behalf of Tekirdağ Namık Kemal University,
 Dean of Çorlu Faculty of Engineering,
 Prof. Dr. Lokman Hakan TECER

Editor-in-Chief

Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ

Vice Editor

Asst. Prof. Dr. Rabia KORKMAZ TAN
 Asst. Prof. Dr. Suna Özden ÇELİK
 Asst. Prof. Dr. Gülen ÖZKULA

Section Editors

Prof. Dr. Hafız ALİSOY
 Prof. Dr. Pelin GÜRKAN ÜNAL
 Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE
 Prof. Dr. Erdiñ UZUN
 Assoc. Prof. Dr. Koray ÇİFTÇİ
 Assoc. Prof. Dr. Reşat MUTLU

Assoc. Prof. Dr. Kenan ÇINAR
 Asst. Prof. Dr. Ulviye POLAT
 Prof. Dr. Aylin AKYILDIZ
 Asst. Prof. Dr. Rabia KORKMAZ TAN
 Asst. Prof. Dr. Suna Özden ÇELİK
 Asst. Prof. Dr. Gülen ÖZKULA

Language Editör

Assoc. Prof. Dr. Ufuk ÇETİN

Namik Kemal University

Turkey

Editorial Board

Prof. Dr. Lokman Hakan Tecer
 Prof. Dr. Gülen İskender
 Prof. Dr. Aşkın Demirkol
 Prof. Dr. Yılmaz Kılıçaslan
 Prof. Dr. Oğuzhan Çiçekođlu
 Prof. Dr. Gül Kremer
 Prof. Dr. Nevin Çiğdem Gürsoy
 Prof. Dr. Rızvan Erol
 Prof. Dr. Gülgün Kayakutlu
 Prof. Dr. Emine Çokgör
 Asst. Prof. Dr. İsmail Faik Başkaya
 Assoc. Prof. Dr. Kristina Uzuneanu
 Asst. Prof. Dr. Feride Şermin Utku
 Dr. Giusy Lofrano

Namik Kemal University
 Istanbul Technical University
 Sakarya University
 Adnan Menderes University
 Boğaziçi University
 Iowa State University
 Istanbul Technical University
 Cukurova University
 Istanbul Technical University
 Istanbul Technical University
 Boğaziçi University
 "Dunarea de Jos" University of Galati
 Yeditepe University
 University of Salerno

Turkey
 Turkey
 Turkey
 Turkey
 Turkey
 USA
 Turkey
 Turkey
 Turkey
 Turkey
 Turkey
 Romania
 Turkey
 Italy

Correspondance Address

T.N.K.Ü. Çorlu Mühendislik Fakültesi Dekanlığı Silahtarađa Mahallesi Üniversite 1. Sokak No:13 59860
 Çorlu / Tekirdağ, TURKEY
 e-mail: ejeas@nku.edu.tr
 Tel: +90 282 2502300
 Fax: +90 282 2509924

Front & Back Pages Designed by Abdurrahman Özdemir



Yayın hayatına başlarken,

Trakya'nın kalbinde 1992 yılında kurulan Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi'nin "European Journal of Engineering and Applied Sciences (EJEAS)" isimli dergisi yayın hayatına başlıyor. Temel ve uygulamalı mühendislik konularında evrensel düzeyde bilgi üretmek, ürettiği bilgiyle teknolojik gelişmelere yön verebilmek ve bu bilgileri toplumsal faydaya dönüştürmek misyonuna sahip fakültemizin bu ilk sayısı ile yayın hayatına kazandırdığı dergimiz yılda iki kez yayınlanacaktır.

European Journal of Engineering and Applied Science (EJEAS) disiplinler arası alanlarda orjinal araştırma makalelerini, vaka çalışmalarını ve teknik raporları, derleme ve analiz raporlarını yayınlamayı amaçlamaktadır. Yayın ücreti bulunmayan ve bilimsel hakemli araştırma dergisinde Fen ve Mühendislik Bilimlerinde deneysel, teorik veya hesaplamalı Türkçe ve İngilizce hazırlanmış güncel ve özgün bilimsel çalışmalara yer verilecektir. EJEAS konusu aşağıdaki disiplinlerdeki çalışmaları kapsayacaktır, ancak konu kapsamı bunlarla sınırlı tutulmayacaktır:

- Otomasyon ve mekatronik mühendisliği
- Biyomedikal mühendisliği
- Bilgisayar bilimi ve yazılım mühendisliği
- İnşaat mühendisliği ve mimarlık
- Elektrik, elektronik ve telekomünikasyon mühendisliği
- Çevre mühendisliği
- Endüstriyel ve imalat mühendisliği
- Makine mühendisliği
- Malzeme bilgisi
- Tekstil mühendisliği

Dergiye gelen tüm çalışmalar çift-kör hakem değerlendirme sürecinden geçerek uygun bulunanalar yayınlanma sürecine alınacaktır.

Bu ilk sayısı ile yayın hayatına başlayan dergimizin size ulaşmasında emeği geçen herkese teşekkür eder, dergimize yayın hayatında başarılar dilerim.

Prof. Dr. Lokman Hakan TECER
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi Dekanı



Değerli Bilim İnsanları,

“European Journal of Engineering and Applied Sciences (EJEAS)” isimli dergimiz, 2018 yılında yayın hayatına başlamış olup, bilimsel hakemli dergi olarak, Fen ve Mühendislik disiplinlerinde “Türkçe ve İngilizce” hazırlanmış güncel araştırma ve derleme çalışmalarına yer vermekte ve yılda iki sayı olarak yayınlanmaktadır.

Dergimizin ilk yılında, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi'nin farklı disiplinlerinde görev yapmakta olan çok değerli akademisyenleri, gönüllü olarak dergimizin tüm süreçlerine destek vermiştir. Bu durum bizleri daha güçlü kılmış ve çalışmalarımızda sinerji yaratarak, azim ve kararlılığımıza önemli katkı sağlamıştır. Dergimizin ilerleyen sayılarında daha güçlü bir yapı ile daha iyi noktalara ulaşmasını, alana ve literatüre daha fazla katkı sağlayarak tüm dünyadaki bilim insanları tarafından yayın gönderilen bir dergi konumuna gelmesini ümit ediyorum.

Dergimizin bu iki sayısında değerli çalışmalarını bizimle paylaşmış dergimizde yayınlanmasına katkı sağlayan tüm yazarlarımıza, yayınların değerlendirilmesi ve süreç içerisinde her türlü bilgi ve tecrübesi ile bizleri yalnız bırakmayan çok değerli hakemlerimize, makalelerin dergimizde yayınlanma sürecinin başından sonuna kadar özveriyle çalışan alan editörlerimize ve editörler kurulumuza, bu süreçte desteklerini esirgemeyen Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi'nin dekanı sayın Prof. Dr. Lokman Hakan Tecer'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ
EJEAS Baş Editörü



Dear Colleagues,

Our “European Journal of Engineering and Applied Sciences (EJEAS)” journal has begun in 2018 as a scientific refereed journal. EJEAS includes up to date Turkish and English languages based research in Science and Engineering and publishes two issues in a year.

In the first year of EJEAS, very valuable academicians of Tekirdag Namik Kemal University have contributed and supported all the processes voluntarily. This made us stronger and with the synergy, it boosted our willingness. I hope that it will achieve better success soon, contribute more to the community, and become a globally recognized journal which publishes journals to entire science community in the world.

For these two issues, I would like to thank our authors who share their studies with us to contribute the journal, our reviewers for assessing the articles with their knowledge and experience, our editors and editorial board for their willingness from the beginning to the end, lastly, dear Dean of Engineering at Tekirdag Namik Kemal University, Prof. Dr. Lokman Hakan Tecer for his ultimate support.

Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ
Editor in-Chief pf EJEAS



CONTENT

Research Articles

1. *Mert LEVENT Halil Nusret BULUŞ Soner ÇELEN Aytaç MORALAR* 50-55
Comparison of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Methods in the Hazelnut Shell Drying Process
2. *Gülizar ALİSOY Necati ÖZBEY Lütfi ULUSOY Hafız ALİSOY* 56-60
Unconditional Optimization of Cylinder-Plane Corona Electrode System
3. *Aysun SAĞBAŞ Muhammet DEVECİ Ulviye POLAT* 61-73
A Decision Support System Based on Hybrid Approach With Copras And Interval Type-2 Fuzzy Topsis For Evaluation Of Renewable Energy Alternatives
4. *Aysun SAĞBAŞ Melike Selen DERMENCİ* 74-85
Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi
5. *Gulnare MİRZE* 86-90
Treatment Of Oil-Containing Industrial Wastewater In Thin-Layer Oil Traps
6. *Rabia KORKMAZ TAN Kaan ÖNDER Fatih YERİŞENOĞLU Reşat MUTLU* 91-97
Usage of an Excel Spreadsheet for a Thermal Endurance Test Report
7. *Hafız ALİSOY Gülizar ALİSOY Mahir YASAR Selcen AKINCI Gizem Büşra GÖK Mohammadreza MASOUMİSOUREH* 98-101
A Variational Problem for the Power Factor in Capacitance Charging Process
8. *Adnan MAZMANOĞLU* 102-110
İstatistik Yöntemleri ve İstatistik Mühendisliğinin Dil ve Edebiyat Araştırmalarında ve Mühendislik Alanında Kullanımına İlişkin Önerilere Bir Bakış
9. *Ömer Faruk GÜDER Betül TAŞDELEN Uğur AKYOL* 111-119
Doğal Polimer Bazlı Hidrojellerin Sentezi ve Karakterizasyonu
10. *Rıza ATAV Selma SOYSAL Fatma YILDIZ* 120-123
PES/CO Kumaşlarda Geri Dönüştürülmüş PES ve Virjin PES Kullanımının Etkisi

Araştırma Makalesi

Comparison of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Methods in the Hazelnut Shell Drying Process

Mert Levent¹ , Halil Nusret Buluş^{2,*} , Soner Çelen³ , Aytaç Moralar⁴ 

^{1,2} Department of Computer Engineering, Çorlu Engineering Faculty, Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye, 59860

^{3,4} Department of Mechanical Engineering, Çorlu Engineering Faculty, Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye, 59860
¹mertlevent92@gmail.com, ²nbulus@nku.edu.tr, ³scelen@nku.edu.tr, ⁴amoralar@nku.edu.tr

Geliş: 09.11.2023

Kabul: 14.11.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1388492

Abstract: Drying and storing food products have been widely used techniques for extending shelf life for many years. In recent times, there has been a focus on the drying of food residues, similar to the preservation of foods by drying. The process of drying a product involves reducing the moisture content within the product. However, the devices established to reduce moisture content are often costly and rely heavily on experience-based systems for determining the drying ratio. Therefore, in recent years, there has been significant interest in the mathematical modeling of drying processes and the creation of a model for system behavior using artificial intelligence methods. This study aims to model the drying process of hazelnut shells using artificial intelligence techniques, specifically artificial neural networks and fuzzy logic methods. The proximity of the models created to the experimental results of the drying ratio is examined.

Keywords: ANFIS, Artificial Neural Network, Drying, Fuzzy Logic, Levenberg Marquardt, Prediction

Fındık Kabuğu Kurutma Sürecinde Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Özet: Gıda ürünlerinin kurutulması kullanım ömrünü uzatması açısından uzun yıllardır kullanılan bir tekniktir. Gıdaların kurutulması gibi gıda artıklarının da kurutulması son yıllarda çalışmalara konu olmuştur. Ürün kurutma işlemi, ürün içerisindeki nem miktarının azaltılması anlamına gelmektedir. Nem miktarının azaltılması amacıyla kurulmuş olan düzenekler maliyetli ve daha çok kuruma oranının tespitinin tecrübeye dayandığı sistemlerdir. Bu sebeple son yıllarda kurutma süreçlerinin matematiksel olarak modellenmesi, yapay zeka yöntemleri ile sistem davranışının bir modelinin oluşturulması çalışmaları ilgi çekmiştir. Bu çalışmada fındık kabuğu kurutma işleminin yapay zeka tekniklerinden olan yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri ile modellenmesi gerçekleştirilmesi hedeflenmiş ve oluşturulan modellerin kuruma oranının deneysel sonuçlarına yakınlığı incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: ANFIS, Bulanık Mantık, Kurutma, Levenberg Marquardt, Tahmin, Yapay Sinir Ağları

1. Introduction

In today's world, many foods and food items cannot be stored for an extended period due to their high water content. Therefore, drying methods play a significant role in food preservation. Various techniques are employed to carry out the drying process.

Hazelnuts are a product that grows in the Blacksea region of

Turkey. The drying of hazelnuts holds significant importance in the Blacksea region. Considering the climate conditions and soil structure of the region, there are challenges in open-air drying. Therefore, instead of relying on sunlight, drying machines are more commonly used. Drying systems, which include these drying machines, represent a more costly approach compared to open-air drying with sunlight. This cost includes both the setup and operation of the system.

*Corresponding author
E-mail address: nbulus@nku.edu.tr

Consequently, utilizing artificial intelligence techniques based on past data to predict drying speed and efficiency has become an increasingly popular approach.

2. Literature Review

Hamed Akbarpour and colleagues (2016) obtained numerical and experimental results to demonstrate the impact of nonlinear models on predicting the pore size of nano-porous anodic alumina (NPAA). They employed ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) and MLR (Multiple Linear Regression) applications for this purpose. The results obtained from the models were compared between two empirical formulas to demonstrate the accuracy of the models and test data. The experimental results indicate that the models are sufficiently effective in predicting the pore size of NPAA membranes. ANFIS emerged as the superior model, with MLR performing better than other empirical formulas [1].

Saban Pusat and colleagues (2016) implemented a novel methodology to predict coal moisture content during the drying process. ANFIS was employed to predict coal moisture content at any given time during the drying process. Four different experiments were conducted with MSE and R^2 values during the testing phase. The experiments revealed that the ANFIS network achieved scientifically satisfactory results with acceptable deviations. By utilizing ANFIS, drying channels for cases not experimentally performed could be easily predicted. Moreover, the required number of experiments was reduced [2].

In 2018, Maryam Dolatabad and her team conducted a study to assess the concurrent removal efficiency of Basic Red 46 (BR46) and Cu (both dye and heavy metal) from aqueous solutions. They employed advanced feedforward Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) models to predict the adsorption capacity of sawdust in the simultaneous removal of cationic dye and heavy metal ions. The reported results indicated that both ANN and ANFIS are promising predictive techniques, displaying satisfactory accuracy in predicting the simultaneous removal of dye and Cu (II) from aqueous solutions. The low values of the statistical parameters suggested superior performance for both models. The study achieved a robust regression analysis with an R^2 ranging from 0.98 to 0.99 for both dye and Cu removal [3].

Victor H. Quej and colleagues (2017) compared the performance of Support Vector Machine (SVM), ANFIS, ANN techniques to predict daily global solar radiation in Yucatán, Mexico. They used three statistical indicators (R^2 , RMSE, and MAE) to evaluate model performance. The SVM technique with an RBF kernel demonstrated superiority over other approaches used for predicting global solar radiation in Yucatán, Mexico. This result suggests that SVM can be successfully employed to predict daily solar radiation in humid tropical environments in Mexico. While ANFIS and ANN techniques showed similar results, they did not perform as well as the SVM technique [4].

In 2018, Mohammad Kaveh and his team conducted a research study aiming to develop and apply an ANFIS and ANN model for predicting the drying properties of potatoes, garlic, and

melons in a convective hot air dryer. The drying experiments were carried out at varying air temperatures of 40, 50, 60, and 70°C, coupled with air velocities of 0.5, 1, and 1.5 m/s. Various ANN and ANFIS models were used to determine the D effect and SEC performance. The results of this research showed that the ANFIS model exhibited high predictive capabilities for D effect, SEC, MR, and DR with R^2 values of 0.9900, 0.9917, 0.9774, and 0.9901, respectively. Therefore, the study concluded that the ANFIS model could be recommended as the best model [5].

Bahman Najafi and colleagues (2018) conducted small-scale biogas production using spent mushroom compost (SMC). From the biomass obtained through biogas production, they investigated factors influencing biogas production, including the C/N ratio, temperature, and retention time, as independent variables in biogas production and production modeling, using ANN and ANFIS methods. The study concluded that the ANFIS network accurately predicted output values in both thermophilic and mesophilic conditions [6].

Artur S. C. and colleagues (2018) compared the optimization of sugarcane delignification using Alkaline Hydrogen Peroxide (AHP) with ANN and ANFIS. Two variables were experimentally evaluated: temperature (25-45°C) and hydrogen peroxide concentration (1.5-7.5% (a/h)). The AHP pre-treatment proved successful in the delignification of sugarcane bagasse. Both ANN and ANFIS demonstrated good prediction efficiency with low RMSE values and R^2 values close to 1. The ANFIS model outperformed the ANN model in predicting xylose concentration [7].

3. Materials and Methods

In this study, drying process results for hazelnut products were obtained in the laboratory using a microwave setup. The obtained results, constituting 80% of the data, were used as training data for artificial intelligence methods, and the remaining 20% of experimental data was aimed at being predicted. A comparison of the two methods was conducted based on the predicted results.

The first artificial intelligence method used is the feedforward artificial neural network. Various models were created by using different transfer functions when forming ANN. The ANN model that provided results closest to the experimental data was compared with another method, ANFIS.

3.1. Artificial Neural Networks

The ability to derive, create, and discover new information through the learning process, which is a characteristic of the human brain, is a system that is mathematically represented. ANN learn through experiences, similar to humans, and utilize this learning in decision-making. Therefore, ANN has the capability of making good generalizations [8].

ANNs consist of neurons, and these neurons form a neural network by connecting to each other in various ways. They possess the capacity for learning, memory, and revealing relationships between data.

Recently, ANNs have become a popular and useful model in many disciplines for classification, clustering, pattern recognition, and prediction. ANNs, as a type of model for

machine learning, have become relatively competitive in terms of utility compared to traditional regression and statistical models [9].

ANNs consist of layers (Figure 1). Neurons in each layer are connected to the neurons in the next layer. ANNs are examined in three main layers: the input layer, the hidden layer, and the output layer [10].

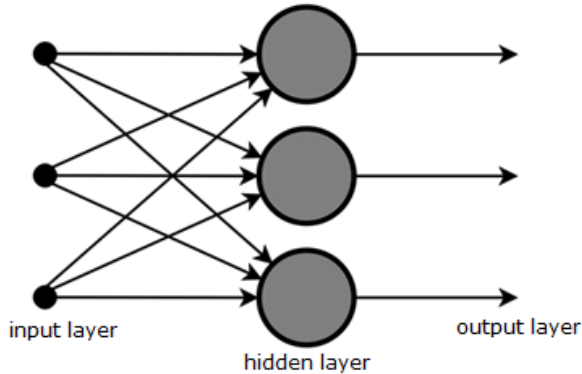


Figure 1. Artificial Neural Networks General Architecture [10]

3.2. ANFIS

ANFIS is a learning technique that transforms inputs into outputs through fuzzy logic and highly interconnected neural networks. It combines the advantages of both ANN and fuzzy logic under a single roof. ANFIS is a hybrid learning algorithm.

ANFIS provides an accelerated learning capacity and adaptable interpretive capabilities to model complex patterns and understand nonlinear relationships. It has been applied and refined in various fields, offering solutions to problems characterized by time and space complexity as well as widely occurring repetitive issues [11].

In fuzzy logic, there are various inference methods. Some of these inferences are specifically developed to operate directly within the framework of fuzzy logic. The two most commonly used methods are Mamdani inference and Sugeno inference.

In the Mamdani system, each input and output is a fuzzy value. Mamdani inference, with its more intuitive and easily understandable rule basis, is highly suitable for expert system applications, such as medical diagnosis, where rules are derived from human expert knowledge.

Sugeno fuzzy inference is a frequently preferred method in control problems. Unlike the Mamdani method, where fuzzy values are given as output, Sugeno provides the output in a functional form. Therefore, the Sugeno inference system is highly suitable for mathematical analysis.

3.2.1. Membership Functions

Membership functions are curves that define how each point in the input space is mapped to a membership value (or degree of membership) between 0 and 1. It is a graphical representation of the magnitude of participation for each input. Rules use input membership values as weighting factors to determine their influence on fuzzy output sets. Once the

functions are deduced, scaled, and combined, they are fuzzified into a clear output guiding the system.

The simplest membership functions are created using straight lines. Due to their simple formulas and computational efficiency, both triangular and trapezoidal shapes have been widely used [12].

3.3. Performance Measures

In this study, the performance measurements of predictions were utilized to determine how closely they approximated the experimental data. The methods used for performance measurements include the root mean square error, mean absolute percentage error, and R^2 .

Root Mean Square Error (RMSE) (Eq. 1) provides the distance between predicted results and actual values as an absolute number. It is one of the most commonly used metrics to assess the quality of predictions. RMSE is the standard deviation of prediction errors (residuals). This value can range between 0 and infinity. A value close to zero indicates that the model is performing well.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n e_j^2}{n}} \quad (1)$$

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) (Eq. 2) is one of the most commonly used measures of prediction accuracy due to its scale-independence and interpretability advantages. It is widely used because it is easy to interpret and explain. For example, a MAPE value of 10% means that the average difference between the predicted value and the actual value is 10%.

$$\text{MAPE} = \frac{100}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|e_j|}{|A_j|} \quad (2)$$

R-squared (R^2) (Eq. 3) is used to explain how well the independent variables in a linear regression model account for the variability in the dependent variable. The R^2 value always increases with the addition of independent variables, even if they are unnecessary, which can lead to the inclusion of irrelevant variables in the model.

$$r^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i)^2} \right) \quad (3)$$

4. Experimental Results

In this study, a 9-feedforward artificial neural network model consisting of different transfer functions was trained, and predictions for the drying process of hazelnut products were made. Additionally, an ANFIS model was created, and a similar prediction process was carried out on the same dataset. 80% of the experimental data was used as training data.

Experimental data was obtained from a conveyor-belt microwave system established in the Laboratory of the Department of Mechanical Engineering at Tekirdağ Namık Kemal University [13].

The first step in the prediction process in artificial neural

networks begins with the selection of input, output, and test data. Here, the input data consists of randomly selected 80% of the experimental data. The input data has four columns, including time, power, wet mass, and dry mass. The output data is the moisture content produced by the selected input data from the experimental data. Test data is determined as the remaining 20% of the experimental data not selected as input data.

After the data is selected, the process of creating an artificial neural network is carried out. First, the process of determining the number of neurons in the hidden layer is performed. In the experiments conducted in this study, models with 10, 20, and 30 neurons were tested. Three transfer functions were used in the experiments: hyperbolic tangent sigmoid, logistic sigmoid, and linear functions. By using these transfer functions separately in the experiments, a total of nine models were created. Additionally, the Levenberg-Marquardt algorithm was selected as the training function.

After the model is created, it needs to be trained with the training data. The process of training the network was carried out by selecting input and output data created by the training data. After the training process is completed, test data is input into the created artificial neural network to make predictions and generate predicted outputs. The regression graph of the model that gives the closest results to the experimental results from these 9 models is presented in Figure 2.

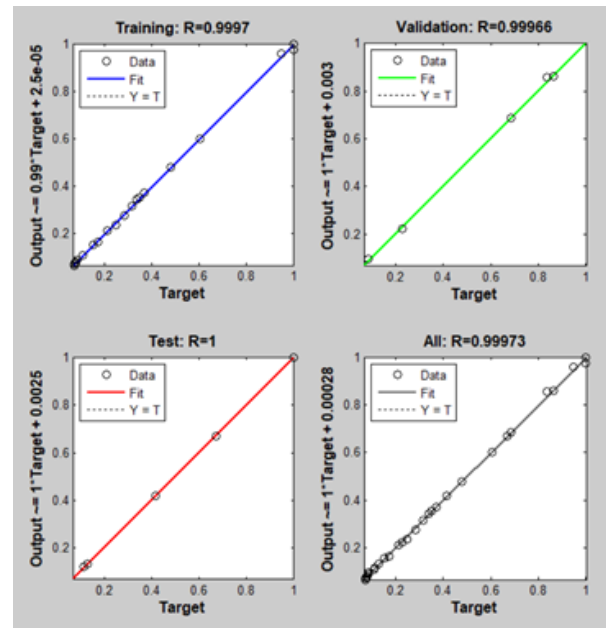


Figure 2. Regression graph of the selected model.

In ANNs, prediction processes were performed using the Feedforward Backpropagation Neural Network model. The results obtained with 3 different transfer function models and different numbers of neurons are specified in Table 1.

Table 1 ANN Model Results

Neuron	Transfer Function	Output Function										
10	Logsig	Purelin	0,4382	0,1096	0,5520	0,0931	0,0838	0,0914	0,2720	0,1418	0,7307	0,0944
	Tansig	Purelin	0,3941	0,1140	0,5142	0,1036	0,0675	0,0776	0,2462	0,1543	0,7323	0,0690
	Tansig	Logsig	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,7776	0,5368
20	Logsig	Purelin	0,3837	0,1006	0,4927	0,0959	0,0515	0,0932	0,2665	0,1355	0,7287	0,0603
	Tansig	Purelin	0,4004	0,1075	0,5085	0,0894	0,0877	0,0903	0,2692	0,1441	0,7191	0,0936
	Tansig	Logsig	0,5368	0,5368	0,5372	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,5368	0,7340	0,5368
30	Logsig	Purelin	0,4325	0,1149	0,5610	0,0962	0,0217	0,0971	0,2577	0,1511	0,7110	0,0743
	Tansig	Purelin	0,4677	0,0905	0,7174	0,0910	0,0727	0,0653	0,2602	0,1456	0,7150	0,0704
	Tansig	Logsig	0,5446	0,5368	0,5827	0,5368	0,5368	0,5368	0,5369	0,5368	0,6930	0,5368
Exp. data			0,4181	0,1090	0,5348	0,0916	0,0775	0,0874	0,2564	0,1454	0,7237	0,0775

Based on the obtained results, the performance measurement of each model was conducted. Considering the measurements, it was determined that the most successful ANN model had 10 neurons in the hidden layer, a logistic sigmoid as the transfer function, and a linear transfer function for the output layer. The performance measurements for this model are provided in Table 2.

Table 2 Performance Measurement of the Best ANN Model

	Training data	Test data	All
RMSE	0,0074055	0,0065915	0,0099141
R ²	0,9997846	0,998788	0,9996615
MAPE	1,9275744	5,4020781	2,7750143

When creating the ANFIS model, which will be compared with this ANN model, the Sugeno inference method was selected, and the number of inputs was set to be the same as the ANN

model. Figure 3 shows the ANFIS model, which has 4 inputs and a single output.

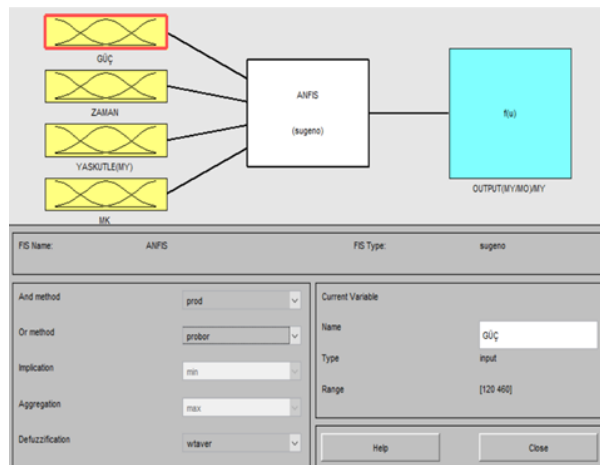


Figure 3. ANFIS Sugeno Architecture

After selecting the inference method, the process continues with the training of the model. For this training to take place, the training and test data must be added to the model first. After the training, the rules generated by the ANFIS model are obtained. These rules can be generated automatically or individually by writing them. Another important aspect for the ANFIS model is the membership functions. The membership functions for the created model are shown in Figure 4.

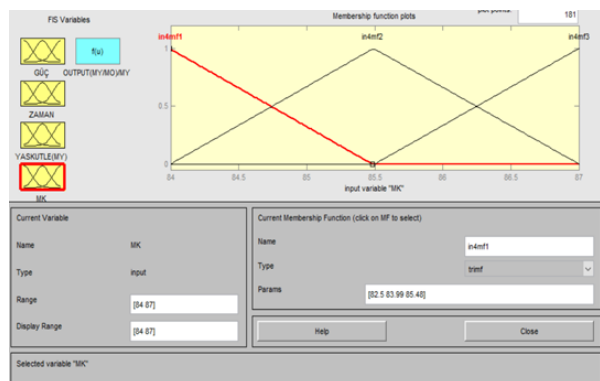


Figure 4. Membership functions of the ANFIS model.

The created model is ready to make predictions. The obtained output values are evaluated with the same performance measurement parameters as the ANN model. Table 3 shows the performance measurement of the ANFIS model.

Table 3 ANFIS Performance Measurement

	Training data	Test data	All
RMSE	0,0061833	0,0068424	0,0092224
R ²	0,9999998	0,9999933	0,9999903
MAPE	0,0746246	0,4662799	0,1701503

The predictions made with the ANFIS and ANN models are compared with the experimental data.

5. Conclusion

The experimental results of hazelnut Shell products previously

dried with a microwave system in a laboratory environment were obtained, and the drying process of hazelnut Shell products with ANN and ANFIS was modeled. By providing a portion of the experimental data to the models as training data, the models were trained, and the aim was to predict the remaining part of the experimental data.

To achieve this goal, 9 ANN models with different transfer functions and neuron numbers were evaluated, and the most successful model was identified. The findings revealed that the Artificial Neural Network models achieved the best results with a 10-neuron Log-sigmoid and Purelin transfer function model.

Predictions for the test data were obtained for the ANFIS model created with the same data. In the examination, it was observed that the ANFIS model produced values closer to the experimental data.

In light of these models and data, predictions for drying without setting up an experimental design have become possible for hazelnut products.

Using similar data, different prediction methods and models can be employed in various fields, saving time and costs.

Author Contributions

Format analysis – Mert Levent (ML), Halil Nusret Buluş (HNB);

Experimental performance – ML, HNB;

Data collecting – Soner Çelen (SÇ), Aytaç Moralar (AM);

Literature review – ML, HNB;

Writing – HNB, ML;

Review and editing – HNB, SÇ, AM.

Declaration of Competing Interest

The authors declared no conflicts of interest with respect to the research to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

[1] Akbarpour, H., Mohajeri, M. & Akbarpour, M., (2016). Pore Diameter of Nanoporous Anodic Alumina: Experimental Study and Application of ANFIS and MLR, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 153, 82-91.

[2] Pusat, S., Akkoyunlu, M.T., Pekel, E., Akkoyunlu, M.C., Özkan, Ç. & Kara S.S., (2016) Estimation of Coal Moisture Content in Convective Drying Process Using ANFIS, *Fuel Processing Technology*, 147, 12-17.

[3] Dolatabadi, M., Mehrabpour, M., Esfandiyari, M., Davoudi, M. and Alidadi H., (2018), Modeling of simultaneous adsorption of dye and metal ion by sawdust from aqueous solution using of ANN and ANFIS, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 181, 72-78.

[4] Quej, V., Almorox, J., Arnaldo, J. & Saito, L., (2017), ANFIS, SVM and ANN Soft-Computing Techniques to Estimate Daily Global Solar Radiation in a Warm Sub-Humid Environment, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial*

Physics, 155, 62-70.

[5] Kaveh, M., Sharabiani, V.R., Chayjan, R.A., Taghinezhad, E., Abbaspour-Gilandeh, Y. & Golpour, I., (2018), ANFIS and ANN Model for Prediction of Moisture Diffusivity and Specific Energy Consumption Potato Garlic and Cantaloupe Drying Under Convective Hot Air Dryer, *Information Processing in Agriculture*, 5(3), 372–387.

[6] Najafi, B. & Ardabili, S.F., (2018), Application of ANFIS, ANN, and Logistic Methods in Estimating Biogas Production from Spent Mushroom Compost (SMC), *Resources, Conservation & Recycling*, 133, 169–178.

[7] Rego, A.S., Valim, I.C., Vieira, A.A., Vilani, C. & Santos, B.F., (2018), Optimization of sugarcane bagasse pretreatment using alkaline hydrogen peroxide through ANN and ANFIS modelling, *Bioresource Technology*, 267, 634–641.

[8] Erkamaz, O., İleri yönlü yapay sinir ağlarında küçük dünya ağ yaklaşımı ve uygulamaları, (2012), PhD, Sakarya University, Sakarya.

[9] Abioduna, A., Jantana, O.I., Omolara, A.E., Dada, K.V.,

Arshad, H. & Mohamed, N.A., (2018), State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey, *Heliyon*, 4(11).

[10] Maladkar, K., (2018), Analyticsindiamag, [online]. Available: <https://analyticsindiamag.com/6-types-of-artificial-neural-networks-currently-being-used-in-todays-technology/>.

[11] Chopra, S., Dhiman, G., Sharma, A., Shabaz, M., Shukla, P. & Arora, M., (2021), Taxonomy of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System in Modern Engineering Sciences, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021.

[12] Ali, O.A.M., Ali, A.Y. & Sumait, B.S., (2015), Comparison between the effects of different types of membership functions on fuzzy logic controller performance, *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, 3(3), 76-83.

[13] Moralar, A. & Çelen, S., (2022), Evaluation of Thermal and Drying Characteristics of Dried Hazelnut (*Corylus avellana* L.) Shell Waste, *PHILIPP AGRIC SCIENTIST*, 105, 161-170.

Research Article

Unconditional Optimization of Cylinder-Plane Corona Electrode System

Gülizar ALİSOY¹ , Necati ÖZBEY² , Lütfi ULUSOY³ , Hafız ALİSOY^{4*} ,

¹ Department of Arts and Science, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye, 59860

² Department of Electronics and Otomation, Malatya OSB Vocational School, İnönü University, Malatya, Türkiye

^{3,4} Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Corlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye, 59860

¹e-mail, galisoy@nku.edu.tr, ²necati.ozbey@inonu.edu.tr, ³lulusoy@nku.edu.tr, ⁴halisoy@nku.edu.tr

Received: 26.10.2023

Accepted: 07.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1381865

Abstract: In this study, based on the Newton-Raphson method, the unconditional optimization of the “thin cylinder-plane” corona electrode system of high-voltage devices with a non-uniform or weakly uniform electric field, widely used in various technological processes of electron-ion technology, is analyzed. For this purpose, the condition of a self-sustaining electric discharge was used for the electrode system under consideration.

Keywords: Corona discharge, Newton Raphson method, Self-sustained condition, Unconditional optimization.

Silindir-Düzlem Korona Elektrot Sisteminin Koşulsuz Optimizasyonu

Özet: Bu çalışmada, çeşitli teknolojik işlemlerde yaygın olarak kullanılan, düzgün olmayan veya zayıf düzgün bir elektrik alanına sahip yüksek gerilim cihazlarının “ince silindir-düzlem” korona elektrot sistemi için, Newton-Raphson yöntemine dayalı olarak koşulsuz optimizasyonu analiz edilmektedir. Bu amaçla, söz konusu elektrot sistemi için, elektrik deşarjın kendi-kendini besleme(self-sustained) koşulu kullanılmıştır

Anahtar kelimeler: Kendi-kendini besleme koşulu, Korona deşarjı, Koşulsuz optimizasyonu, Newton Raphson yöntemi.

1. Introduction

As it is known, in various high-voltage technological processes, in order to implement a barrier discharge, mainly one of four different structures of electrode systems is used, respectively: “needle-plane”, “conductor-plane”, “plane-plane”, and “sphere-plane [1-3]. It should be noted that in both the “needle-plane” and “conductor-plane” electrode systems, the electric field in the interelectrode gap is non-uniform, and for the “needle-plane” electrode system the degree of field non-uniformity is higher. Whereas the electric field in the interelectrode gap in the “sphere-plane” electrode system is

weakly inhomogeneous.

Unlike a homogeneous electric field, where all field lines are identical, in inhomogeneous fields the distributions of field strength along different field lines can differ from each other. In this regard, in inhomogeneous fields, the time of application of voltage is of significant importance. In particular, if the time of application of voltage is unlimitedly long, then at the point of exit from the electrode of the central field line, an electron necessarily appears and the initial voltage will be determined by the condition for the development of an avalanche along this field line, since in this case the condition for self-sustaining discharge is satisfied at the lowest voltage [1-6]. If

* Corresponding author

E-mail adress: halisoy@nku.edu.tr (H. Alisoy)

the voltage is applied for a limited time, then the electron may not appear at the central point, and the initial avalanche will be formed by the electron that appeared closest to the central point. Therefore, with short-term exposure, the initial voltage loses its definition and will change from experience to experience. This circumstance is one of the reasons for the scatter of initial stresses, which are the greatest during short-term stress effects [3,5]. In this work, we will assume that the voltage is applied for an indefinitely long time.

If in a uniform electric field, the initial voltages obey Paschen’s law, according to which $V_0 = f(pd)$ then in inhomogeneous fields a generalization of this law is the law of similarity of discharges [2, 3, 5]. According to this law, in inhomogeneous fields, the static initial stress is a function of the product of the gas pressure or its relative density by one of the geometric dimensions of the gap and the ratio of all other defining geometric dimensions to this size.

Finding potentials and electric fields for a given distribution of electric charges in space is easily solved only in the simplest cases, when the positions of all charges are fixed. Solving problems of electrostatics in this case comes down to the application of Coulomb’s law and several integrations [7-12]. But for real practical electrostatic problems, the actual distribution of charges is not always known. The position that the charges take depends on the electric field strength E , and it, in turn, is determined by the charge distribution itself. The introduction of any conductor or insulator into the field of other charges, the location of which is known, leads to the movement of all charges and, thereby, to a change in the charge distribution density on each body, regardless of whether it is a conductor or a dielectric. For practical problems, special methods for approximate calculation of fields, graphical and semi-graphical methods have been developed. More complex problems can be solved by using a number of techniques and a special mathematical apparatus, which in some cases makes it possible to obtain a solution in analytical form [7-9].

In reality, we mainly have to deal with solving problems, for which the charge distributions are not known, but the shapes of the conductors, their relative location in space and potentials are given. Finding a solution in analytical form for such systems is usually a complex mathematical problem

In this study, based on solving the Laplace equation for the “cylinder-plane” electrode system, taking into account the image charges and using the condition of self-sufficiency of the electric discharge, a nonlinear equation for the potential on the electrode surface with the smallest radius of curvature is obtained. Next, to optimize this nonlinear equation, the Newton Raphson numerical method is used, as a result of which an expression is obtained for determining the initial discharge voltage of the corona discharge ignition. This approach to determining the initial ignition discharge voltage for the “cylinder-plane” electrode system can be considered as a scientific novelty of the presented work.

1.1. Statement of the Problem

For the “thin cylinder-plane” electrode system, using the Newton-Raphson numerical method, it is required to find with sufficient accuracy the extremum of the function $V_0 = f(r_0)$.

In this case, it is assumed that above the surface of a grounded flat ideally conducting electrode (thin cylinder), parallel to it at a height h , an infinite conductor of circular cross-section with radius r_0 (see Fig. 1) is suspended, the potential of which is equal to V and the relative density of the medium in the interelectrode gap is equal to δ . It is necessary to determine the radius r_0 , of the cylinder at which the initial voltage of the electric discharge V_0 around the conductor would be maximum.

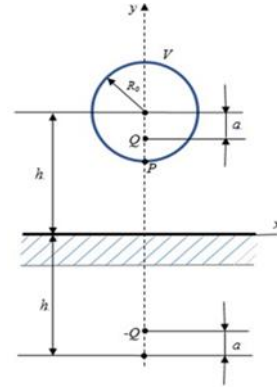


Figure 1. “Thin cylinder-plane” electrode system

1.2. The Approach to Solving the Problem

In this work, within the framework of the stated problem, we have investigated the “cylinder-plane” electrode system, which is widely used in the implementation of various technical problems of electron-ion technology. At the same time, it should be noted that the solution to a similar problem for other electrode systems can be implemented using similar reasoning, but taking into account the determination of the potential and electric field strength for a given geometric configuration of the electrode system. For example, for the “sphere-plane” electrode system, Laplace’s equation is solved in a spherical coordinate system, and for the “plane-plane” electrode system in a Cartesian coordinate system, etc. And then, the implementation of the problem is carried out similarly to the case considered.

Note that the mentioned electrode systems were not part of the purpose of the task and therefore were not analyzed within the framework of this work.

Obviously, a self-sustaining electric discharge near a round conductor begins when the maximum electric field strength E_{max} on its surface is equal to the initial strength E_0 .

Since the value of E_{max} depends on the cylinder potential V in a linear way, then from the equation $E_{max} = E_0$ it is easy to find the dependence of the initial voltage V_0 on the radius of the conductor R_0 . After this, using the Newton Raphson method, it is easy to find the extremum of the function $V_0 = f(r_0)$, which will be the solution to the problem.

The conditions of the problem do not stipulate in any way the relationship between the values of h and r_0 , so we will consider them comparable. In this case, it is necessary to take into account the displacement of the electrical axis of the cylinder relative to its geometric axis. To do this, we use the simplest system of equivalent charges, constructed in accordance with the image method in a cylinder at a distance

$a = r_0^2/2h$ under the geometric axis of the conductor, i.e. At a height $(h - a)$ above a grounded flat ideally conducting electrode we will place an infinite uniformly charged axis with a charge density Q and below it at a depth $(h - a)$ under a grounded flat ideally conducting electrode an axis with a charge density $-Q$.

Thus, the system of equivalent charges that replace the real charges distributed over the surfaces of the conductor and the grounded flat ideally conducting electrode, in this case, consists of the two mentioned uniformly charged axes. In accordance with the principle of superposition, their total charge is zero.

Since a circular wire of radius R_0 has a potential $V > 0$ and a grounded flat ideally conducting electrode has zero potential, the maximum electric field strength on the surface of the cylinder will be achieved at its point P which is closest to the grounded electrode (see Fig. 1)

2. Theory

To achieve the goal, the problem is solved step by step. Initially, for the system under consideration, based on the Laplace equation in a cylindrical coordinate system, the potential on the surface of the electrode with the smallest radius of curvature (cylinder) is analytically determined, taking into account the charge of the image. However, this expression of the potential for a given electrode system does not allow us to determine the initial voltage of the occurrence of a corona discharge due to the fact that it includes optimization parameters characterizing a given electrode system that must be determined. For this reason, further using the relationship between the electric field strength and the potential, as well as the condition of independence of the electric discharge, a nonlinear equation for the potential of a cylindrical electrode is obtained that can be optimized. At the final stage of the algorithm, in order to optimize this nonlinear equation, the Newton-Raphson numerical method was used, for implementation of which a program was compiled in MATLAB.

As it is known, the most general method for calculating electric fields is the direct integration of the Laplace or Poisson equations, under given boundary conditions. [9,11,13].

$$-\nabla^2(\varepsilon V) = 0 \tag{1a}$$

$$E = -\nabla V \tag{1b}$$

where E and V are the electric field and potential respectively, and $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ is permittivity coefficient.

To find the parameters of the electrostatic field of the “thin cylinder-plane” electrode system, it is convenient to use a cylindrical coordinate system. Then Laplace's equation will take the form.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = 0 \tag{1c}$$

Consequently, for the case under consideration, the fundamental solution of Laplace's equation will have the form:

$$\varphi_p = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0} \log \left(\frac{2h - r_0 - a}{R_0 - a} \right) \tag{2}$$

Based on this expression, if we accept that $\varphi_P = V$, i.e. the given potential of the cylinder V , then it is easy to determine the values of the unknown charge Q , therefore:

$$Q = \frac{2\pi\varepsilon_0 V}{\log \left(\frac{2h - r_0 - a}{r_0 - a} \right)} \tag{3}$$

The maximum value of the electric field strength E_{max} on the surface of the cylinder is obviously achieved at point P . It is equal to:

$$E_{max} = \frac{Q}{\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{(h - a)}{(r_0 - a)(2h - r_0 - a)} \tag{4}$$

Substituting the previously obtained expression for Q into this formula, we obtain the functional dependence $E_{max}(R_0)$,

$$E_{max}(r_0) = \frac{V}{\log \left(\frac{2h - r_0 - a}{r_0 - a} \right)} \cdot \frac{(h - a)}{(r_0 - a)(2h - r_0 - a)} \tag{5}$$

The condition for the independence of the electric discharge will be satisfied under the condition $E_{max} = E_0$, where E_0 is the initial field strength, which for the case of a smooth round cylindrical conductor with radius r_0 can be determined by the empirical formula [1,3].

$$E_0(r_0) = 24.5 \cdot 10^3 \delta \left(1 + \frac{0.65}{(r_0 \delta)^{0.38}} \right) \text{ V/cm} \tag{6}$$

where δ - is the relative density of air.

Assuming the equality $E_{max}(r_0) = E_0(r_0)$ we obtain the following equation for the unknown value of the initial voltage $V_0(r_0)$:

$$V_0(r_0) = 24.5 \cdot 10^3 \delta \left(1 + \frac{0.65}{(100r_0 \delta)^{0.38}} \right) \cdot \log \left(\frac{2h - r_0 - a}{r_0 - a} \right) \cdot \frac{(r_0 - a)(2h - r_0 - a)}{(h - a)} \tag{7}$$

Finding the extremum of the function $V_0 = V_0(r_0)$, described by expression (7), by the Newton-Raphson method is organized in the form of a sequence of approximations $r_0^{(k)}$, $k = 0, 1, 2, \dots$ calculated by the formula [14]:

$$r_0^{(k)} = r_0^{(k-1)} - \frac{V_0'(r_0^{(k-1)})}{V_0''(r_0^{(k-1)})} \tag{8}$$

where $V_0(r_0^{(k)})$ values of the right hand side of expression (7) at points $r_0^{(k)}$, $V_0'(r_0^{(k-1)})$ values of the first derivative of the function $f(r_0)$ at points $r_0^{(k-1)}$, $V_0''(r_0^{(k-1)})$ - the values of its second derivative at points $r_0^{(k-1)}$. Often, both the first and the second derivatives of a function look unwieldy. In this case,

the derivatives can be replaced by the corresponding finite differences. For the first derivative, we choose the central difference, and for the second one we choose the symmetrical second difference. Due to the complexity of the function $V_0(r_0)$ on the right hand side of expression (7), it is advisable to calculate its first and second derivatives approximately, using the central finite difference of the second order of accuracy.

$$V_0'(r_0) = \frac{V_0(r_0 + \Delta r_0) - V_0(r_0 - \Delta r_0)}{2\Delta r_0} \tag{9a}$$

$$V_0''(r_0) = \frac{V_0'(r_0 + \Delta r_0) - V_0'(r_0 - \Delta r_0)}{2\Delta r_0} \tag{9b}$$

where Δr_0 is the final increment of the value of r_0 , which was taken equal to $\Delta r_0/r_0 = 10^{-6}$.

3. Analysis of the Results

Based on formulas (5) and (7) for the considered cylinder-plane electrode system, Fig. 2 and Fig. 3 show the results of calculating the electric field strength $E_{max}(r_0)$ and the initial voltage $V_0(r_0)$ at $h = 0.1 \text{ m}$, $\delta = 1$, $V = 1 \text{ kV}$, respectively.

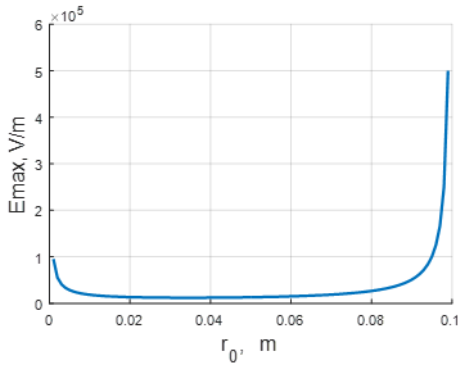


Figure 2. Dependence of the maximum electric field strength on the electrode radius r_0 for the “thin cylinder-plane” electrode system ($h = 0.1 \text{ m}$, $\delta = 1$, $V = 1 \text{ kV}$).

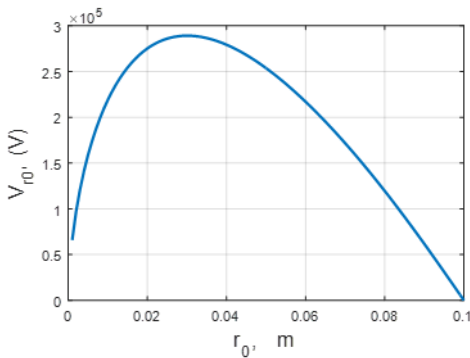


Figure 3. Dependence of the initial ignition voltage on the electrode radius r_0 for the “thin cylinder-plane” electrode system ($h = 0.1 \text{ m}$, $\delta = 1$)

Analyzing the nature of the change in Fig. 3, we see that the maximum value of the curve $V_0(r_0)$ is in the range of values $0.02 \leq r_0 \leq 0.04 \text{ m}$. Therefore, as the initial value of r_0 we will take the obviously larger value $r_0 = 0.05 \text{ m}$. The sequence of values, calculated using iterative formula (8) $r_0(k)$, $k = 1, 2, \dots, 10$. In this case, the relative calculation

error $\delta r_0^{(k)}$ is calculated using the formula [14],

$$\delta r_0^{(k)} = \left| \frac{r_0^{(k)} - r_0^{(k-1)}}{r_0^{(k)}} \right| \tag{10}$$

By using the Newton-Raphson method in Matlab, for different gap values of the “cylinder-plane” electrode system, the calculated optimization values $V_0(k)$ and $r_0(k)$ are presented in Fig. 4 and fig. 5, respectively. In this case, the calculation continues until $\delta r_0^{(k)} \leq \varepsilon = 10^{-6}$. Taking these circumstances into account, it is easy to show that the convergence of the Newton-Raphson method for optimizing the values of V_{0max} and r_{0max} according to Eqs. (7), (8), (9a), and (9b) for various values of h at a relative air density δ is completed in six or seven steps. These results are shown in Figures 6 and 7 respectively.

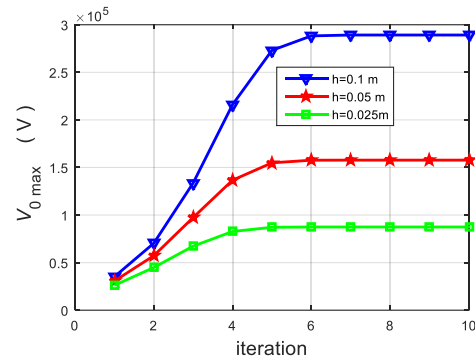


Figure 4. Convergence of the Newton-Raphson method for optimization values of V_{0max} by using formula (7) for the three different values of h and the relative air density $\delta = 1$.

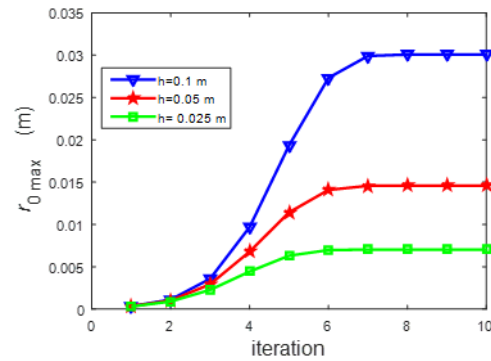


Figure 5. Convergence of the Newton-Raphson method for the optimization of r_{0max} by using formula (7) for the three different values of h and the relative air density $\delta = 1$.

In conclusion, it should be noted that such an expression method for determining the initial ignition voltage of a corona discharge is of practical importance for solving a number of technical problems in electron-ion technology, for example, in the development of a discharge cell for modifying the surface properties of materials, in nanotechnology, in the creation of electrets, etc. For this reason, this work is expected to stimulate the development of various in-demand electrode systems that are used in a wide variety of engineering fields.

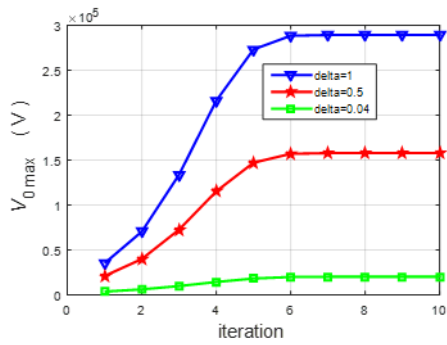


Figure 6. Convergence of the Newton-Raphson method for the optimization of V_{0max} for the three different values of the relative air density δ at $h = 0.1$ m.

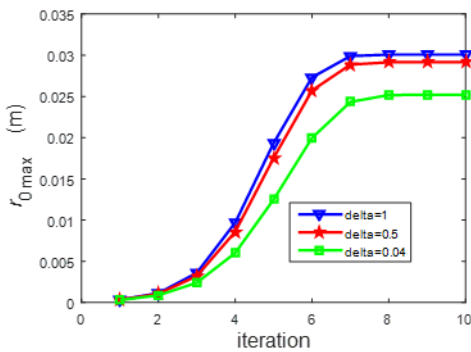


Figure 7. Convergence of the Newton-Raphson method for the optimization of r_{0max} for the three different values of the relative air density δ at $h = 0.1$ m.

4. Conclusion

Based on the condition of self-sufficiency of the electric discharge, an expression has been found to determine the initial ignition voltage for the “cylinder-plane” electrode system.

By using the Newton-Raphson method in symbolic programming language Matlab for the “cylinder-plane” electrode system, the convergence of the method was analyzed for varying degrees of electric field inhomogeneity in the interelectrode gap.

Author Contribution

Conceive-G.A., H.A.; Design-H.A, N.Ö, L.U; Supervision-HA; Experimental Performance, Data Collection and/or Processing-N.Ö.,L.U.,G.A; Analysis and/or Interpretation-G.A., H.A; Literature Review-L.U.,G.A.,H.A; Writer-L.U. N.Ö.; Critical Reviews –G.A., H.A.

Declaration of Conflict of Interest

The authors have declared no conflicts of interest.

References

[1] Stepanchuk K.F., Tinyakov N.A. (1982). High voltage technology. Higher. school, p. 365. (in Russian).

[2] Bortnik, I.M., Vereshchagin, I.P., Yu, N., Vershinin, N. (1993). Electrophysical Fundamentals of High Voltage Technique Energoatomizdat, Moscow (in Russian)

[3] Razevig, D.V., Sokolova, M.V. (1977). Analysis of Onset and Breakdown Voltages of Gas Gaps Energiya, Moscow (in Russian)

[4] Grosu, F. P., Bologa, A. M., Bologa, M. K., & Motorin, O. V. (2015). On the dependence of corona discharge characteristics on pressure. Electronic Materials Processing, 51(5), 45-50.

[5] Alisoy, H. Z., Yeroglu, C., Koseoglu, M. & Hansu, F. (2005). Investigation of the characteristics of dielectric barrier discharge in transition region. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38 (24), 4272-4277.

[6] Alisoy, H. Z., S., Alagoz, G. T., Alisoy, Alagoz, B. B. (2013). An Investigation of Ionic Flows in a Sphere-Plate Electrode Gap. *Plasma Science and Technology*, 15(10), 1012.

[7] Smythe, W. B. (1988). *Static and dynamic electricity*.

[8] Mirolyubov, N.N., Kostenko, M.V., Levinshtein, M.L. Tikhodeev, N.N. (1963). Methods for calculating electrostatic fields.

[9] Ionkin, P. A. (Ed.). (1982). Collection of tasks and exercises on the theoretical foundations of electrical engineering: Textbook. manual for universities. Energoizdat.

[10] Usachev, A.E. (2013). Methods for calculating electric fields: textbook. allowance / A.E. Usachev. – Kazan: Kazan State Energy University. – 111 p. (in Russian)

[11] Zegrya, G.G., Veksler, M.I., Smirnova, I.G., Ustinova, I.A. (2019), Calculation of stationary electric and magnetic fields - St. Petersburg: ITMO University, - 98 p. (in Russian)

[12] Alisoy, H., Akdeniz, R., Özbey, N. (2021). The Visualization of Solutions to Electromagnetic Field Problems by Using Matlab. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*,4(2), 61-65.

[13] Foruzan, E. A., Akmal, A. S., Niayesh, K., Lin, J., Deepak Sharma, D. & Sangrody, H. (2017). Simulation and modeling of dielectric barrier impact on heterogeneous electric field, *IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, Lincoln, NE, USA, 071-076, doi: 10.1109/EIT.2017.8053333.

[14] Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2016). Numerical Methods for Engineers 7th ed. McGraw Hill, Brasil.

Research Article

A Decision Support System Based on Hybrid Approach With Copras And Interval Type-2 Fuzzy Topsis For Evaluation Of Renewable Energy Alternatives

Aysun SAĞBAŞ¹, Muhammet DEVECİ², Ulviye POLAT^{3,*}

^{1,3}Department of Industrial Engineering, Çorlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye

²Department of Industrial Engineering, Naval Academy, National Defence University, Istanbul, Türkiye

¹asagbas@nku.edu.tr, ²mdeveci@dho.edu.tr, ³upolat@nku.edu.tr

Geliş: 19.11.2023

Kabul: 21.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1392881

Abstract: Renewable energy (RE) is a vital source for the sustainable development of society and economy. It plays a significant role in meeting energy requirements of both developed and developing countries. Moreover, renewable energy creates multiple benefits such as environmental improvement, increases fuel diversity, reduction of energy price, volatility effect on their economy, national economic security, and increases in economic productivity. Selection of the most appropriate RE alternatives for any country can provide guidelines to planners of regional, national and global energy systems. The issue of ranking renewable energy sources involves many conflicting criteria and is a complicated problem since it needs to simultaneously incorporate technical, economic, cost, social-political, and environmental criteria. In this study, an integrated multi criteria decision making (MCDM) approach consisting of interval type-2 fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) and Compressed Proportional Assessment (COPRAS) method is conducted to prioritize RE alternatives in order to direct planning of the national RE investments. A real case application for Turkey has been presented via expert evaluations to demonstrate applicability of the proposed methodology.

Keywords: COPRAS, Interval type-2 fuzzy sets, Multi criteria decision making, Renewable energy, TOPSIS.

Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Değerlendirilmesinde Copras ve Interval Type-2 Fuzzy Topsis ile Hibrit Yaklaşım Dayalı Bir Karar Destek Sistemi

Öz: Yenilenebilir enerji (YE), toplumun ve ekonominin sürdürülebilir gelişimi için hayati bir kaynaktır. Hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji, çevrenin iyileştirilmesi, yakıt çeşitliliğinin artması, enerji fiyatlarının düşmesi, ekonomilerde değişiklik etkisi, ulusal ekonomik güvenlik ve ekonomik verimliliğin artması gibi birçok fayda yaratmaktadır. Herhangi bir ülke için en uygun yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimi, bölgesel, ulusal ve küresel enerji sistemleri planlamacılarına yol gösterici olabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sıralanması konusu, birbiriyle çelişen birçok kriteri içermekte olup; teknik, ekonomik, maliyet, sosyo-politik ve çevresel kriterlerin eş zamanlı olarak bir araya getirilmesi bakımından karmaşık bir sorundur. Bu çalışmada, ulusal yenilenebilir enerji yatırımlarının doğrudan planlanmasında YE alternatiflerini önceliklendirmek amacıyla Aralıklı Tip-2 Bulanık TOPSIS Tekniği ve COPRAS yönteminden oluşan entegre çok kriterli karar verme (MCDM) yaklaşımı kullanılmıştır. Önerilen metodolojinin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla uzman değerlendirmeleri yoluyla Türkiye için gerçek bir vaka uygulaması sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Aralıklı tip-2 bulanık kümeler, COPRAS, Çok kriterli karar verme, TOPSIS, Yenilenebilir enerji.

1. Introduction

Renewable energy (RE) sources such as hydroelectricity,

biomass, solar energy, wind energy and geothermal energy play an important role in meeting the energy requirements around the World [1, 2]. RE is the inevitable choice for

*Corresponding Author

E-mail Address: upolat@nku.edu.tr (U. Polat):

sustainable economic growth, for the harmonious coexistence of human and environment as well as for the sustainable development. In order to determine a set of RE sources to meet the energy requirements in an optimal way, ranking the alternatives and selection of the optimum one for any country is crucially important for the investment decisions involving social, economic, environmental and political factors [2, 3].

The decision making process consists of options derived from hierarchical comparisons among alternatives based mostly on conflicting criteria. MCDM is used for the solution of decision making problems for this reason. MCDM is within the scope of operational research models that help sort alternatives or choose the best among multiple criteria [4]. Decisions are made on the basis of compromise or compromise among a large number of conflicting criteria. There are many MCDM approaches and these approaches can be used by combining with fuzzy set theory under uncertainty.

In the literature, there are several studies that addressed the selection of the best RE project [2, 5] using MCDM methods. On the other hand, some studies considered the geographic region to a higher level, yielding cost/benefit studies of RE sources for different countries such as Pakistan [6], Malaysia [7], Indonesia [8], North Korea [9], Iran [10], and Germany [11]. Turkey has been one of the geographic locations for which such RE source cost/benefit studies have been undertaken [e.g., 3, 12, 14, 15, 16, 17]. A summary of these studies carried out for selection of the best RE source in Turkey is presented in Table 1.

As it can be followed in the Table 1, most the relevant studies that took Turkey as the case, implemented various MCDM methods in the identification of best sub-set of RE sources. Interestingly, results of these prior studies had differing results; while hydroelectric power led the ranks in some cases, wind energy was found to be the top-ranked alternative in many others.

In this study, a methodology consisting of combined interval type-2 fuzzy (IT2FS) TOPSIS and COPRAS approach is proposed to obtain ranking of RE alternatives in order to the planning of national RE investments in future [18]. TOPSIS method is applied to determine the positive ideal solution and negative ideal solution. The COPRAS method presented, uses an evaluating of the RE sources with respect to significance and utility degree [11, 19].

The reminder of this study is structured as follows: Turkey's current RE context and future projections, the criteria for evaluating RE sources, brief background information about TOPSIS and COPRAS methods and the proposed methodology are described in Section 2. The illustrative case for the context of Turkey is discussed to show the benefits of the proposed method, followed by the results in Section 3. Concluding remarks and future research directions are provided in Section 4.

2. Material and Methods

2.1. Background of Turkey Based on RE Resources

Depending on the economic growth and population growth in

Turkey, the energy demand is constantly increasing [20]. Turkey's primary energy supply increased from 53 million tons of oil equivalent (Mtoe) in 1990 to 144 Mtoe in 2018 (see Figure 1).

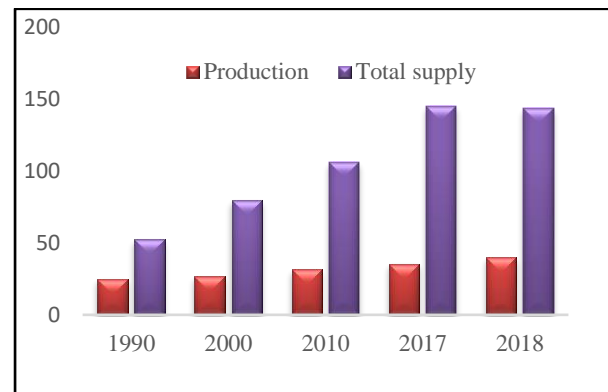


Figure 1. Total Primary Energy Production (Mtoe) And Supply (Mtoe) In Turkey Between Years 1990 And 2018 [27]

As it can be seen from Figure 2, around 27.6% of the total energy supply has been met by the domestic energy production in 2018 while the domestic energy production has met 47.8% of the primary energy supply in 1990 [27]; Turkey has an increasing dependency on energy imports.

The COPRAS method presented uses an evaluating of the RE sources with respect to significance and utility degree.

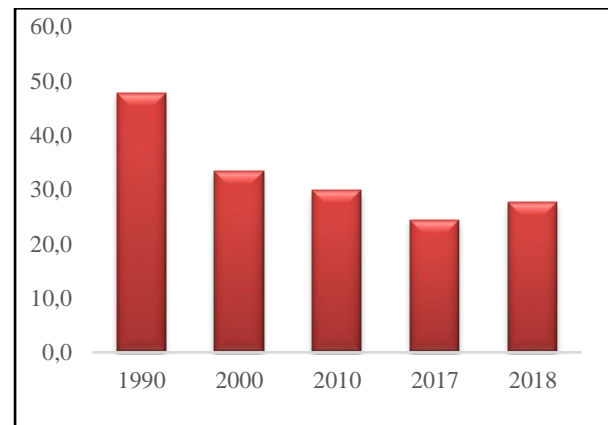


Figure 2. The Coverage Ratio (%) Of Energy Production To Total Primary Energy Supply In Turkey Between Years 1990 And 2018 [27]

The share of energy sources in Turkey's primary energy production in 2018 is shown in Figure 3. As it can be observed from this figure, coal production constitutes 39.8% of the total energy production with 17.7 Mtoe energy production. The coal is followed by a renewable source geothermal (8.3 Mtoe production and 21% share) and geothermal is followed by hydraulic (5.1 Mtoe production and 13% share). Other renewable energy sources like bioenergy and wastes, wind and solar have a total production of 6.2 Mtoe and 15.8% share. The rest of the production comes from oil, asphalt and natural gas with a total production of 3.8 Mtoe and 10.4% share [27].

Table 1. A Literature Summary For Selecting The Best RE Source For Turkey

Author(s)	Year	Based on Fuzzy	Types	Methodology	Ranking of energy sources
Topcu and Ulengin [16]	2004	-	-	PROMETHEE	Wind > Hydro > PV > Biomass > Nuclear > Natural gas > Fossil fuels
Ulutaş [17]	2005	-	-	ANP and BCOR analysis	Biomass > Geothermal > Coal > Wind > Hydropower > Solar > Petroleum > Nuclear > Natural gas
Kahraman et al. [13]	2009	Yes	Type 1	AD	Wind > Solar > Biomass > Geothermal > Hydropower
		Yes	Type 1	AHP	
Kahraman and Kaya [3]	2010	Yes	Type 1	Fuzzy AHP	Wind > Solar > Biomass > Geothermal > Hydro > Natural gas > Coal and lignite > Nuclear > Oil
Kaya and Kahraman [21]	2011	Yes	Type-1	AHP and modified TOPSIS	Wind > Biomass > Solar > Combined heat and power > Hydraulic > Nuclear > Conventional
Atmaca and Basar [22]	2012	-	-	ANP	Nuclear > Natural gas > Geothermal > Wind > Hydro > Coal/Lignite
Ertay et al. [23]	2013	Yes	Type 1	MACBETH and AHP	Wind > Solar > Biomass > Geothermal > Hydropower
Kabak and Dağdeviren [12]	2014	-	-	ANP and BCOR analysis	Hydro > Solar > Wind > Geothermal > Biomass
Pak et al. [14]	2015	-	-	ANP and TOPSIS	Hydraulic > Wind > Biomass > Geothermal > Solar
Şengül et al. [15]	2015	Yes	Type 1	TOPSIS and AHP	Hydro > Geothermal > Regulator > Wind
Büyüközkan and Güleriyüz [24]	2016	-	-	DEMATEL and ANP	Wind > Solar > Biomass > Hydraulic > Geothermal
		-	-	ANP	Wind > Solar > Geothermal > Biomass > Hydraulic
Çelikkilek and Tüysüz [25]	2016	Yes	Type-1	GREY, ANP, DEMATEL and VIKOR	Solar > Wind > Hydro > Biomass > Geothermal
Balin and Baraçlı [26]	2017	Yes	Type-2/ Type-1	TOPSIS and AHP	Solar > Biomass > Geothermal > Hydraulic > Hydro
Colak and Kaya [18]	2017	Yes	Type-2/ Type-1	AHP and TOPSIS	Wind > Solar > Hydraulic > Biomass > Geothermal > Wave > Hydro

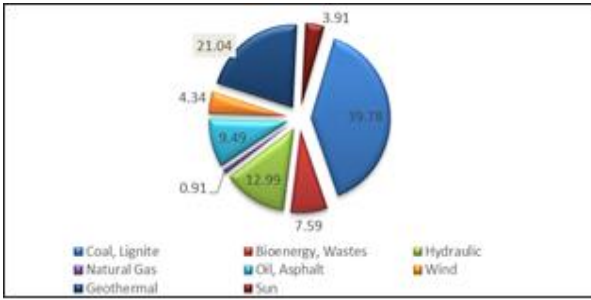


Figure 3. The Percent Share Of Energy Sources In Turkey's Primary Energy Production In 2018 [27]

The share of energy sources in Turkey's primary energy production in 2010 and 2018 is shown in Figure 4. This figure shows that the percent share of renewable energy sources in the energy production of Turkey has been increasing significantly.

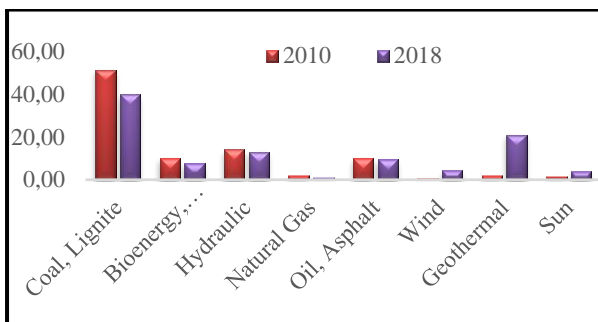


Figure 4. The Percent Share Of Energy Sources In Turkey's Primary Energy Production In Years Of 2010 And 2018 [27]

According to the pertinent energy demand estimation studies [e.g., 28, 29], the energy requirement of Turkey will continue to grow in the future. Currently, Turkey imports a large quantity of energy, and hence it is expected that it will invest in the energy sector to reduce its dependency on foreign energy sources [30]. Turkey is ranked to be second for geothermal and solar energy potential in the European Union while ranking to be the third for hydro and wind energy potential. Its available biomass sources are also considerable [12, 20]. Table 2 shows the installed renewable energy source capacities between years 2012 and 2017 for electricity production in Turkey.

Given the significant level of energy imports and the potential for various renewable energy sources, a prioritization of renewable energy investment alternatives such as hydropower, biomass, geothermal energy, wind energy and solar energy is important for policy makers and investors. Today, Turkey aims to increase its renewable energy sources. In its strategic goals for 2023, renewable energy is mentioned to be increased to a share of 40% of the total energy production [27].

Table 2. Total Renewable Energy Installed Capacity (MW)

Between Years 2012 To 2017 For Electricity Production In Turkey (Turkey General Directorate of Renewable Energy)

Energy Source	Installed Capacity (MW)					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Sun			40.2	248.8	832.5	3420
Bioenergy	158.5	224	288.1	362.4	488.7	634.2
Geothermal	162.2	310.8	404.9	623.9	820.9	1063.7
Wind	2260.5	2759.6	3629.7	4503.2	5751.3	6516.2
Hydraulic	19609.4	22289	23643.2	25867.8	26681.1	27273.1

2.2. Research Framework

In this study, firstly, 85 criteria based on our literature review are examined. After eliminating some of those criteria by the experts, the most crucial top 18 criteria are fixed (see Table 3).

The proposed methodology includes a combination of TOPSIS and COPRAS methods based on type-2 range sets. Figure 5 shows the steps of the proposed method. TOPSIS and COPRAS are multi-criteria decision-making approaches used in different fields [31, 32, 33, 34]. TOPSIS method is selected due to its advantages like simplicity and ability to evaluate the relative performance for each alternative in a simple mathematical form. The obtained criteria weights of FPIS and FNIS are used as an input to COPRAS method as well as alternative evaluations with respect to each criterion which are determined from literature. By combining these two MCDM methods based on interval type-2 fuzzy sets, it is intended to reveal the factors and their relations related to RE investments and provide guidelines for policy makers and investors in determining investments priorities.

The steps of TOPSIS method can be described as follows [32, 35, 36]:

Step 1. Construct the decision matrix (D). The structure of matrix can be expressed as given in Eq. (1).

$$D = \begin{matrix} & X_1 & X_1 & \dots & X_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} = [x_{ij}]_{m \times n} \tag{1}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

where A_i denotes i . alternative, ($i = 1, 2, \dots, m$); X_j represents j th attribute or criterion, ($j = 1, 2, \dots, n$). Also, X_{ij} is the performance rating of i th alternative A_i with respect to attribute X_j .

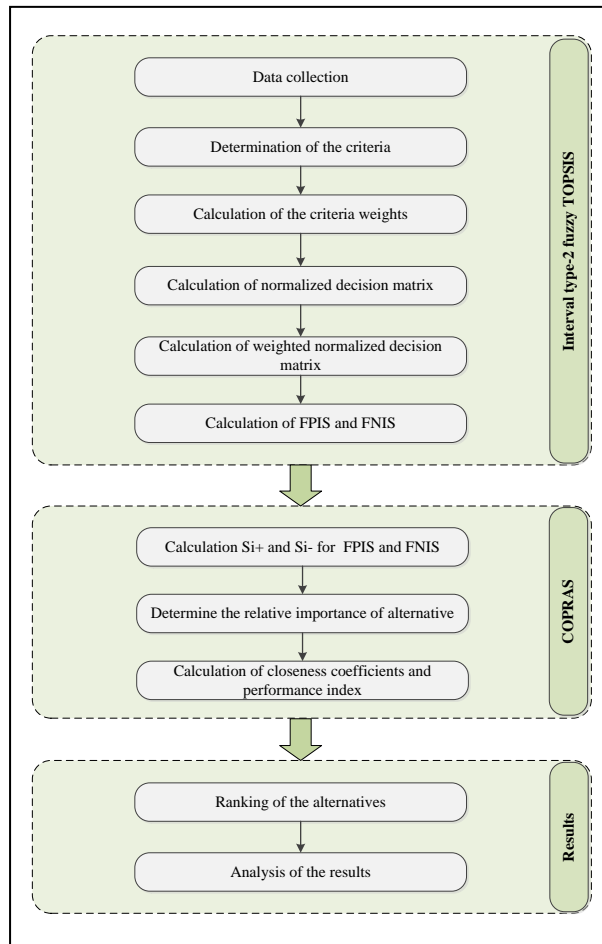


Figure 5. The Steps Of The Proposed Methodology

Step 2. Construct the normalized decision matrix (R) using Eq. (2). The normalized values (r_{ij}) of the decision matrix are calculated using Eq. (3).

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = [r_{ij}]_{m \times n} \tag{2}$$

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \tag{3}$$

$$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

Step 3. Calculate the weighted normalized decision matrix (V) using Eq. (4). w_j represents the weight of j^{th} attribute. The weighted normalized value v_{ij} is calculated by multiplying the normalized decision matrix by its corresponding value as given Eq. (5).

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = [v_{ij}]_{m \times n} \tag{4}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

Table 3 The Criteria For RE Alternatives

Main Criteria	Sub-criteria	References
Technical factors	C ₁ Efficiency	Afgan and Carvalho (2002) [37], Theodorou et al. (2010) [38], Ahmad and Tahar (2014) [7], Amer and Daim (2011) [6], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Gitinavard et al. (2017) [10], Lee and Chang (2018) [41], Ghose et al. (2019) [42], Hassan et al. (2019) [43], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Ayağ and Samanlioglu (2020) [45], Colak and Kaya (2020) [46], Ghenai et al. (2020) [47], Rani et al. (2020) [48]
	C ₂ Maturity	Theodorou et al. (2010) [38], Amer and Daim (2011) [6], Ahmad and Tahar (2014) [7], Troldborg et al. (2014), Shmelev and Jeroen (2016) [40], Al Garni et al. (2016) [39], Colak and Kaya (2017) [18], Martín-Gamboa et al. (2017) [49], Lee and Chang (2018) [41], Hassan et al. (2019) [43], Li et al. (2019) [50], Naicker and Thopil (2019) [51], Zhang et al. (2019) [52], Colak and Kaya (2020) [46]
	C ₃ Setup (Installation) time	San Cristóbal (2009) [5], Kahraman et al. (2009) [13], Kahraman and Kaya (2010) [3], Ahmad and Tahar (2014) [7], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Colak and Kaya (2017) [18]
	C ₄ Energy production capacity	Colak and Kaya (2017) [18], Lee and Chang (2018) [41], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Ghenai et al. (2020) [47], Nsafon et al. (2020) [53]
	C ₅ Risk	Kahraman et al. (2009) [13], Kahraman and Kaya (2010) [3], Tasri and Susilawati (2014) [8], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Colak and Kaya (2017) [18], Colak and Kaya (2020) [46], Deveci and Güler (2020) [54]
	C ₆ Ease of access to source	
Economic factors	C ₇ Operational life (Service life)	San Cristóbal (2011) [5], Ahmad and Tahar (2014) [7], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Colak and Kaya (2017) [18], Martín-Gamboa et al. (2017) [49], Hassan et al. (2019) [43], Zhang et al. (2019) [52], Colak and Kaya (2020) [46]
	C ₈ Contribution to economy	Kahraman et al. (2009) [13], Kahraman and Kaya (2010) [3], Tasri and Susilawati (2014) [8], Troldborg et al. (2014) [55], Colak and Kaya (2017) [18], Pasaoglu et al. (2018) [56], Li et al. (2019) [50], Deveci and Güler (2020) [54]
Cost factors	C ₉ Investment cost	Amer and Daim (2009) [6], Kahraman and Kaya (2010) [3], Theodorou et al. (2010) [38], Kabak and Dagdeviren (2014) [12], Tasri and Susilawati (2014) [8], Troldborg et al. (2014) [55], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Gitinavard et al. (2017) [10], Martín-Gamboa et al. (2017) [49], Lee and Chang (2018) [41], Pasaoglu et al. (2018) [56], Yang et al. (2018) [57], Ghose et al. (2019) [42], Hassan et al. (2019) [43], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Zhang et al. (2019) [52], Alizadeh et al. (2020) [58], Colak and Kaya (2020) [46], Nsafon et al. (2020) [53], Rani et al. (2020) [48]
	C ₁₀ Operation and Maintenance costs	Amer and Daim (2009) [6], San Cristóbal (2011) [5], Kabak and Dagdeviren (2014) [12], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Gitinavard et al. (2017) [10], Martín-Gamboa et al. (2017) [49], Lee and Chang (2018) [41], Pasaoglu et al. (2018) [56], Diemuodeke et al. (2019) [59], Hassan et al. (2019) [43], Li et al. (2019) [50], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Alizadeh et al. (2020) [58], Colak and Kaya (2020) [46], Deveci and Güler (2020) [54], Rani et al. (2020) [48]

Table 3 The Criteria For RE Alternatives (continue)

Socio-political factors	C ₁₁ Social acceptability	Amer and Daim (2009) [6], Theodorou et al. (2010) [38], Ahmad and Tahar (2014) [7], Tasri and Susilawati (2014) [8],
-------------------------	--------------------------------------	--

		Troldborg et al. (2014) [55], Sengül et al. (2015) [15], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Al Garni et al. (2016) [39], Colak and Kaya (2017) [18], Lee and Chang (2018) [41], Ghose et al. (2019) [42], Hassan et al. (2019) [43], Li et al. (2019) [50], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Colak and Kaya (2020) [46], Deveci and Güler (2020) [54], Rani et al. (2020) [48]
	C ₁₂ Job creation potential	Amer and Daim (2009) [6], Kahraman et al. (2009) [13], Ahmad and Tahar (2014) [7], Kabak and Dagdeviren (2014) [12], Tasri and Susilawati (2014) [8], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Lee and Chang (2018) [41], Ghose et al. (2019) [42], Hassan et al. (2019) [43], Li et al. (2019) [50], Naicker and Thopil (2019) [51], Zhang et al. (2019) [52], Alizadeh et.al. (2020) [58], Colak and Kaya (2020) [46], Nsafon et al. (2020) [53], Rani et al. (2020) [48]
	C ₁₃ Political acceptance	Kahraman and Kaya (2010) [3], Tasri and Susilawati (2014) [8], Al Garni et al. (2016) [39], Colak and Kaya (2017) [18], Ayağ and Samanlıoğlu (2020) [45], Colak and Kaya (2020) [46], Deveci and Güler (2020) [54]
Environmental factors	C ₁₄ Impact on environment	Ahmad and Tahar (2014) [7], Kabak and Dagdeviren (2014) [12], Sengül et al. (2015) [15], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Colak and Kaya (2017) [18], Gitinavard et al. (2017) [10], Pasaoglu et al. (2018) [56], Seddiki and Bennadji (2019) [44], Diemuodeke et al. (2019) [59], Zhang et al. (2019) [52], Alizadeh et.al. (2020) [58]
	C ₁₅ Sustainable	San Cristóbal (2011) [5], Tasri and Susilawati (2014) [8], Colak and Kaya (2017) [18], McKenna et al. (2018) [11], Li et al. (2019) [50], Ayağ and Samanlıoğlu (2020) [45]
	C ₁₆ Land requirement	Amer and Daim (2009) [6], Kahraman and Kaya (2010) [3], Ahmad and Tahar (2014) [7], Tasri and Susilawati (2014) [8], Troldborg et al. (2014) [55], Al Garni et al. (2016) [39], Colak and Kaya (2017) [18], Lee and Chang (2018) [41], Ghose et al. (2019) [42], Hassan et al. (2019) [43], Zhang et al. (2019) [52], Alizadeh et.al. (2020) [58], Deveci and Güler (2020) [54], Rani et al. (2020) [48]
	C ₁₇ Requirement for waste disposal	Kahraman et al. (2009) [13], Kahraman and Kaya (2010) [3], Tasri and Susilawati (2014) [8], Al Garni et al. (2016) [39], Shmelev and Jeroen (2016) [40], Colak and Kaya (2017) [18], Martín-Gamboa et al. (2017) [49], Deveci and Güler (2020) [54]
	C ₁₈ Proximity to user	Tasri and Susilawati (2014) [8], Colak and Kaya (2017) [18], Yang et al. (2018) [57], Seddiki and Bennadji (2019) [44]

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

Step 4. Determine PIS (A^*) and NIS (A^-) using Eqs. (6) and (7), respectively.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} = \left\{ \left(\max_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\min_i v_{ij} | j \in J' \right) \right\} \quad (6)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} = \left\{ \left(\min_i v_{ij} | j \in J \right), \left(\max_i v_{ij} | j \in J' \right) \right\} \quad (7)$$

where J corresponds to the benefit criteria and J' corresponds to the cost criteria.

Step 5. Calculate the distance of each alternative from PIS and NIS using Eqs. (8) and (9), respectively.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

The COPRAS method [60,61,62] steps are given as in the following [61]:

Step 6. The sums B_{i+} (benefit criteria) and C_{i-} (cost criteria) of weighted normalized values are calculated for FPIS and FNIS. For beneficial criteria, a higher value is better and for non-beneficial criteria, lower value is better to achieve the goal. These sums B_{i+} and C_{i-} are calculated using Eqs. (10) and (11), respectively as follows:

$$B_{i+} = \sum_{j=1}^k v_{ij} \quad (10)$$

$$C_{i-} = \sum_{j=k+1}^m v_{ij} \quad (11)$$

C_b and C_n are the sets of benefit and cost criteria.

Step 7. Calculate the relative importance (α_i) of each alternative using Eq. (12).

$$\alpha_i = B_{i+} + \frac{\sum_{i=1}^m C_{i-}}{C_{i-} - \sum_{i=1}^m C_{i-}} \quad (12)$$

Among the alternatives, one with the highest degree of relative importance is the best choice.

Step 8. Calculate the closeness coefficient (CC_i^*) of each alternative using Eq. (13). CC_i^* takes value between 0 and 1. The larger CC_i^* value stands for the better performance of the alternative.

$$CC_i^* = \frac{\alpha_i^-}{\alpha_i^- + \alpha_i^*} \quad 0 \leq CC_i^* \leq 1 \quad (13)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

Step 9. Or the performance index (β_i) of each alternative is calculated using Eq. (14) as follows:

Step 9. Or the performance index (β_i) of each alternative is calculated using Eq. (14) as follows:

$$\beta_i = \left[\frac{\alpha_i}{\alpha_{max}} \right] \times 100\% \quad (14)$$

where β_{max} is the maximum relative importance value. Rank the alternatives according to decreasing values of β_i .

3. Results and Discussion

In this study, the proposed methodology is used to prioritize and evaluate RE sources for Turkey. Interval type-2 fuzzy TOPSIS is carried out to determine the weights of the evaluation criteria and COPRAS method for performance evaluation of RE sources. The output of the interval type-2 fuzzy TOPSIS is the input to the COPRAS method. COPRAS method is integrated because of its various advantages such as less computational time, very simple and transparent, high possibility of graphical interpretation, etc.) over other MCDM methods such as VIKOR, TOPSIS and AHP [61]. A committee of five decision makers (experts) DM1, DM2, DM3, DM4 and DM5 are formed to select the best renewable energy source using the 18 criteria which are selected from literature. The average subjective fuzzy weights of the 18 criteria are given in Table 4. The average fuzzy weights for each criterion with respect to alternatives are calculated by using Eq. (1). The weighted normalized decision matrix for the RE alternatives is calculated using Eqs. (4) and (5).

In this study, the determination of criteria and their weights and the ranking of the alternatives are carried out based on 5 experts' evaluations. It should be noted that enhancing the study by including other experts from various disciplines and institutions (2 experts from universities and 3 experts from private companies) may cause different results and conclusions. It is difficult to get the opinion of several experts working in different institutions. It is important to carefully select the experts. Because result of the study is directly affected by the knowledge and experience of the experts. In this study five RE alternatives are determined: A1 (Biomass), A2 (Geothermal), A3 (Hydropower), A4 (Solar) and A5 (Wind). In order to determine relationship between the criteria with respect to alternatives, the experts define each relationship by means of verbal expressions as given in [19]. After calculating the normalized decision matrix and weighted normalized decision matrix, PIS and NIS are calculated using Eqs. (6) and (7). The distance of each alternative from FPIS and FNIS of each alternative are detailed in Table 5 using Eqs. (8) and (9).

The relative values of the alternative for FPIS and FNIS are computed using Eq. (12). The closeness coefficients and performance index of each alternative are computed using Eqs. (13) and (14). Results of combined TOPSIS and COPRAS methods is given in Table 6.

Based on the combined TOPSIS and COPRAS methodology, the alternatives are ranked in the descending order from the most preferred to least preferred RE source. According to the β values, the best RE source and primary investment area is determined as hydropower energy. Wind is determined as the second most suitable RE source. The order of the remaining alternatives is solar energy, geothermal energy and biomass. Prospectively, the obtained ranking of RE sources aids policy makers and investors to determine investment priorities. The

results of this study showed that, hydropower energy is determined to be the most RE energy supply system in Turkey. It is declared that, all of the hydropower potential which it will technically and economically be possible to use, shall be used to produce electric power until 2023 [63]. The share of energy sources in according to Turkey’s primary energy production in

2018, hydropower energy is the second energy source with 13% share [27]. The present study also supports the decision taken by ministry. Also the results obtained from this study are similar to some studies applied to different methods in the literature [15].

Table 4 The Average Subjective Fuzzy Weights Of Criteria

Criteria	Weights
C1 : Efficiency	((0.82;0.96;0.96;1;1;1),(0.89;0.96;0.96;0.98;0.9;0.9))
C2 : Maturity	((0.66;0.84;0.84;0.96;1;1),(0.75;0.84;0.84;0.9;0.9;0.9))
C3 : Setup (Installation) time	((0.28;0.46;0.46;0.64;1;1),(0.37;0.46;0.46;0.55;0.9;0.9))
C4 : Energy production capacity	((0.78;0.94;0.94;1;1;1),(0.86;0.94;0.94;0.97;0.9;0.9))
C5 : Risk	((0.54;0.74;0.74;0.9;1;1),(0.64;0.74;0.74;0.82;0.9;0.9))
C6 : Ease of access to source	((0.78;0.92;0.92;0.98;1;1),(0.85;0.92;0.92;0.95;0.9;0.9))
C7 : Operational life (Service life)	((0.58;0.78;0.78;0.94;1;1),(0.68;0.78;0.78;0.86;0.9;0.9))
C8 : Contribution to economy	((0.66;0.84;0.84;0.96;1;1),(0.75;0.84;0.84;0.9;0.9;0.9))
C9 : Investment cost	((0.82;0.96;0.96;1;1;1),(0.89;0.96;0.96;0.98;0.9;0.9))
C10 : Operation and Maintenance costs	((0.62;0.82;0.82;0.96;1;1),(0.72;0.82;0.82;0.89;0.9;0.9))
C11 : Social acceptability	((0.36;0.52;0.52;0.68;1;1),(0.44;0.52;0.52;0.6;0.9;0.9))
C12 : Job creation potential	((0.36;0.54;0.54;0.7;1;1),(0.45;0.54;0.54;0.62;0.9;0.9))
C13 : Political acceptance	((0.18;0.32;0.32;0.5;1;1),(0.25;0.32;0.32;0.41;0.9;0.9))
C14 : Impact on environment	((0.82;0.96;0.96;1;1;1),(0.89;0.96;0.96;0.98;0.9;0.9))
C15 : Sustainable	((0.82;0.96;0.96;1;1;1),(0.89;0.96;0.96;0.98;0.9;0.9))
C16 : Land requirement	((0.38;0.58;0.58;0.74;1;1),(0.48;0.58;0.58;0.66;0.9;0.9))
C17 : Requirement for waste disposal	((0.7;0.88;0.88;0.98;1;1),(0.79;0.88;0.88;0.93;0.9;0.9))
C18 : Proximity to user	((0.36;0.52;0.52;0.68;1;1),(0.44;0.52;0.52;0.6;0.9;0.9))

Table 5 Distances $d(A_j, A^*)$ and $d(A_j, A_-)$ Of The Alternatives From Fuzzy Positive Ideal Solution (FPIS) And Fuzzy Negative Ideal Solution (FNIS) ($i,j=1,2,3,4,5$)

Criteria	FPIS					FNIS				
	A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
C1	0.338	0.000	0.094	0.216	0.216	0.000	0.338	0.245	0.122	0.122
C2	1.818	0.509	0.305	0.815	0.000	0.000	1.309	1.513	1.003	1.818
C3	0.000	0.112	0.466	0.502	0.592	0.592	0.481	0.127	0.090	0.000
C4	1.402	0.000	0.211	0.211	0.092	0.000	1.402	1.192	1.192	1.311
C5	0.358	1.064	0.995	0.600	0.000	0.706	0.000	0.069	0.464	1.064
C6	0.406	0.000	0.259	0.618	0.877	0.471	0.877	0.618	0.259	0.000
C7	1.540	0.999	0.645	0.185	0.000	0.000	0.541	0.895	1.355	1.540
C8	1.157	0.668	0.293	0.000	0.083	0.000	0.489	0.864	1.157	1.075
C9	0.000	0.650	0.452	0.955	0.816	0.955	0.305	0.504	0.000	0.139
C10	0.523	0.782	0.000	0.655	0.891	0.368	0.108	0.891	0.235	0.000

Table 5 Distances $d(A_j, A^*)$ and $d(A_j, A^-)$ Of The Alternatives From Fuzzy Positive Ideal Solution (FPIS) And Fuzzy Negative Ideal Solution (FNIS) ($i, j=1,2,3,4,5$) (continue)

C11	0.089	0.073	0.000	0.101	0.095	0.011	0.027	0.101	0.000	0.005
C12	0.259	0.000	0.000	0.451	0.397	0.192	0.451	0.451	0.000	0.054
C13	0.681	0.681	0.000	0.213	0.102	0.000	0.000	0.681	0.468	0.579
C14	1.475	2.971	0.000	1.239	0.694	1.495	0.000	2.971	1.732	2.277
C15	1.024	0.461	0.583	0.000	0.122	0.000	0.564	0.441	1.024	0.902
C16	0.233	0.765	0.000	1.140	1.219	0.986	0.454	1.219	0.078	0.000
C17	0.000	0.740	0.730	2.528	2.528	2.528	1.788	1.798	0.000	0.000
C18	0.528	0.521	0.953	0.000	0.186	0.425	0.432	0.000	0.953	0.767

Table 6 Closeness Coefficients (CC_i) Of The Five Alternatives

RE alternatives	α^*	α^-	CC_i^*	β	Ranking
Biomass	11.310	6.146	0.352	0.466	5
Geothermal	8.510	8.782	0.508	0.673	4
Hydropower	4.238	13.049	0.755	1.000	1
Solar	7.832	9.469	0.547	0.725	3
Wind	6.748	10.532	0.609	0.807	2

4. Conclusions

During the last decade, RE investments in Turkey have been increasing. Because Turkey has a significant potential of RE sources such as solar energy, wind energy, hydroelectric, geothermal energy and biomass in terms of electricity energy and heat production. The prioritization and thus ranking of RE alternatives assist policy makers and investors in determination of investment priorities for sustainable energy planning in Turkey. In this study, a methodology consisting of combined TOPSIS and COPRAS methods is proposed considering technical, cost, economic, social-political, and environmental aspects in order to plan for national RE investments. The results achieved suggest that hydropower energy is the most promising investment area with the highest priority for Turkey. The remaining order of the alternatives in descending order is: wind energy, solar energy, geothermal energy and biomass. Hydropower energy is one of the most technologically advanced renewable energy sources among renewable energy sources. Hydropower plants are a high efficiency, fuel-free, long-lasting, clean, low-risk energy source with a low operating cost. For this reason, it is preferred in meeting the reliable and sustainable electricity needs of developed countries with the effect of increasing environmental awareness. In the further research, other multi criteria decision making methods may be used to test and compare the results obtained in this study.

Acknowledgments

The authors would like to thank the experts who contributed to this study.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Contribution of Researchers

In this research, Author1 and Author2 are responsible for scientific literature research, data collection, research design and implementation, and creation of the article; Authors3 contributed to the research design and implementation and the creation of the article.

References

[1] Taha, R.A., & Daim, T. (2013). Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review. In T. Daim, T. Oliver, & J. Kim (Eds.) Research and technology management in the electricity industry, Springer, London, 17-30.

[2] Yazdani-Chamzini, A., Fouladgar, M.M., Zavadskas, E.K., & Moini, S.H.H. (2013). Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making. Journal of Business Economics and Management, 14(5), 957-978.

[3] Kahraman, C., & Kaya, İ. (2010). A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. Expert Systems with Applications, 37(9), 6270-6281.

[4] Pohekar, S.D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi criteria decision making to sustainable energy planning- A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8(4), 365-381.

[5] San Cristóbal, J.R. (2011). Multi criteria decision making

in the selection of a renewable energy project in Spain: The vikor method. *Renewable Energy*, 36(2), 498-502.

[6] Amer, M., & Daim, T.U. (2011). Selection of renewable energy technologies for a developing county: a case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 420-435.

[7] Ahmad, S., & Tahar, R.M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. *Renewable Energy*, 63, 458-466.

[8] Tasri, A., & Susilawati, A. (2014). Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 34-44.

[9] Yi, S.K., Sin, H.Y., & Heo, E. (2011). Selecting sustainable renewable energy source for energy assistance to North Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 554-563.

[10] Gitinavard, H., Mousavi, S.M., & Vahdani, B. (2017). Soft computing based on hierarchical evaluation approach and criteria interdependencies for energy decision-making problems: A case study. *Energy*, 118, 556-577.

[11] McKenna, R., Bertsch, V., Mainzer, K., & Fichtner, W. (2018). Combining local preferences with multi-criteria decision analysis and linear optimization to develop feasible energy concepts in small communities. *European Journal of Operational Research*, 268(3), 1092-1110.

[12] Kabak, M., & Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management*, 79, 25-33.

[13] Kahraman, C., Kaya, İ., & Cebi, S. (2009). A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, 34(10), 1603-1616.

[14] Pak, B.K., Albayrak, Y.E., & Erensal, Y.C. (2015). Renewable energy perspective for Turkey using sustainability indicators. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8(1), 187-197.

[15] Sengul, U., Eren, M., Shiraz, S.E., Gezder, V., & Sengul, A.B. (2015). Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey. *Renewable Energy*, 75, 617-625.

[16] Topcu, Y.I., & Uluengin, F. (2004). Energy for the future: an integrated decision aid for the case of Turkey. *Energy*, 29(1), 137-154.

[17] Ulutaş, B.H. (2005). Determination of the appropriate energy policy for Turkey. *Energy*, 30(7), 1146-1161.

[18] Çolak, M., & Kaya, İ. (2017). Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 840-853.

[19] Chen, S.M., & Lee, L.W. (2010). Fuzzy multiple

attributes group decision-making based on the interval type-2 TOPSIS method. *Expert Systems With Applications*, 37(4), 2790-2798.

[20] Baris, K., & Kucukali, S. (2012). Availability of renewable energy sources in Turkey: Current situation, potential, government policies and the EU perspective. *Energy Policy*, 42, 377-391.

[21] Kaya, T., Kahraman, C. (2011). Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6577-6585.

[22] Atmaca, E., & Basar, H.B. (2012). Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP). *Energy*, 44(1), 555-563.

[23] Ertay, T., Kahraman, C., & Kaya, İ. (2013). Evaluation of renewable energy alternatives using MACBETH and fuzzy AHP multicriteria methods: the case of Turkey. *Technological and Economic Development of Economy*, 19(1), 38-62.

[24] Büyüközkan, G., & Güler, S. (2016). An integrated DEMATEL-ANP approach for renewable energy resources selection in Turkey. *International Journal of Production Economics*, 182(c), 435-448.

[25] Çelikkbilek, Y., & Tüysüz, F. (2016). An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources. *Energy*, 115, 1246-1258.

[26] Balin, A., & Baraçlı, H. (2017). A fuzzy multi criteria decision making methodology based upon the interval type-2 fuzzy sets for evaluating renewable energy alternatives in Turkey. *Technological and Economic Development of Economy*, 23, 742-76.

[27] MENR. (2019). Turkish national renewable energy action plan, Ankara, Turkey: Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources.

[28] Toksarı, M.D. (2007). Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey. *Energy Policy*, 35(8), 3984-3990.

[29] Tefek, M.F., Uğuz, H., & Güçyetmez, M. (2019). A new hybrid gravitational search-teaching-learning-based optimization method for energy demand estimation of Turkey. *Neural Computing and Applications*, 31, 2939-2954.

[30] Demirel, N.Ç., Demirel, T., Deveci, M., & Vardar, G. (2017). Location selection for underground natural gas storage using Choquet integral. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 368-379.

[31] Hwang, C.L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: methods and applications, New York, USA: Springer-Verlag.

[32] Dağdeviren, M., Yavuz, S., & Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8143-8151.

- [33] Önüt, S., & Soner, S. (2008). Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *Waste Management*, 28 (9), 1552-1559.
- [34] Dağdeviren, M. (2010). A hybrid multi criteria decision-making model for personnel selection in manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21, 451-460.
- [35] Shih, H.S., Shyur, H.J., & Lee, E.S. (2007) An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 801-813.
- [36] Wang, P., Li, Y., Wang, Y.H., & Zhu, Z.Q. (2015). A new method based on TOPSIS and response surface method for MCDM problems with interval numbers. *Mathematical Problems in Engineering*, 938535, 11.
- [37] Afgan, N.H., & Carvalho, M.G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739-755.
- [38] Theodorou, S., Florides, G., & Tassou, S. (2010). The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review. *Energy Policy*, 38(12), 7783-7792.
- [39] Al Garni, H., Kassem, A., Awasthi, A., Komljenovic, D., & Al-Haddad, K. (2016). A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 16, 137-150.
- [40] Shmelev, S.E., Van den Bergh, J.C., & Jeroen, C.J.M. (2016). Optimal diversity of renewable energy alternatives under multiple criteria: An application to the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 679-691.
- [41] Lee, H.C., & Chang, C.T. (2018). Comparative analysis of MCDM methods for ranking renewable energy sources in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 883-896.
- [42] Ghose, D., Pradhan, S., & Shabbiruddin (2019). Development of model for assessment of renewable energy sources: a case study on Gujarat, India. *International Journal of Ambient Energy*.
- [43] Hassan, M., Afridi, M.K., & Khan, M.I. (2019). Energy policies and environmental security: A multi-criteria analysis of energy policies of Pakistan. *International Journal of Green Energy*, 16 (7), 510-519.
- [44] Seddiki, M., & Bennadji, A. (2019). Multi-criteria evaluation of renewable energy alternatives for electricity generation in a residential building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 101-117.
- [45] Ayağ, Z., & Samanlıoğlu, F. (2020). Fuzzy AHP-GRA approach to evaluating energy sources: a case of Turkey. *International Journal of Energy Sector Management*, 14 (1), 40-58.
- [46] Çolak, M., & Kaya, İ. (2020). Multi criteria evaluation of energy storage technologies based on hesitant fuzzy information: A case study for Turkey. *Journal of Energy Storage*, 28, 101211.
- [47] Ghenai, C., Albawab, M., & Bettayeb, M. (2020). Sustainability indicators for renewable energy systems using multicriteria decision making model and extended SWARA/ARAS hybrid method. *Renewable Energy*, 146, 580-597.
- [48] Rani, P., Mishra, A.R., Mardani, A., Cavallaro, F., Alrasheedi, M., & Alrashidi, A. (2020). A novel approach to extended fuzzy TOPSIS based on new divergence measures for renewable energy sources selection. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120352.
- [49] Martín-Gamboa, M., Iribarren, D., García-Gusano, D., & Dufour, J. (2017). A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 150, 164-174.
- [50] Li, C., Negnevitsky, M., Wang, X., Yue, W.L., & Zou, X. (2019). Multi-criteria analysis of policies for implementing clean energy vehicles in China. *Energy Policy*, 129, 826-840.
- [51] Naicker, P., & Thopil, G.A. (2019). A framework for sustainable utility scale renewable energy selection in South Africa. *Journal of Cleaner Production*, 224, 637-650.
- [52] Zhang, L., Xin, H., Yong, H., & Kan, Z. (2019). Renewable energy project performance evaluation using a hybrid multi-criteria decision-making approach: Case study in Fujian, China. *Journal of Cleaner Production*, 206, 1123-1137.
- [53] Nsafon, B.E.K., Butu, H.M., Owolabi, A.B., Roh, J.W., Suh, D., Huh & J.S. (2020). Integrating multi-criteria analysis with PDCA cycle for sustainable energy planning in Africa: Application to hybrid mini-grid system in Cameroon. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100628.
- [54] Devenci, K., & Güler, Ö. (2020). A CMOPSO based multi objective optimization of renewable energy planning: Case of Turkey. *Renewable Energy*, 155, 578-590.
- [55] Trolborg, M., Heslop, S., & Hough, R.L. (2014). Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 1173-1184.
- [56] Pasaoglu, G., Garcia, N. P., & Zubi, G. (2018). A multi criteria and multi expert decision aid approach to evaluate the future Turkish power plant portfolio. *Energy Policy*, 119, 654-665.
- [57] Yang, Y., Ren, J., Solgaard, H. S., Xu, D., & Nguyen, T. T. (2018). Using multi criteria analysis to prioritize renewable energy home heating technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 36-43.
- [58] Alizadeh, R., Soltanisehat, L., Lund, P. D., & Zamanisabzi, H. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method. *Energy Policy*, 137, 111174.

[59] Diemuodeke, E. O., Addo, A., Oko, C.O.C., Mulugetta, Y., & Ojapah, M. M. (2019). Optimal mapping of hybrid renewable energy systems for locations using multi criteria decision-making algorithm. *Renewable Energy*, 134, 461-477.

[60] Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). Pastatu sistemotechninis ivertinimas [Multiple criteria evaluation of buildings], Vilnius: Technika.

[61] Das, M. C., Sarkar, B., & Ray, S. (2012). A framework to measure relative performance of Indian technical institutions

using integrated fuzzy AHP and COPRAS methodology. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(3), 230-241.

[62] Sarıcalı, G., & Kundakcı, N. (2016). AHP ve COPRAS yöntemleri ile otel alternatiflerinin değerlendirilmesi. *International Review of Economics and Management*, 4(1), 45-66.

[63] SPOTR. (2009). Electricity Energy Market and Supply Security Strategy Paper. Ankara, Turkey: Republic of Turkey State Planning Organization.

Araştırma Makalesi

Dijital Dönüşüm Ekseninde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Endüstri 4.0 Olgunluk Modelinin Değerlendirilmesi

Melike Selen Dermenci^{1,*}, Aysun Sağbaş²

^{1,2} Endüstri Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 59860

¹selendermenci@gmail.com, ²asagbas@nku.edu.tr

Geliş: 13.11.2023

Kabul: 06.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1390175

Öz: Teknolojik gelişme ve rekabetin hızla arttığı günümüzde, verimlilik ve üretkenliği artırarak sürdürülebilir üretim gerçekleştirme hedefinde olan işletmeler için; dijitalleşme sürecine uyum sağlamak, mutlak bir gereklilik olarak gözükmektedir. Bu çerçevede, rekabet avantajı sağlamak isteyen işletmelerin bu değişimler karşısında aksiyon alabilmeleri için, dijital dönüşüm yol haritasının oluşturulması büyük önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada; beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede; endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyesinin ölçülebilmesi için, endüstri 4.0'ın yeni nesil teknolojilerini kapsayan bir dijital olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Bu amaçla, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri uygulanmıştır. Geliştirilen olgunluk modelinde yer alan ana ve alt kriter ağırlıklarının belirlenmesi amacı ile Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılmış olup, çalışmanın yapıldığı işletmede çalışan ve konu üzerinde uzman kişilerin değerlendirmeleri alınmıştır. İncelenen olgunluk modelinde ana kriter olarak seçilen, fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için teknolojik olgunluk seviyesinin derecelendirilmesi TOPSIS yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçta; endüstri 4.0 ekseninde ve belirlenen kriterler çerçevesinde işletmenin teknolojik olgunluk düzeyi belirlenmiş ve geliştirilen olgunluk modelinin farklı sektörlerde faaliyet gösteren işletmelere, dijital dönüşüm konusunda yol gösterici olması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: AHP, Dijital dönüşüm, Endüstri 4.0, Olgunluk modeli, TOPSIS

Evaluation of Industry 4.0 Maturity Model with Multi-criteria Decision Making Methods on the Axis of Digital Transformation

Abstract: In today's world where technological developments and competition are increasing rapidly, adapting to the digitalization process seems an absolute necessity for businesses that aim to achieve sustainable production by increasing efficiency and productivity. In this context, it is of great importance to create a digital transformation road map so that businesses that want to gain a competitive advantage can take action against these changes. In the study in a business operating in the white goods sector; In order to measure the technological maturity level of Industry 4.0, a digital maturity model covering the new generation technologies of Industry 4.0 has been introduced. For this purpose, AHP (Analytical Hierarchy Process) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) methods, which are multi-criteria decision-making methods, were applied. Analytical Hierarchy Process method was used to determine the weights of the main and sub-criteria in the developed maturity model, and the evaluations of people working in the enterprise where the study was conducted and experts on the subject were received. Grading of the technological maturity level for the main dimensions of factory 4.0, logistics 4.0, management 4.0 and operator 4.0, which were selected as the main criteria in the maturity model examined, was carried out with the TOPSIS method. After all; in the Industry 4.0 axis, the technological maturity level of the enterprise was determined within the framework of the determined criteria, and the maturity model developed was aimed to guide businesses operating in different sectors on digital transformation.

Keywords: AHP, Digital transformation, Industry 4.0, Maturity model, TOPSIS.

*Sorumlu yazar

E-mail adresi: selendermenci@gmail.com (M. S. Dermenci)

1. Giriş

Buhar makinasının icat edilmesi ile başlayan sanayi devrimleri, elektrik enerjisinin kullanılması ile seri üretime geçilmesine katkı sağlamış ve sonrasında dijital devrim olarak adlandırılan 3.sanayi devrimi ile birlikte, üretimde dijitalleşmenin başlamasına yol açmıştır. Günümüzde endüstri 4.0 (sanayi 4.0) kavramı; üretim ve hizmet alanında faaliyet gösteren işletmeler için, farklı iş süreçlerinde uygulanabilecek çeşitli teknolojiler sunmaktadır. Sanayi 4.0 çerçevesinde; endüstriyel alanlara dahil olmaya başlayan yeni nesil teknolojiler ile, tüketici davranışları karşısında daha esnek, piyasa koşulları karşısında daha dayanıklı konumlanan üretim ve yönetim sistemlerinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, farklı iş süreçlerine entegre edilen yeni nesil teknolojiler ile daha düşük maliyet, daha hızlı üretim ve daha az kaynak tüketimi konuları önem kazanmış ve endüstri 4.0'ın yanı sıra sürdürülebilirlik kavramı da işletmelerin öncelikli hedefleri arasında yer almaya başlamıştır. Hızlı ve radikal gelişmelerin meydana geldiği bu süreçte işletmeler, çeşitli zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadırlar. Her gün gelişen ve değişen müşteri isteklerini karşılamak ve pazarda güçlü bir konuma sahip olmak, bu zorluklar içerisinde ilk sırada yer almaktadır [1]. Bu kapsamda hem günümüz şartlarına uyum sağlamak hem de verimlilik ve üretkenliği artırarak sürdürülebilir bir üretim anlayışını sahip olabilmek için işletmelerin endüstri 4.0 teknolojilerini kullanarak dijitalleşme çağına ayak uydurmaları mutlak bir gereklilik olarak görülmektedir.

Birinci sanayi devriminden günümüze kadar geçen sürede meydana gelen teknolojik gelişmeler hem günlük yaşamımızda hem de üretim süreçlerimizde köklü değişimler yaratmıştır. Günümüzün rekabet dünyasında, işletmeler bu köklü değişimlere ayak uydurmak durumunda kalmıştır. Yapılan çalışmada; işletmelere bu değişimler karşısında aksiyon alabilmeleri için gerekli olan yol haritasının hazırlanması ve işletmelerin dijital dönüşüm süreçlerinde olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacıyla, bir endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Dijital olgunluk modeli oluşturulurken, işletmelere rekabet avantajı sağlayacak tüm yeni nesil teknolojiler göz önüne alınmış olup; fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı teknoloji değerlendirilmiştir. Modelin uygulanması ile işletmenin mevcut endüstri 4.0 olgunluk seviyesinin belirlenmesi ve dört ana boyutun kendi aralarında değerlendirilebilir bir yapıya getirilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede gelişime daha fazla ihtiyaç duyulan alanlar belirlenmiş ve öncelikli alanların tanımlanması sağlanmıştır. Çalışma beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede gerçekleştirilmiş olup, yapılan çalışmada kullanılan kriterler, literatür ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek seçilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar çerçevesinde; işletmenin ilgili bölümlerinde çalışan yöneticiler ve mühendislerin değerlendirmesi ile, işletme bazında kullanımı en yaygın olan endüstri 4.0 teknolojileri seçilmiştir. Literatürdeki endüstri 4.0 olgunluk modelleri ile ilgili çalışmalar incelediğinde; beyaz eşya sektörü özelinde yapılmış kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca işletme dinamikleri göz önüne alınarak seçilen kriterler değerlendirildiğinde; sektör özelinde spesifik olarak her bir

endüstri 4.0 teknolojisinin ayrı ayrı irdelenmiş olması önemlidir. Bu özellikler, çalışmanın özgün yönünü oluşturmada ve bu yönü ile literatüre farklı bir bakış açısı kazandırılması amaçlanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde daha çok kuramsal temeller üzerine kurulmuş olan olgunluk değerlendirme modellerine rastlanmıştır. Yapılan çalışmada ise; hem üretime entegre edilen yeni nesil teknolojileri içine alan, hem de yönetsel kavramları kapsayan bir olgunluk modelinin geliştirilmesi, çalışmanın önemli diğer bir özgün değeri olarak belirtilebilir. Bu çerçevede de, literature katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Uygulama ve işletmeler açısından bakıldığında; oluşturulan olgunluk modelinin beyaz eşya sektöründe uygulanmasına rağmen, farklı sektörlerde de uygulanması ile işletmeler için dijital dönüşüm yolculuğunda uzun vadeli bir rehber niteliğinde olması hedeflenmiştir.

İşletmelerin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyelerinin belirlenmesi konusunda literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetlenmiştir. Schumacher, Erol ve Sihni [2] dördüncü sanayi devrimi teknolojilerinin işletmelere entegre edilmesini desteklemek amacıyla, firmalar tarafından kolay uygulanabilir ve gelecekteki uygulamalara yol gösteren bir model önermişlerdir. Çalışma ile ortaya çıkarılan model 9 boyut ve 62 alt kriterden oluşmakta ve işletmelerin olgunluk seviyesi ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Model havacılık ve uzay sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede anket yöntemi kullanılarak uygulanmış ve anket likert ölçeği kullanılarak değerlendirilmiştir. Commuzzi ve Patel [3] çalışmalarında daha çok büyük veri odaklı bir teknolojik olgunluk modeli üzerinde durmuşlardır. Likert ölçeği kullanılarak çalıştırılan model, uygulandığı üç firma içinde eleştirel bir bakış açısıyla gelecekte atılacak adımlara yol gösterici olmuştur. Häberer, Lau ve Behrendt [4] ortak çalışmalarında, KOBİ'lerin endüstri 4.0 olgunluk derecelerini belirlemek için sunulan modellerin eksikliklerine odaklanmışlardır. Farklı iki modelin analiz edilmesi ve avantaj ve dezavantajlarının belirlenmesi ile küçük ve orta ölçekli işletmelerin değerlendirilmesini baz alan yeni bir model ortaya konulmuştur. Keskin ve ark. [5] tarafından oluşturulan üç aşamalı modelde; organizasyonların endüstri 4.0 hazırlık seviyelerinin tespit edilmesi amaçlanmış olup, modelin çözümlenmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS tercih edilmiştir. Akdil, Üstündağ ve Çevikcan [6] yaptıkları çalışmada, literatürde yer alan dört farklı endüstri 4.0 olgunluk ve hazırlık modelini incelemiş ve bu modellerin karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan analizler ile üç boyut ve on üç alt kriterden oluşan yeni bir model ortaya konulmuştur. Geliştirilen model Türkiye'de perakende sektöründe faaliyet gösteren bir işletmeye uygulanmış ve belirlenen kriterlerin olgunluk dereceleri hesaplanmıştır. Bibby ve Dehe [7] endüstri 4.0 teknolojilerinin uygulanabilirlik seviyelerini belirlemek amacıyla üç boyuttan oluşan teknolojik olgunluk modeli oluşturmuşlardır. Geleceğin fabrikası, insan-kültür ve strateji olmak üzere üç ana ve 13 alt kriterden oluşan modelde, dijital olgunluğun ölçülmesi için IMPULS ve "dijital operasyonlar öz değerlendirme modeli" kullanılmıştır. Elde edilen modelin değerlendirme işlemi karar vericilerin değerlendirmesi ve kriterlerin ağırlıklı ortalamalarının hesaplanması üzerine

kurulmuştur. Çalışma, savunma sanayi alanında faaliyet gösteren 12 büyük ölçekli firma için uygulanmıştır. Kiraz ve ark. [8] tarafından yapılan çalışmada, işletmelerin hem mevcut hem de gelecekteki endüstri 4.0 seviyelerinin belirlenmesi için bir model önerilmiştir. Modelde, IMPULS kriterleri baz alınmış ve kriterlerin önem derecelerinin belirlenmesi amacıyla DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) ve literatürde daha önce kullanılmamış BBH (Bulanık Bilişsel Haritalama) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda üç farklı senaryo ayrı ayrı değerlendirilmiş ve endüstri 4.0 olgunluk seviyesini en çok etkileyen kavramlar belirlenmiştir. Santos ve Martinho [9] tarafından önerilen endüstri 4.0 olgunluk modeli; literatürde yer alan üç farklı olgunluk modelinin analiz edilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Analiz sonucunda sunulan beş boyutlu model, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren iki farklı işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulama aşamasında anket yönteminden yararlanılmış ve olgunluk seviyeleri tam olarak açıklanmıştır. Koyuncu [10] yaptığı çalışmada; literatürde yer alan sanayi 4.0 rehberi, bağlantılı kurumsal olgunluk modeli, ACATECH, dijital operasyonlar öz değerlendirme modeli ve IMPULS olmak üzere farklı endüstri 4.0 olgunluk değerlendirme modellerinin Bulanık TOPSIS yöntemi ile karşılaştırılmasını gerçekleştirmiştir. Üç uzman karar verici ile yapılan değerlendirme sonucunda IMPULS modeli en iyi model olarak seçilmiş ve uygulama yapılan firmada IMPULS modelinin uygulanması ile gelecek için bir yol haritası oluşturulmuştur. Etkeser [11] tarafından yapılan çalışmada KOBİ'lerin endüstri 4.0 hazırlık seviyelerini saptamak amacı ile bir olgunluk modeli üzerinde çalışmıştır. Dokuz boyut üzerine kurulmuş olan olgunluk modelinin değerlendirme aşamasında AHP yöntemi kullanılmıştır. Tekstil ve kimya sektöründe faaliyet gösteren iki farklı firmada uygulanan modelin güvenilirliği de ispatlanmıştır. Pacchini ve ark. [12] tarafından oluşturulan olgunluk modeli; nesnelere interneti, büyük veri, bulut bilişim, siber-fiziksel sistemler, işbirlikçi robotlar, eklemeli imalat, artırılmış gerçeklik ve yapay zekâ olmak üzere sekiz farklı yeni nesil teknolojinin değerlendirilmesini gerçekleştirmektedir. Otomotiv sektöründe uygulanan model, değerlendirilen işletmenin çalışma içerisinde belirlenen altı farklı seviyeden hangisinde yer aldığına gösterilmesine katkı sağlamıştır. Çiray [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada; küçük ve orta ölçekli imalat firmalarının endüstri 4.0 olgunluk düzeylerinin belirlenmesi için bir olgunluk modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model beş boyuttan (Strateji ve Politika, İnsan ve Kültür, Organizasyon ve Süreçler, Bilişim Teknolojileri ve Ürünler) oluşmakta olup, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren 23 işletmede uygulanmıştır. Modelin uygulanması ile işletmelerin dijital dönüşüm süreçleri için gerekli olan faaliyetleri planlayabilecek çıktılara sahip olmaları hedeflenmiştir. Wagire ve ark. [14] Hindistan'da bulunan imalat işletmelerinin teknolojik olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile, 7 boyut ve 38 alt kriterden oluşan ampirik temelli bir olgunluk modeli önermişlerdir. Çok sayıda değerlendiricinin bulunduğu çalışmada daha doğru bir karar verme süreci yürütülebilmesi ve kriterlerin önem seviyelerinin karar vericiler özelinde değerlendirilmesi için bulanık AHP çok kriterli karar verme yönteminden yararlanılmıştır. Rafael ve ark. [15] IMPULS kriterlerini baz alarak gerçekleştirdikleri

çalışmada, işletmeler için dijitalleşme konusunda yol gösterici olabilecek bir model ortaya koymuşlardır. Oluşturulan modelin standart bir model haline gelebilmesi için farklı sektörlerde ve farklı bilimsel yöntemler kullanılarak uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Sarı [16] yaptığı çalışmada; kriterleri arasında eklemeli imalat ve büyük veri gibi teknolojilerin yer aldığı bir endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturmuştur. Gıda ve içecek sektöründe uygulaması gerçekleştirilen modelin değerlendirme aşamasında AHP çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Ataman [17] ortaya koyduğu çalışmada; savunma sanayinin endüstri 4.0 olgunluk düzeyini belirlemek amacı ile bulanık AHP tekniğini kullanmıştır. 3 uzman görüşü alınarak değerlendirilen modelin sonucunda 5 kriter içinden en yüksek değeri sahip kriter strateji olarak ortaya çıkmıştır. Rauch ve ark. [18] yaptıkları çalışmada 42 farklı endüstri 4.0 konseptine yer vermiş ve oluşturulan olgunluk modelinin değerlendirme aşamasında; kriterlerin mevcut ve hedef değerlerine ek olarak kriter ağırlıklarını da sürece dahil edilmiştir. Model, 17 farklı sanayi şirketinde gerçekleştirilmiştir. Baki ve Serdar [19] lojistik sektöründe faaliyet gösteren firmaların sanayi 4.0 olgunluk seviyelerini belirlemek amacı ile bir olgunluk modeli önermişlerdir. Önerilen modelde IMPULS olgunluk modeline ait kriterler kullanılmış olup, modelin değerlendirilmesi için iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir. AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR bütünlük yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada her iki yöntem sonucunda da kriter için aynı sıralama elde edilmiştir. Modelin kısıtı olarak, IMPULS modelinde yer alan kriterlerin lojistik sektörünü tam olarak yansıtmadığı üzerinde durulmuştur. Tiryaki [20] tarafından yapılan çalışmada, teknoloji geliştirme programları için bir etki değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Model, üç modül üzerine kurulmuş olup her bir modül altında 3 adet teknolojik gösterge bulunmaktadır. Göstergelerin değerlendirilmesi ise uzmanlar tarafından anket yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve teknolojik olgunluk seviyesini analiz etmek amacı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Gökalp, Şener ve Eren [21] literatürde yer alan yedi farklı olgunluk modelini incelemiş ve bu modelleri uzmanlar tarafından belirlenen yedi kriter çerçevesinde değerlendirmişlerdir. Yapılan değerlendirme sonucunda hiçbir modelin istenilen tüm kriterleri karşılayamadığı görülmüştür. Analiz edilen modellere dilsel değişkenler eklenerek yeni bir olgunluk modeli ortaya konulmuştur. Yeni oluşturulan modelin işletmelere daha fazla esneklik, daha fazla kalite ve sürekli gelişim alanlarında fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Çınar, Zeeshan ve Korhan [22] işletmelerin endüstri 4.0 adaptasyon süreçlerini değerlendirmek amacı ile; dört boyut ve beş seviyeden oluşan bir olgunluk modeli ortaya koymuşlardır. Üretim sistemlerindeki teknolojik entegrasyon skorunu yöneticilere sunmaya olanak sağlayan bu model, aynı zamanda işletmeler için bir yol haritası oluşturarak işletmenin endüstri 4.0 teknolojilerine adaptasyon sürecindeki önemli noktaların belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Çalışma sonucunda sunulan model anket çalışmasından elde edilen verilerin ağırlıklı ortalama yöntemi ile analiz edilmesine dayanmaktadır. Oktay [23] gerçekleştirdiği çalışmada savunma sanayi özelinde bir olgunluk modeli geliştirmiştir. Elde edilen model teknolojinin kullanımı, ürün geliştirme, insan ve ARGE kültürü ile strateji ve yönetim olmak üzere dört

ana kriter üzerine kurulmuş olup 17 alt kriter içermektedir. Çalışan yorumlarına dayanan değerlendirme aşamasında ise kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi için MACBETH yöntemi tercih edilirken, uygunluk seviyesinin hesaplanması için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Elibal ve Özceylan [24] tarafından gerçekleştirilen çalışmada literatürde yer alan mevcut uygunluk modellerinin karşılaştırılması için çok kriterli karar verme yöntemlerinden DEMATEL ve TOPSIS yaklaşımlarından faydalanılmış olup, 7 ana ve 33 alt kriter kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda en yüksek skora sahip uygunluk modeli Schumacher ve ark. [2]'nin literatüre kazandırdığı uygunluk modeli olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında uygulamalı ve teorik olmak üzere çok sayıda endüstri 4.0 uygunluk modeli incelenmiştir. İncelenen modeller genel olarak endüstri 4.0 teknolojilerinin kullanım ve uygunluk seviyesinin belirlenmesine yönelik olsa da farklı endüstrilere, özel üretim süreçlerine veya spesifik teknolojilere odaklanan modeller de bulunmaktadır.

2. Endüstri 4.0 Uygunluk Modelleri

Uygunluk modelleri; kuruluşların hedefleri çerçevesinde ilerlemenin denetlenmesini sağlayan, güçlüklerin, zayıflıkların ve fırsatların anlaşılması konusunda yol gösterici özelliğe sahip, süreçleri veya organizasyonları farklı açılardan değerlendirmek için kullanılacak önemli bir tekniktir [25]. Uygunluk modelleri oluşturulurken farklı ana ve alt kriterler tanımlanmaktadır. Bu kriterler tanımlanırken, modelin uygulanacağı sektörün baz alınması da modelin verimliliği için kritiktir. Belirlenen kriterler çerçevesinde farklı dijital uygunluk modellerinin geliştirilmesi; işletmenin mevcut uygunluk veya hazırlık durumunun değerlendirilmesinde büyük önem arz etmektedir. Elde edilen sonuçlar, her bir işletmenin gelecekteki uygulamaları için bir alt yapı oluşturmaktadır. Zayıf alanların belirlenmesi ve hedef seviye ile mevcut seviye arasındaki farkın görülmesi, gelecek için işletmelere bir yol haritası hazırlama imkânı sunmaktadır. Aynı zamanda uygunluk modelleri yardımı ile işletmelerin birbiri ile kıyaslanması, günümüzdeki rekabet koşulları göz önüne alındığında; stratejik planlamalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır [2]. İşletmelerin sektörel ve teknolojik düzey farklılıkları, mevcut durumları vb. gibi farklılıklar nedeniyle, literatürde birçok Endüstri 4.0 hazırlık ve uygunluk modeli bulunmaktadır. Lichtblau ve ark. [26] tarafından 2015 yılında yapılmış olan IMPULS-Endüstri 4.0 Hazırlık Modeli çalışması; işletmelerin endüstri 4.0 sürecinde istedikleri konuma ulaşmaları için yapılacakları belirlemelerine yardımcı olmayı amaçlamışlardır. Strateji ve organizasyon, çalışanlar, veri odaklı hizmetler, akıllı ürünler, akıllı fabrika ve akıllı operasyon olmak üzere altı boyut üzerine kurulan uygunluk modeli, sekiz kriter içermektedir. İşletmelerin endüstri 4.0 konusundaki bilgileri, hazırlıklarını ve mevcut uygulamaları üretime entegre etmekteki başarılarını ölçmeyi amaçlayan model, firmaların kendi kendilerini değerlendirmelerini temel almaktadır. Model uygulanırken 24 sorudan oluşan bir anket çalışması yapılmakta ve değerlendiricilerden işletmelerini değerlendirmeleri istenmektedir. Değerlendirme için Likert ölçeği kullanılmakta, sorulan sorular yöneticiler ile yapılan çalıştaylar sonucunda belirlenmektedir. Modelin uygulanması sonucunda işletmelerin hangi seviyeye dâhil olduklarını

görebilmek adına 0 ile 5 arasında 6 farklı seviye tanımlanmıştır. Schumacher ve ark. [2]'nin işletmelerin endüstri 4.0'a olan hazırlık seviyelerini belirlemek amacı ile oluşturdukları model; daha çok soyut kavramlara dayanmaktadır. Modelde uygunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile, dokuz boyut tanımlanmıştır. Liderlik, strateji, ürünler, müşteriler, kültür, operasyon, teknoloji, yönetim ve insan olmak üzere belirlenen bu dokuz boyut altında, 63 farklı kriter sıralanmıştır. Modelin değerlendirilmesi anket yardımı ile gerçekleştirilmiş ve likert ölçeği kullanılmıştır. Bu doğrultuda yapılan değerlendirme sonucunda işletmenin uygunluk seviyesi belirlenmiştir. 2014 yılında Rockwell Otomasyon şirketinin geliştirdiği modelde, Endüstri 4.0 'a geçiş ilgili organizasyonun bilgi teknolojileri bilgi altyapısı, veri besleyen ve alan cihazlar, tüm bu bilgileri taşıyan ağlar ve güvenlik politikaları olmak üzere 4 boyutta değerlendirilmiştir. Bu aşamadan sonra yeni bir bilgi teknolojileri organizasyonu inşa edilmiştir. Geçmiş dönemde kullanılan yapılar değerlendirilerek uzun vadeli aksiyonlara başlanmış ve toplanan verilerin nasıl işleneceği değerlendirilerek, yeni iş akışlarının ve sorumlulukların belirlenmesine odaklanılmıştır. Son aşamada ise; veri paylaşımı yardımı ile işletme ve çevre arasında iş birliği sağlanması amaçlanmıştır (Bağlı Kurumsal Uygunluk Modeli). Leyh ve ark. [27] tarafından ortaya konulan modelde; 5 farklı uygunluk seviyesi bulunmaktadır. Bu seviyeler; basit dijitalleşme, departmanlar arası dijitalleşme, dikey ve yatay dijitalleşme, tamamen dijitalleşme ve optimizasyon olarak belirlenmiştir. Modelde bulunan dört ana boyut bu 5 seviye göz önünde bulundurularak değerlendirilme yapılmıştır (SMMI Uygunluk Modeli). Dijital uygunluk modeli TUBİTAK- BİLGEM Yazılım Teknolojileri Araştırma Enstitüsü tarafından 2017 yılında getirilmiştir. Bu modelin amacı; kamu kurumlarının dijital dönüşüm yetkinliğinin belirlenmesidir. Daha önce kullanılan uygunluk modelleri incelenmiş ve bu modeller göz önüne alınarak dijital uygunluk modeli ortaya konulmuştur. Modelin değerlendirilmesi 5 seviyeden oluşan likert ölçeği ile gerçekleştirilmiştir. Çınar ve ark. [22]'nin çalışmalarında ortaya koydukları model ise; diğer uygunluk modellerinin aksine işletme içerisinde yer alan dört farklı alanın uygunluğunu ayrı ayrı ölçmeye odaklanmıştır. Fabrika 4.0, Lojistik 4.0, Yönetim 4.0 ve Operatör 4.0 olmak üzere 4 farklı boyut üzerine kurulan model, her bir boyut için farklı değerlendirme kriterleri içermektedir. Uygunluk modelini oluşturan kriter arasında büyük veri analizi, makine öğrenmesi, akıllı ürün, siber güvenlik, bulut bilişim, liderlik ve organizasyon, inovasyon stratejileri ve dijital ikiz gibi günümüzde işletmelerin uyguladığında fark yaratabilecek teknolojiler yer almaktadır. Model; 4 boyut, 5 seviye, 60 ikincil boyut ve 246 alt kriterden oluşmaktadır.

3. Materyal ve Yöntem

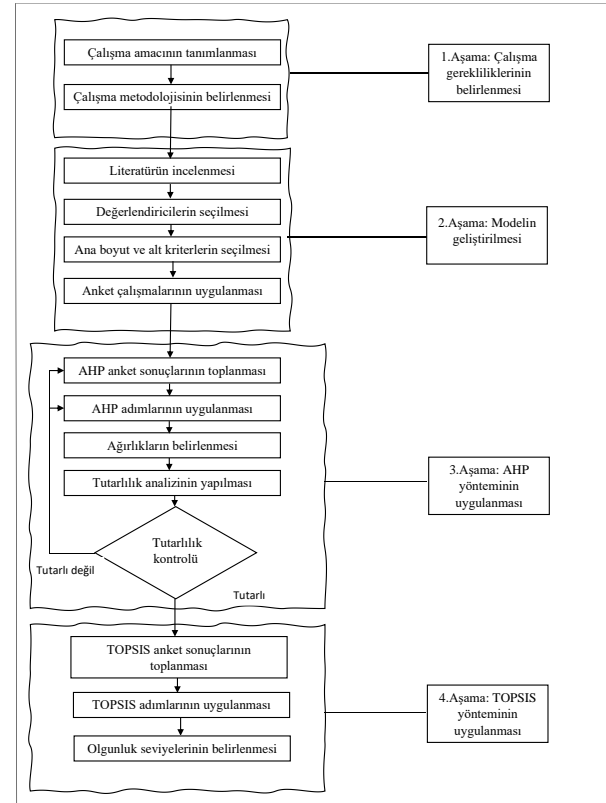
Çalışma, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede yapılmış olup, buzdolabı, çamaşır makinası, bulaşık makinası ve fırın olmak üzere dört farklı alanda üretim yapan işletmede, üretilen ürünlerin büyük bir kısmını yurt dışına ihraç edilmektedir. Dördüncü sanayi devrimi ile hayatımıza dahil olan birçok yeni nesil teknoloji, işletme içerisindeki proseslerde aktif olarak kullanılmaktadır. Üretilen ürünlerin ilk tedarikçiden alınıp, son kullanıcıya kadar ulaştırılmasına kadar geçen süre içerisinde dahil oldukları tüm işlemlerde

dijitalleşme çalışmaları en üst düzeyde takip edilmektedir. Her bir üretim prosesinde harcanan enerji, yeni nesil teknolojiler ile anlık olarak takip edilmekte ve doğaya en az zarar verecek şekilde üretim süreçleri yenilenmektedir. Çalışma işletme içerisinde yer alan çamaşır makinası fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Bu fabrikanın seçilmesinin nedeni; günümüzde büyük bir öneme sahip olan “baştan sona izlenebilirlik” kavramının fabrika içerisinde uygulandığı ilk bölüm olmasıdır. Birçok teknolojinin birleşimi ile ortaya çıkan izlenebilirlik kavramı, aynı zamanda bu konuda uzman insan potansiyeli de gerektirmektedir. Dolayısı ile bu alanın seçilmesi ile; geliştirilen modelde yer alan fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 ana boyutları için geniş bir değerlendirme imkânı sunulmasına olanak sağlamaktadır.

Literatürde yer çalışmalarda; endüstri 4.0 olgunluk modeli oluşturulması amacı ile çok sayıda farklı ana ve alt farklı kriter tanımlanmış ve bu kriterler çerçevesinde oluşturulan modeller bilimsel yöntemler aracılığıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin oluşturulması aşamasında; öncelikle geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatür araştırması sonucunda elde edilen tüm olgunluk modelleri analiz edilerek gruplandırılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda uygulamanın gerçekleştirileceği işletmenin dinamiği ve yönetim faaliyetleri göz önünde bulundurularak ana ve alt kriterlerin seçim işlemi işletmede görev yapan yönetici ve uzman pozisyonundaki 24 kişi tarafından gerçekleştirilmiştir. Değerlendirici grubu 8 endüstri mühendisi, 2 kontrol ve otomasyon mühendisi, 8 elektrik ve elektronik mühendisi ve 6 makine mühendisinden oluşmakta olup 2 ile 8 yıl arasında tecrübeye sahiptir. Endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinde kullanılacak olan ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından işletmenin olgunluk seviyesinin tespit edilmesi için kullanılacak modelin seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda iki aşamalı bir değerlendirme yöntemi kullanılması kararlaştırılmış ve AHP ile TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Tüm bu adımların takip edilmesi sonucunda modelin genel yapısı ortaya çıkarılmıştır. Modelin geliştirilmesi sürecinde takip edilen tüm adımlar Şekil 1.’de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan endüstri 4.0 dijital olgunluk modelinin seçilmesi aşamasında; detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Araştırma sonucunda farklı sektörlerde farklı kriterler ve değerlendirme yöntemleri kullanılarak yapılan çok sayıda dijital olgunluk modeli incelenmiştir. Bu doğrultuda Lichtblau ve ark. [26] ve Schumacher ve ark. [2]’nin oluşturdukları olgunluk modelleri literatürde en çok kullanılan iki model olarak belirlenmiştir. Belirlenen modellerin içerdikleri kriterler benzerlik göstermekte olup, daha çok teorik kavramlar üzerine odaklanılmıştır. Model yapılarında bulunan çok sayıda boyut ayrıntılı bir değerlendirme ortamı oluşturmakla birlikte anlam karmaşıklığı yaratabilmekte ve değerlendiriciler tarafından uygulama zorluğu teşkil edebilmektedir. Bu nedenle, iki model yapısı da hibrit olarak çalışmaya dahil edilmiştir. İncelenen modellerin içerdiği alt kriterler değerlendirilerek, işletme dinamiğine uygun olanlar çalışmaya dahil edilmiştir. İlk olarak IMPULS modeline bakıldığında; modelde yer alan kriterler çok sayıda çalışmada referans olarak alınmıştır [7,8,15]. Model temel olarak 6 kriter

(strateji ve organizasyon, akıllı fabrika, akıllı işlemler, akıllı ürünler, veriye dayalı hizmetler, çalışanlar) içermektedir. Çalışma kapsamında oluşturulan modelde; endüstri 4.0 stratejisi, organizasyon ve liderlik kriterleri alt kriter olarak ele alınmıştır. Uygulamanın gerçekleştirileceği beyaz eşya fabrikasının üretim ve yönetim süreçlerinde çok sayıda teknoloji kullanılmakta ve bu teknolojilerin birbiri ile ortaklaşa çalışması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Dolayısı ile literatürde en çok tercih edilen kriterlerin aksine, oluşturulacak modelin her bir teknoloji ve sürecinin farklı başlıklar halinde ele alınması gerektiğine karar verilmiştir. Bu sayede endüstri 4.0’ın hangi bileşeninin işletmede hangi seviyede uygulandığı ve gelecekteki hedeflere ulaşabilmek için hangi alana daha fazla yatırım yapılması gerektiğine dair çıkarımlar yapmak mümkün olmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen modelde kullanılacak kriterlerin seçiminde; Çınar ve ark. [22] tarafından yapılan çalışmada ortaya konulan endüstri 4.0 olgunluk modeli ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilmiştir. Model için seçilen dört boyut ve bu boyutlar altında değerlendirilen kriterlerin seçimi Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Teknolojik olgunluk modeli geliştirme aşamaları

Endüstri 4.0 olgunluk modelinde kullanılan ana ve alt kriterlerin belirlenmesinin ardından, modelin değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Literatürde yer alan olgunluk modellerinde; kriterlerin değerlendirilmesi amacı ile çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar olduğu görülmüştür [8,10,17,16,23]. Yapılan çalışmada; dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi için çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri birlikte kullanılmış olup, veri toplama yöntemi olarak anket yardımı ile uzman görüşlerine başvurulmuştur. AHP, karar vermede grup veya bireyin önceliklerini dikkate alan, nitel veya nicel

değişkenleri bir arada değerlendirebilen matematiksel bir tekniktir AHP, probleme hem objektif hem de subjektif düşüncelerin karar sürecine dâhil edilmesine imkân vermekte olup, grup kararları için diğer yöntemlere göre daha uygundur. Bu doğrultuda olgunluk modelinin değerlendirilmesinde ilk adım olan kriter ağırlıklarının belirlenmesi için AHP yöntemi tercih edilmiştir. Modeldeki tüm ana ve alt kriterlerin ağırlık değerlerinin elde edilmesinden sonra, dört ana kriterin sıralanması amacı ile TOPSIS yönteminden faydalanılmıştır. TOPSIS yöntemi; her bir alternatifin ideal çözüme göre karşılaştırmasına imkân tanımaktadır.

Tablo 1. Olgunluk Modeli Ana ve Alt kriterleri

	Alt Kriterler
FABRİKA 4.0	Otomasyon
	Makine Öğrenmesi
	Arttırılmış Gerçeklik
	Siber Güvenlik
	Büyük Veri Analitiği
	Bulut Bilişim
	Sürdürülebilirlik
	Teknoloji Entegrasyonu
	Dijital İkiz
	Karar Destek Sistemleri
	Akıllı Ürün
	Üretim Yönetim Sistemleri
	Eklemler İmalat
	Arttırılmış Gerçeklik
Bakım Planlama ve Zamanlama	
LOJİSTİK 4.0	Alt Kriterler
	Veri Görselleştirme
	Depo ve Depolama
	Uçtan Uca Görünürlük
	Yalın Lojistik
Büyük Veri Analitiği	
YÖNETİM 4.0	Alt Kriterler
	14.0 Yönetim Modeli
	14.0 Yatırım
	Yalın Üretim Stratejisi
	Strateji 4.0
	İnovasyon Stratejisi
İş Birliği	
Organizasyon ve Liderlik	
OPERATÖR 4.0	Alt Kriterler
	Bilişsel Ergonomi
	Organizasyonel Ergonomi
	Fiziksel Ergonomi
	Operatör Becerileri
14.0 Yatırımı	
İnsan Kaynakları 4.0	

3.1. AHP Yaklaşımı

Oluşturulan olgunluk modelinde yer alan dört boyut ve bu boyutların altında bulunan tüm alt kriterlerin birbirlerine göre önemi AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Modelin değerlendirme verileri; anket yöntemi kullanılarak, uzman görüşlerinin alınması ile elde edilmiştir. Ana ve alt kriterlerin birbiri ile karşılaştırılması amacı ile; çalışmaya katılan 24 uzman tarafından (kendilerine verilmiş olan yönergeye göre) hazırlanan anket formları doldurulmuş ve karşılaştırma matrisleri elde edilmiştir. Ardından tüm katılımcıların doldurduğu matrislerdeki verilerin geometrik ortalaması alınarak, birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur.

AHP yönteminin uygulanması aşamasında; ilk olarak standart karar matrisleri (A_{ij}) oluşturulmaktadır. Standart karar matrisi denklem (1)'de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ii} = 1, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ij} \neq 1 \quad (1)$$

Yapılan çalışmada beş adet karşılaştırma matrisi elde edilmiştir. Bunlardan biri; ana boyutların karşılaştırma matrisi iken, diğer dört matris diğer ana boyutlar altında bulunan alt kriterlerin değerlendirme matrisleridir. Elde edilen bu beş karşılaştırma matrisi çok sayıda uzmanın değerlendirme matrislerindeki değerlerin geometrik ortalamaları alınarak oluşturulan birleştirilmiş karşılaştırma matrisleridir. Standart karar matrisleri oluşturulduktan sonra; standart karar matrislerine normalleştirme işlemi yapılarak normalleştirilmiş karar matrisleri (A'_{ij}) elde edilmekte ve her karar alternatifinin ağırlığı hesaplanmaktadır. Denklem (2)'de gösterildiği üzere normalleştirme işlemi yapılmaktadır.

$$A'_{ij} = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a'_{n1} & a'_{n2} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix} \quad a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (i = 1,2,3 \dots n) \quad (2)$$

Aynı zamanda normalize edilmiş karar matrisinin her bir satırında yer alan değerlerin ortalamaları bulunarak öz vektörler (w) elde edilmektedir. Özvektör matrisi denklem (3)'te verilmiştir.

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix}, \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3)$$

Bir önceki adımda elde edilen özvektör matrisi ile standart karar matrisinin çarpılması ile denklem (4)'te görüldüğü üzere Sonraki aşama; ağırlıklandırılmış ve normalize edilmiş karar matrislerinin (A'') oluşturulmasıdır (Eşitlik 4).

$$A'' = A \times w = \begin{bmatrix} w_1 a_{11} & w_1 a_{12} & \dots & w_1 a_{1n} \\ w_2 a_{21} & w_2 a_{22} & \dots & w_2 a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n a_{n1} & w_n a_{n2} & \dots & w_n a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sonraki aşamada ise; tutarlılık analizini gerçekleştirmek üzere ağırlıklandırılmış karar matrisinin her bir ögesi özvektör matrisinde buna karşılık gelen ögeye bölünmesi ile elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve λ_{max} hesaplanmış ve tutarlılık indeksi (CR) belirlenmiştir (Eşitlikler 5 ve 6).

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{(A \cdot w)_j}{n \cdot w_j} \right) \quad (5)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

3.2. TOPSIS Yaklaşımı

AHP metodunun uygulanması sonucunda elde edilen final ağırlıkları kullanılarak, ana kriterlerin sıralanmasının yapılması amacıyla TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi, uzmanların öznel yargıları kullanılmadan nesnel sayısal değerler üzerinden işlem yapan, değişkenlere ağırlık atanmasını gerektirebilen birçok kriterli karar verme tekniğidir. TOPSIS yönteminin uygulanması aşamasında problemin amacına bağlı olarak farklı ölçekler kullanılmaktadır. Yapılan

çalışmada; her bir alt kriterin endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin değerlendirilmesi amacı ile doğrusal bir ölçek (1-5 likert ölçeği) kullanılmıştır. Oluşturulan olgunluk modelinde her alt kriter, bir endüstri 4.0 teknolojisini temsil etmektedir. Anket çalışması için oluşturulan ölçek; tablo 2’de verilmiş olup, endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin hesaplanabilmesi amacı ile beş farklı seviye tanımlanmıştır.

Tablo 2. TOPSIS Yöntemi Değerlendirme Seviyeleri

Olgunluk Seviyesi	Açıklama
Seviye 1	Endüstri 4.0 teknolojisi konusunda planlama ve çalışma yapılmamaktadır.
Seviye 2	Endüstri 4.0 konusunda projelendirme çalışmaları başlamış, pilot uygulama alanı için değerlendirmeler yapılmaktadır.
Seviye 3	Endüstri 4.0 konusunda pilot çalışmalar uygulanma aşamasındadır.
Seviye 4	Endüstri 4.0 teknolojileri belli bölümlerde uygulanmaktadır.
Seviye 5	Endüstri 4.0 teknolojisi tüm bölümlerde aktif olarak uygulanmaktadır.

Yapılan çalışmanın literatürde yer alan çalışmalardan farkı; çalışmada metinsel anket soruları bulunmamaktadır. Bunun iki nedeni bulunmaktadır. İlki; oluşturulan modelde her bir teknoloji ayrı kriterler olarak ele alınmış, yani literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi teknoloji kriteri altında değerlendirilmemiştir. Bir diğer sebep ise; değerlendirmenin tamamen sayılar üzerinden yapılmasıdır. Sayılar üzerinden değerlendirilmesinin nedeni ise, fabrikada yıl sonunda projeler belirlenirken, her projenin hizmet ettiği teknoloji, plan içerisinde belirtilmektedir. Dolayısı ile yıl içerisinde hangi alanda hangi teknolojiye hizmet eden kaç tane proje yapılmış ve hangi aşamada olduğu net olarak görülebilmektedir Buradan yola çıkarak her bir teknolojiye beş seviye için en uygun olanı değerlendiriciler tarafından belirlenmiştir. Dört boyut altında gerçekleştirilen anket çalışmasının ardından TOPSIS yönteminin uygulama aşamalarına geçilmiştir. İlk olarak; dört ana boyut altında bulunan alt kriterlerin değerlendiriciler tarafından 1 ile 5 arasında puanlanması ile elde edilen verilerin, geometrik ortalaması alınarak ağırlıklandırılmış değerlendirici kararları oluşturulmuştur. İkinci adımda; pozitif ideal ve negatif ideal çözümler elde edilmiştir (Eşitlik 7).

$$S^*_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} ; \quad S^-_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (7)$$

r_{ij} = Uzman değerlendirmeleri

v_{ij} = Ağırlıklandırılmış uzman değerlendirmeleri

v_j^* = $r_j^* \times w_j$ Ağırlıklandırılmış pozitif ideal çözüm

v_j^- = $r_j^- \times w_j$ Ağırlıklandırılmış negatif ideal çözüm

Son aşamada olgunluk seviyelerinin belirlenmesi amacı ile yakınlık katsayısı hesaplanmıştır. Her bir karar noktasının ideal çözüme olan göreceli yakınlığının hesaplanmasında, yakınlık katsayısı CC^* kullanılmaktadır. Bu yakınlık katsayısı 0 ile 1 arasında değer almakta ve denklem (9)’da verilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$CC^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (8)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Beyaz eşya sektörü, günümüzde teknolojik değişimin en hızlı ve en yoğun yaşandığı sektörlerin başında gelmektedir. Dolayısı ile küresel pazarda rekabet gücünü kaybetmemek ve tüketici davranışı odaklı üretim gerçekleştirmek amacı ile; bu sektörde faaliyet gösteren birçok firma güncel teknolojik gelişmeleri anlık olarak takip ederek üretim sistemlerine adapte etmek için çalışmaktadır. İçerisinde bulunduğumuz hızlı gelişim ve değişim dönemine ayak uydurabilmek ve işletmelerin sistematik bir adaptasyon süreci geçirebilmesi için de mevcut durumun ilk adımda net bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bu çalışmada ortaya konulan olgunluk modelinin amacı; işletmelere mevcut her bir endüstri 4.0 teknolojisini bazında durumlarını göstererek ulaşmak istedikleri hedef ile mevcut durumlarını kıyaslama imkânı sunmaktır. Fabrika 4.0, yönetim 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere 4 boyut üzerine kurulan olgunluk modelinin değerlendirmesi, işletmede aktif olarak görev yapan uzman kişiler tarafından yapılmıştır. Değerlendirmeyi yapan kişiler dijital dönüşüm faaliyetlerinde görev alan elektrik ve elektronik mühendisi, makine mühendisi, otomasyon mühendisi ve endüstri mühendisi alanlarından mezun kişilerden oluşmaktadır. Modelin değerlendirme aşamasında sırasıyla AHP ve TOPSIS yöntemleri ile veriler analiz edilmiş ve dört ana boyutun olgunluk seviyeleri karşılaştırılmıştır. İşletmenin endüstri 4.0 dijital olgunluk seviyesinin belirlenmesi amacı ile ilk olarak toplam 24 katılımcı tarafından oluşturulan karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş ve verilerin geometrik ortalamaları alınarak birleştirilmiş karar matrisleri elde edilmiştir. AHP yönteminin ilk aşamasında modelde bulunan fabrika 4.0 (A1), lojistik 4.0 (A2), yönetim 4.0 (A3) ve operatör 4.0 (A4) boyutlarının yani ana boyutların birleştirilmiş karşılaştırma matrisi oluşturulmuş ve tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Ana Boyutların Birleştirilmiş Karar Matrisi

	A1	A2	A3	A4
A1	1	1,42	0,49	2,14
A2	0,71	1	0,32	2,19
A3	2,1	3,13	1	4,69
A4	0,47	0,46	0,21	1
Toplam	4,27	6	2,03	10,01

Standart karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem (2) uygulanmış ve normalleştirilmiş karar matrisi elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. Ana Boyutların Normalize Karar Matrisi

	A1	A2	A3	A4	Özvektör (w)
A1	0,23	0,24	0,24	0,21	0,23
A2	0,17	0,17	0,16	0,22	0,18
A3	0,49	0,52	0,49	0,47	0,49
A4	0,11	0,08	0,11	0,10	0,10

Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulmasının ardından denklem (5)'in uygulanması ile tutarlılık analizi yapılmış ve CR değeri (0,01) olarak hesaplanmış olup, 0,1'in altında bulunduğu için tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Dört ana boyutun karşılaştırılması için takip edilen tüm adımlar her bir boyut özelinde alt kriterler dikkate alınarak tekrar edilmiş ve elde edilen tutarlılık sonuçları tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Alt boyutlara ait AHP tutarlılık sonuçları

Boyut	n	λ_{max}	CI	RI	CR
A1 Fabrika 4.0	15	15,68	0,05	1,59	0,03 $\leq 0,1$
A2 Lojistik 4.0	5	5,19	0,05	1,12	0,04 $\leq 0,1$
A3 Yönetim 4.0	7	7,25	0,04	1,32	0,03 $\leq 0,1$
A4 Operatör 4.0	6	6,21	0,04	1,24	0,03 $\leq 0,1$

AHP yönteminin uygulanması sonucunda; elde edilen küresel kriter ağırlıkları hem dört ana boyut hem de ana boyutlar altında bulunan alt kriterlerin önem seviyeleri hakkında bilgi vermektedir. İlk olarak dört ana boyutun ağırlıklarını incelendiğinde; önem seviyeleri sırası ile yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olmak üzere büyükten küçüğe sıralanmıştır. İşletme içerisinde yapılan değerlendirmelerde dijital dönüşümün planlı bir şekilde başlaması ve istikrarlı bir şekilde yürütülebilmesi için en önemli boyutun yönetimin desteği olduğu belirtilmiş ve sonuçlarda yönetim 4.0'ın en yüksek ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir. Operatör 4.0 boyutu ise en az ağırlığa sahip olan boyut olarak görülmektedir. Sistem bir bütün olarak değerlendirildiğinde, yönetim tarafından dijitalleşme adımlarının atılması ile, fabrika ve lojistik bölümlerinde dijital dönüşüm faaliyetleri başlamaktadır. Bu faaliyetlerin hız kazanması ve yaygınlaştırılması için son bileşen operatörler olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, operatör 4.0 kavramının dijital dönüşümün hızlandırıcı faktörü olduğu görülmektedir. Fabrika 4.0 boyutu altındaki kriterlere bakıldığında; en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler sırasıyla; üretim-yönetim sistemleri, teknoloji entegrasyonu, otomasyon, bakım planlama ve makine öğrenmesi olarak görülmektedir. Bu kriterlerin ortak noktası ise, hepsinin çok sayıda teknolojiyi aynı anda bünyelerinde barındırmalarıdır. Sürdürülebilirlik ise bu teknolojilerin aktif olarak uygulanması ile gerçekleştirilebilecek bir kriterdir. Bu kriterleri büyük veri ve makineden-makineye kriterleri takip

etmektedir. Bu kriterler de sürdürülebilirlikte olduğu gibi otomasyon ve teknoloji entegrasyonu gibi kriterlerin uygulanması ile devreye alınabilecektir. Akıllı ürün, siber güvenlik ve karar destek sistemleri aynı ağırlık seviyesine sahip olarak bulunmuştur. Bu kriterler ile ilgili projelendirmeler, az sayıda olduğundan değerlendiriciler tarafından önem seviyesi de düşük olarak verilmiştir. En az ağırlığa sahip olan kriterler ise; bulut bilişim, dijital ikiz, eklemeli imalat ve artırılmış gerçeklik olarak bulunmuştur. Bunun sebebi ise; diğer kriterlere oranla işletme içerisinde çok daha az uygulama alanına sahip olmaları ve işletmenin gelecek planlamaları içerisinde yüksek önem düzeyine sahip olmamalarıdır. Lojistik 4.0 boyutu içerisinde en yüksek ağırlıkların, yalnız lojistik ve büyük veri kriterlerine ait olduğu görülmektedir. Dijital dönüşüme başlamadan önce lojistik içerisinde gerçekleşen faaliyetlerin yalnızlaştırılması gerektiğinden, en yüksek değer yalnız lojistiğin olmuştur. Bununla birlikte çok sayıda veri barındıran iç ve dış lojistik faaliyetleri için büyük veri teknolojisi de süreçlerin iyileştirilmesi ve takibi için sıklıkla kullanılmaktadır. Büyük veri teknolojisinin aktif olarak kullanılması ile devreye alınabilecek bir diğer teknoloji ise; uçtan uca görünürlük olup büyük veriden sonra en yüksek ağırlığa sahip olan kriterdir. Depo ve depolama ile veri görselleştirme alt kriterleri ise; ağırlık olarak bu üç kriterden sonra gelmektedir. Genel olarak lojistik 4.0 boyutunda; yalnızlaştırma ve veri toplama faaliyetlerine öncelik verilmiştir. Yönetim 4.0 boyutu için en yüksek ağırlığa sahip olan kriterler; I4.0 yatırım, strateji 4.0 ve I4.0 yönetim modeli olarak belirlenmiştir. Yalnız üretim sistemi ise dijitalleşme faaliyetleri öncesinde yürütülmesi gereken bir süreç olduğundan lojistik 4.0 boyutunda olduğu gibi burada da önemli bir alt kriter olarak görülmektedir. En az ağırlığa sahip olan alt kriterler ise; inovasyon, organizasyon ve liderlik ve iş birliği olarak görülmektedir. Bu alt kriterlerin diğer yönetim 4.0 alt kriterlerine oranla daha az ağırlığa sahip olmasının nedeni, uygulanması zaman alan uygulamalar olmasıdır. Operatör 4.0 ana boyutunda da en yüksek ağırlığa sahip olan alt kriter I4.0 yatırım olarak görülmektedir. Yatırım planlaması üretim ve yönetim süreçlerinin başlangıcını temsil ettiğinden dolayı, yüksek önem düzeyine sahiptir. Daha sonra sırası ile operatör becerileri, fiziksel ergonomi ve insan kaynakları 4.0 alt kriterleri gelmektedir. Bu üç kriterin ortak noktası ise çalışan konforu ve yetenek yönetimi üzerine yoğunlaşmasıdır. Son olarak bilişsel ergonomi ve organizasyonel ergonomi alt kriterlerinin küresel ağırlıklarının daha az çıkması, işletmenin bu konularda daha yavaş aksiyon almasından kaynaklanmaktadır. Operatör 4.0 boyutu değerlendirilirken çalışanların yetenek gelişimine ve güvenliğine daha fazla ağırlık verilmiştir.

TOPSIS metodunun ilk aşamasında TOPSIS değerlendirme anketi ile elde edilmiş olan sonuçlar analiz edilmiştir. Bu aşamada modelde yer alan dört ana boyut içerisinde yer alan endüstri 4.0 teknolojilerinin teknolojik olgunluk seviyelerinin değerlendirilmesi amacı ile 1-5 arasında puanlamaya sahip anket çalışması yapılmıştır. Dört ana boyutun anket çalışmasına farklı sayıda kişiler katılmış olup bu anketlerdeki değerlerin geometrik ortalaması alınmıştır. Fabrika 4.0 (A1) boyutuna ait anket çalışmasına yedi kişi, lojistik 4.0 (A2)

boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi, yönetim 4.0 (A3) boyutuna ait anket çalışmasına beş kişi ve son olarak operatör 4.0 (A4) boyutuna ait anket çalışmasına 6 kişi katılmıştır. Katılımcıların ankette kullandıkları puanların geometrik ortalamalarının alınması ile dört ana boyut için tablo 6, 7, 8 ve 9'da alt kriterlere ilişkin uzman görüşleri verilmiştir.

Tablo 6. Uzman Görüşleri (A1 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A1.1 Otomasyon	3,54
A1.2 Büyük Veri Analitiği	3,50
A1.3 Bulut Bilişim	4,54
A1.4 Bakım Planlama ve Zamanlama	4,26
A1.5 Karar Destek Sistemleri	3,13
A1.6 Makine Öğrenmesi	3,54
A1.7 Siber Güvenlik	4,13
A1.8 Dijital İkiz	2,12
A1.9 Sürdürülebilirlik	3,54
A1.10 Eklemeli İmalat	2,00
A1.11 Teknoloji Entegrasyonu	3,54
A1.12 Arttırılmış Gerçeklik	2,25
A1.13 Akıllı Ürün	3,39
A1.14 Üretim Yönetim Sistemi	3,39
A1.15 Makineden Makineye	2,38

Tablo 7. Uzman Görüşleri (A2 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A2.1 Veri Görselleştirme	3,81
A2.2 Uçtan Uca Görünürlük	3,46
A2.3 Büyük Veri Analitiği	3,30
A2.4 Yalın Lojistik	3,63
A2.5 Depo ve Depolama	3,30

Tablo 8. Uzman Görüşleri (A3 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A3.1 I4.0 Yönetim Modeli	4,18
A3.2 İş birliği	3,57
A3.3 I4.0 Yatırım	5,00
A3.4 İnovasyon Stratejisi	4,57
A3.5 Organizasyon ve Liderlik	4,18
A3.6 Strateji 4.0	4,37
A3.7 Yalın Üretim Sistemi	3,37

Tablo 9. Uzman Görüşleri (A4 Boyutu Alt Kriterleri)

Alt Kriterler	Değerlendirme Puanları
A4.1 Bilişsel Ergonomi	2,45
A4.2 I4.0 Yatırımı	4,15
A4.3 Operatör Becerileri	3,15
A4.4 Organizasyonel Ergonomi	2,62
A4.5 Fiziksel Ergonomi	3,30
A4.6 İnsan Kaynakları 4.0	3,46

Ağırlıklı uzman görüşlerinin belirlenmesinin ardından, ideal çözüme göre yakınlık katsayılarını hesaplayabilmek için öncelikle pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklıkların hesaplanması gerekmektedir. Üçüncü aşamada alt kriterlerin ağırlıklandırılmış pozitif ideal ve negatif ideal puanlarını belirlemek için pozitif ideal (5) ve negatif ideal (1) puanlar kullanılmıştır. Alt kriterlerin pozitif ideal ve negatif ideal puanlarının belirlenmesinin ardından her bir kriterin pozitif ve negatif ideal puanları ile küresel ağırlıkları çarpılarak, ağırlıklandırılmış pozitif ve negatif ideal puanları hesaplanmıştır. Dört ana boyutun olgunluk seviyesi belirlenmek amacıyla; pozitif ideal çözüme uzaklık (S*) ve negatif ideal çözüme uzaklık (S-) hesaplanmıştır (Tablo 10).

Tablo 10. Alt Kriterlerin Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözümlere Uzaklığı

Ana Kriterler	Pozitif İdeal Çözüme Uzaklık	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık
A1 Fabrika 4.0	0,106	0,176
A2 Lojistik 4.0	0,674	0,761
A3 Yönetim 4.0	0,151	0,705
A4 Operatör 4.0	0,0748	0,123

Pozitif ve negatif çözümlere olan uzaklıkların ölçülmesinden sonra, dört ana boyut için hesaplanan yakınlık katsayıları, yani endüstri 4.0 teknolojik olgunluk seviyeleri hesaplanmış ve Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Seviyeleri

Ana Kriterler	Endüstri 4.0 Teknolojik Olgunluk Seviyesi
A1 Fabrika 4.0	0,624
A2 Lojistik 4.0	0,530
A3 Yönetim 4.0	0,824
A4 Operatör 4.0	0,622

AHP ve TOPSIS metotlarının uygulanması ile elde edilen sonuçlara bakıldığında; dört boyutun olgunluk seviyeleri büyükten küçüğe; yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir. Modelde en yüksek olgunluk seviyesine sahip olan boyutun yönetim 4.0 olduğu

görülmektedir. Yönetim 4.0 aynı zamanda AHP yönteminin uygulanması ile en yüksek ağırlığa sahip olan boyut olarak bulunmuştur. Aynı zamanda yönetim 4.0'ın ilk sırada yer alması işletmedeki dijitalleşme sürecinin gelişimi açısından önemlidir. Yönetimin hem üretime hem de çalışanlara yatırım yapma konusundaki istekliliği ve yol haritasındaki planlı ilerlemesi, endüstri 4.0 sürecinde emin adımlarla ilerlediğini göstermektedir. Fabrika 4.0 boyutu ise; içerisinde çok fazla alt kriter bulundurmasına rağmen bu kriterlerde yer alan teknolojilerin planlı ve istikrarlı bir şekilde uygulanmasına bağlı olarak ikinci sırada yer almaktadır. Lojistik 4.0'ın kapsadığı alt kriterlerin uygulamaya alınabilmesi için fabrika 4.0 teknolojilerinin büyük ölçüde uygulanabiliyor olması gerekmektedir. Dolayısı ile lojistik 4.0 boyutu sıralamada üçüncü sırada yer almakta ve alt kriterlerinde yer alan teknolojilerin uygulanmaya alınması daha fazla zaman gerektirmektedir. Son sırada ise operatör 4.0 boyutu yer almaktadır. Bunun temel sebebinin hızla gelişen teknolojiye çalışanların adaptasyon ve eğitim süreçlerinin daha uzun sürmesi olduğu düşünülmektedir. Dolayısı ile bu açıdan bakıldığında operatör 4.0 geliştirilmeye en fazla ihtiyaç duyulan bölümü oluşturmaktadır.

5. Sonuç ve Öneriler

Çıkan sonuç doğrultusunda dijital dönüşüm için bir yol haritası oluşturulması amacı ile gerçekleştirilmiştir. Modelde kullanılan dört boyut Çınar vd. (2021)'in çalışması ve işletme dinamikleri birlikte değerlendirilerek belirlenmiş olup, fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0 olarak seçilmiştir. Kriterlerin seçim aşamasından önce literatürde yer alan olgunluk modeli çalışmalarında kullanılan ana ve alt kriterler tüm değerlendiriciler tarafından incelenmiş ve modelde yer alacak kriterler işletmenin dinamiklerine ve yönetim süreçlerine uygun olarak seçilmiştir. Modelin değerlendirme yöntemi olarak iki aşamalı bir süreç belirlenmiştir. Literatürde de sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yaklaşımlarının bütünlük kullanımı tercih edilmiştir. Değerlendirme aşamasında kullanılan verilerin toplanması, iki ayrı anket yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle AHP metodu ile ana boyutların ve alt kriterlerin küresel ağırlıkları belirlenmiş, ardından TOPSIS metodu ile dört ana boyutun (fabrika 4.0, lojistik 4.0, yönetim 4.0 ve operatör 4.0) olgunluk seviyeleri hesaplanmıştır. Modelin sonuçları incelendiğinde; en yüksek olgunluk seviyesine sahip boyutlar sırasıyla; yönetim 4.0, fabrika 4.0, lojistik 4.0 ve operatör 4.0 olarak belirlenmiştir. Yönetim 4.0 boyutunun en yüksek olgunluğa sahip olması dijital dönüşüm sürecinde üst yönetimin ve yönetici konumunda çalışan kişilerin süreci sahiplendiğini ve bunun diğer çalışanlar tarafından kavrandığını ifade etmektedir. Sıralamada ikinci olarak yer alan fabrika 4.0 boyutu ise birçok teknolojiyi bünyesinde barındırmakta olup, dijitalleşme faaliyetlerinin en yoğun olarak gerçekleştirildiği alanı temsil etmektedir. İçerdiği alt kriterlerin genel ortalamasına bakıldığında ise endüstri 4.0 teknolojilerinin genellikle pilot çalışma ve üstü seviyede konumlandığı görülmektedir. Olgunluk sıralamasında üçüncü sırada yer alan lojistik 4.0 boyutu ise dijital dönüşüm faaliyetlerinin lojistik departmanında hangi seviyede yürütüldüğünü ifade etmektedir. Lojistik 4.0'ın fabrika 4.0'ın alt sırasında yer almasının sebebi ise lojistik bölümü içerisinde

gerçekleştirilecek olan çalışmaların fabrika içerisindeki çalışmalar ile bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Son olarak operatör 4.0'a bakıldığında olgunluk sıralamasında son sırada yer almaktadır. Bunun sebebi ise önceliğin teknoloji entegrasyonunu sağlamak amacı ile fabrika ve lojistik bölümlerine verilmesidir. Modelin çıktıları, mevcut durumun analizi için iyi bir gösterge oluşturmaktadır. Yapılan çalışmanın; içerdiği dört farklı boyut ve altında yer alan kriterler ile daha sonraki çalışmalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır. Hem endüstri 4.0 teknolojilerinin hem de teorik kriterlerin birleşimi ile oluşturulmuş model literatürde bu kapsamda farklılık yaratmaktadır.

Oluşturulan modelin farklı sektörlerde kullanılmasında kısıtlayıcı etkenler bulunmamaktadır. Modelde bulunan dört ana boyut ve altında bulunan alt kriterler uygulamanın yapılacağı işletmenin dinamiklerine ve dijitalleşme seviyesine göre revize edilebilmektedir. Sonuç olarak geliştirilen modelin farklı işletme dinamikleri özelinde tekrar dizayn edilip uygulanması ile; şirketlere mevcut dijital dönüşüm süreçlerini analiz etme ve gelecekte sahip olmak istedikleri konum ile kıyaslama imkânı sunulmaktadır.

Yazar Katkısı

Bu çalışmada Melike Selen DERMENCİ, bilimsel yazın araştırması, veri toplama ve analiz etme, çalışmanın uygulanması ve makalenin oluşturulması; Aysun SAĞBAŞ, araştırma tasarımı ve uygulanması, makalenin incelenmesi ve oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve yayınlaması ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Teşekkür

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek tez çalışmama katkı sağlayan ve tüm süreç boyunca desteğini ve tecrübesini hiç esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Aysun SAĞBAŞ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynaklar

- [1] Ganzarain, J. & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in sme's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9 (5), 1119-1128.
- [2] Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166.
- [3] Commuzzi, M., & Patel, A. (2016). How organisations leverage big data: A maturity model. *Industrial Management & Data Systems*, 116(8), 1468-1492.
- [4] Häberer, S., Lau L.K., & Behrendt, F. (2017) October 11-13). Development of an industrie 4.0 maturity index for small and medium-sized enterprises. Paper presented at the Seventh International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Saarbrücken, Germany. Erişim adresi: https://www.researchgate.net/publication/320415942_Development_of_an_Industrie_40_Maturity_Index_for_Small_and_Medium-Sized_Enterprises
- [5] Keskin, F.D., İ. Kabasakal, İ., Kaymaz, Y., & Soyuer, H.

- (2019, August 28-30). An assessment model for organizational adoption of industry 4.0 based on multi-criteria decision techniques. Paper presented at the International Symposium for Production Research, Vienna, Austria. Erişim adresi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-92267-6_7
- [6] Akdil, K.Y., Üstündağ, A., & Çevikcan, E., Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy. *industry 4.0: managing the digital transformation*, Switzerland: Springer International Publishing, Switzerland, 61-94, 2018.
- [7] Bibby, L. & Dehe, B. (2018). The management of operations defining and assessing industry 4.0 maturity levels-case of the defence sector. *Production Planning and Control*, 29(12), 1030-1043.
- [8] Kiraz, A., Canpolat, O., Erkan, F.E., & Uygun, Ö. (2019). Impuls kriterleri ile endüstri 4.0 eğiliminin değerlendirilmesi: bir bulanık bilişsel harita uygulaması. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 14-23.
- [9] Santos, R.C., & Martinho, J.L. (2019). An industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023-1043.
- [10] Koyuncu, C., Endüstri 4.0 mevcut durum analizi ve benzetim uygulamalı geçiş metodolojisi, (2019). Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [11] Etkeser, S., Endüstri 4.0'a geçişte olgunluk modeli oluşturulması ve yol haritasının belirlenmesi: türkiye'de kobi'ler üzerine bir çalışma, (2019). Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125.
- [13] Çiray, Ü., Küçük ve orta ölçek imalat firmalarında olgunluk modeli: beyaz eşya sektöründe bir uygulama, (2019). Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Wagire, A.A., Joshi, R., Rathore, A.P.S., & Jain, R. (2020). Development of maturity model for assessing the implementation of industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning & Control*, 32(8), 1-20.
- [15] Rafael, L. D., Jaione, G. E., Cristina, L., & Ibon, S. L. (2020). An industry 4.0 maturity model for machine tool companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 1-18.
- [16] Sarı, T. (2020). Endüstri 4.0 teknolojik olgunluk düzeyinin analitik hiyerarşi prosesi ile modellenmesi: gıda ve içecek imalat sektörü örneği. *BMIJ*, 8(3), 3526-3549.
- [17] Ataman, A., Savunma sanayinde endüstri 4.0 olgunluk parametrelerinin tereddütlü bulanık AHP yöntemi ile önceliklendirilmesi, (2018), Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R.A., Gualtieri, L., Woschank, M., & Matt, D.T. (2020). A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 12(9), 3559.
- [19] Baki, B. & Serdar, D. (2020). Sanayi 4.0 olgunluk modeli uygulamaları üzerine literatür incelemesi. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 11(22), 766-787.
- [20] Tiryaki, E., An impact assessment model for technology development programs, (2020), Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [21] Gökalp, E., Şener, U., & Eren, P.E. (2017, October 4-5). Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-mm. Paper presented at the Seventeenth International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination, Palma de Mallorca, Spain. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.03.004>
- [22] Çınar, M.Z., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A Framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: a case study. *Sustainability*, 13(12), 1-32.
- [23] Oktay, U., Türk savunma sanayisi için endüstri 4.0 olgunluk modeli geliştirilmesi, (2021). Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- [24] Elibal, K., & Özceylan, E. (2022). Comparing industry 4.0 maturity models in the perspective of TQM principles using Fuzzy MCDM methods. *Technological Forecasting & Social Change*, 175, 1-16.
- [25] Proença, D., & Borbinha, J. (2016). Maturity Models for Information Systems- A State of the Art. *Procedia Computer Science*, 100(6),1042-1049.
- [26] Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., Schmitt, K., Schmitz, E., & Schröter, M. (2015). IMPULS- Industrie 4.0- Readiness. 20 Ocak 2022, Erişim adresi: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>
- [27] Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., & Forstnhäusler, S. (2016). SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. *Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 2016 Federated Conference. 1297-1302.
- [28] Akben, İ., & Avşar, İ.İ. (2018). Endüstri 4.0 ve karanlık üretim: genel bir bakış. *Türk Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 26-37.
- [29] Aracıoğlu, B. (2010). Üretim / işlemler yönetimi alanında yaşanan paradigmatik değişimler kapsamında sürdürülebilir üretim. *Ege Akademik Bakış*, 10(1), 141-156.
- [30] Hu, J., & Gao, S. (2019). Research and application of capability maturity model for chinese intelligent manufacturing. *Procedia CIRP*, 83, 794-799.
- [31] Kolla, S., Minoufekar, M., & Plapper, P. (2019). Deriving essential components of lean and industry 4.0 assessment model for manufacturing SMEs. *Procedia CIRP*, 81, 753-758.
- [32] Yalpa, Ö., Endüstri 4.0 ve endüstri 4.0 teknolojilerinin işletme fonksiyonları üzerine olası etkileri, (2020). Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Sosyal

Bilimler Enstitüsü, Osmaniye.

[33] Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & industry 4.0 maturity models: implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214.

[34] Arkan, Ö., Endüstri 4.0 kavramı ve endüstri 4.0 dönüşümünün üretim maliyetlerine etkisi üzerine bir vaka çalışması: bebek bezi üretimi, (2018), Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

[35] Asdecker, B., & Felch, V. (2018). Development of an industry 4.0 maturity model for the delivery process in supply chains. *Journal of Modelling in Management*, 13 (4), 840- 883.

[36] Bağcı, E. (2018). Endüstri 4.0: Yeni üretim tarzını anlamak. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 9(24), 122-146.

[37] Carvalho, N., Chaim, O., Cazarini, E., & Gerolamo, M. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in sustainable manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 21, 671-678.

[38] Pricewaterhouse Coopers. (2016). The Industry 4.0/Digital Operations Self-Assessment. Erişim adresi: [https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-](https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf)

[4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf](https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf)

[39] Pessl, E., Sorko, S.R., & Mayer, B. (2017). Roadmap industry 4.0 – implementation guideline for enterprises. *International Journal of Science, Technology and Society*, 5(6), 193-202.

[40] Durgut, A., Plastik parça imalat sanayinde endüstri 4.0 uygulamaları, (2019), Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli

[41] Pirola, F., Cimini, C., & Pinto, R. (2019). Digital readiness assessment of Italian SMEs: A case-study research. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1045-1083.

[42] Rockwell Automation. (2014). The Connected Enterprise Maturity Model. 15 Haziran 2022, Erişim adresi <http://www.rockwellautomation.com>

[43] Sjödin, D., Vinit, P., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart factory implementation and process innovation. *Research Technology Management*, 61(5), 22-30.

[44] Yüce, G., Dijital dönüşüm ve endüstri 4.0 olgunluk modeli: Türkiye çimento sektörü üzerine bir uygulama, (2020), Doktora Tezi, Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mersin.

Araştırma Makalesi

Treatment Of Oil-Containing Industrial Wastewater In Thin-Layer Oil Traps

Gulnare MİRZE*

Azerbaycan Mimarlık ve İnşaat, Azerbaycan
gulnar.mirze@list.ru

Geliş: 19.11.2023

Kabul: 29.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1392915

Abstract: In this article, oil production facilities and refineries are essentially the facilities where the most chemical processes are carried out and pollution is high. While oil is obtained in these facilities, the pollutants mixed with the water containing the oil are of great importance. While these waters contaminated during the production of petroleum and petroleum products are discharged to the receiving environment through different channels and collectors, this situation can cause serious problems in channels and collectors. Studies are carried out to prevent the pollution in these waters contaminated with oil and its derivatives from damaging the system. It is aimed to reveal the advantages and disadvantages of the newly designed soft layer oil trap, which is different from the previously used ones, by performing experimental studies for the application. The description of the new design of the thin layer oil trap and the results of production tests at different operating flow rates in the inter-plate gap are presented. As a result of the experiments and analytical evaluations, the new system is found to be very successful in oil refining. Its advantages over existing horizontal oil traps are proved. A detailed analysis of available patent materials and information in technical literature shows that it is possible to create a more complete and compact construction of thin mud oil tanks. The facility created by us differs from other similar ones due to its compactness, simplicity of operation and higher cleaning efficiency. The device received invention patents of the Republic of Azerbaijan.

Keywords Hydrocarbons, Industrial plants, Mechanical particles, Oil refinery, Oil trap, Processed water, Thin layer, , Water treatment plant.

İnce Katmanlı Yağ Tuzaklarında Yağ İçeren Endüstriyel Atık Suların Arıtılması

Öz. Bu makale, petrol üretiminin gerçekleştirildiği tesisler ve rafineriler esasen en fazla kimyasal işlemin yapıldığı ve kirliliğin yüksek olduğu tesislerdir. Bu tesislerde petrol elde edilirken, petrolün içerdiği suya karışan kirlilikler büyük önem taşımaktadır. Petrol ve petrol ürünlerinin üretimi sırasında kirlenen bu sular farklı kanal ve kolektörler vasıtasıyla alıcı ortama deşarj edilirken bu durum kanal ve kolektörlerde ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Petrol ve türevleri ile kirlenen bu sulardaki kirliliklerin sisteme zarar vermemesi için çalışmalar yürütülmektedir. Daha önce kullanılanlardan farklı olarak yeni tasarlanan yumuşak tabakalı yağ tutucunun uygulamaya yönelik deneysel çalışmalar yapılarak avantaj ve dezavantajlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır. İnce tabaka yağ tutucunun yeni tasarımının tanımı ve plakalar arası boşlukta farklı çalışma debilerinde üretim testlerinin sonuçları sunulmuştur. Yapılan deneyler ve analitik değerlendirmeler sonucunda yeni sistemin petrol rafinasyonunda oldukça başarılı olduğu ortaya çıkmıştır. Mevcut yatay yağ tutuculara göre avantajları kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Petrol rafinerisi, İşlenmiş su, İnce tabaka, Endüstriyel tesisler, Su arıtma tesisi, Yağ tutucu, Mekanik partiküller, Hidrokarbonlar.

* Corresponding Author

E-mail Address: gulnar.mirze@list.ru (G. Mirza):

1. Introduction

Oil refineries and petrochemical plants are among the most water-intensive industrial plants. In these plants, water is mainly used for cooling production products and process equipment. The water used at such production sites is usually contaminated with oil and petroleum products. In refinery production water, oil products are 3-5 g/l, mechanical impurities are up to 100-500 g/l [1]. To purify water from these impurities, devices called oil traps are used at operating industrial plants. The oil traps used in production are horizontal sedimentation tanks, rectangular in plan, 36 m long, 6 m wide and 2 m deep (at the beginning) to 1.2 m deep (at the end). The capacity of such sedimentation tanks is 198 m³/hour, and the water to be treated must remain in it for 2 hours [2]. Operational experience shows that only 90-95% of oil and oil products are trapped in treated produced water [3]. According to A. V. Ponomarev and other authors [2], the amount of petroleum products in treated water in active oil traps operating at CIS refineries ranges from 50-450 mg/l. However, according to current regulations this amount should not exceed 100 mg/l. In order to improve the purification efficiency of oil traps, improvements are required in their design. From this point of view, it is more appropriate to treat oil-containing production water in oil traps equipped with thin-layer blocks. At present, there are various designs of such oil traps [4], and each of them has one or another shortcoming. The thin-layer oil trap proposed by the authors [5] is superior to others in terms of its purification efficiency and takes up less production space. The distinctive feature of this oil trap is the combined treatment of water in the thin-layered blocks housed in its casing, using the countercurrent and direct-flow principles. The process flowchart of the device is shown in Figure 1.

2. The Purpose of This Study

Azerbaijan is a major oil producer. Serious environmental pollution occurs in oil production areas, wells, oil refineries and other production facilities. It is aimed to separate the mixture of crude oil derivatives, other petroleum ingredients and water in the best possible way without causing environmental pollution and to purify contaminated crude oil wastewater. For this purpose;

It is aimed to reveal the advantages and disadvantages of the newly designed gentle layer grease trap, which is designed differently from the previously used ones, by carrying out experimental studies for application.

2.1. Scope and Hypothesis:

This new design (gentle layer grease trap), with its experimental results for application, is aimed to be directly implemented in many places in the country if these results are advantageous. In the area between the plates of the system and at different flow rates; Efficiency tests were carried out and the system was examined based on collapse and floating.

This study was carried out in the "central laboratory of Neft Union" in the area where crude oil production takes place. The unit is concentrated in thin muddy blocks with high and low currents. The water injection depth in the blocks was 100 mm, the working flow distance between the plates was 1000 mm, the total length was 1880 mm, the width was 200 mm, and the height was 1620 mm. The blocks are placed in 600-grain gold,

which allows the compacted silt to slide continuously along the surface of the racks forming the blocks and remove them to the silt collection zone, eliminating the need for frequent washing. Flowing in several directions lengthens its path and creates conditions for increasing the degree of water purification.

2.2. Hypothesis:

Test samples for analysis were taken from pipes equipped with special valves placed at the entrance and exit of the facility to sterilized glass jars. The analyzes were carried out on the day of sampling. During the study, the amount of oil and oil products in the production water supplied to the water tank was 275-860 mg/l, and the amount of mechanical impurities was 48-150 mg/l.

3. Experimental and Application Studies Conducted

3.1. System and Experimental Application

The treated production water, containing oil, oil products and mechanical mixtures, is fed into trough 2 with pipe 1. As the trough has 20 mm diameter holes arranged in a staggered pattern it ensure even distribution of the treated water over the cross-sectional area of the primary rinsing chamber (3). The water is guided down the chamber and into a thin layered block (4) positioned at an angle of 60° to the horizontal. In this case, the coarse oil and petroleum products separate from the water and float to the surface of the flow, where they are collected and discharged into trough 5. Water, together with relatively low-dispersed oil and petroleum products, enters the channels between the plates of the block.

The distance between the plates in the block is 100 mm. Moving upwards in the channels between the plates, the low-dispersed oil and petroleum products in the water float to the upper shelves and rise in the same direction as the flow, accumulate on the water surface in chamber 6 and then pour out into trough 5. The heavier mechanical particles settle on the surface of the lower shelf, slide in the opposite direction to the flow and accumulate on depression 9. The water enters block 7 and is routed to the bottom of the final rinsing chamber (8). In this case, the low-dispersed oil and petroleum products, separated from the water, are directed against the flow and accumulate on the water surface in chamber 6 and then discharged into trough 5. Heavy mechanical particles settle on the surface of the bottom shelf, slide in the flow direction and accumulate on depression 9. The sludge accumulated in the depressions is periodically removed through pipes 10 and 11. While the water from the block in the final rinsing chamber moves from the bottom upwards, the remaining oil and petroleum product particles are separated and accumulate on the water surface and flow into trough 12 and from there into the separator chamber (13).

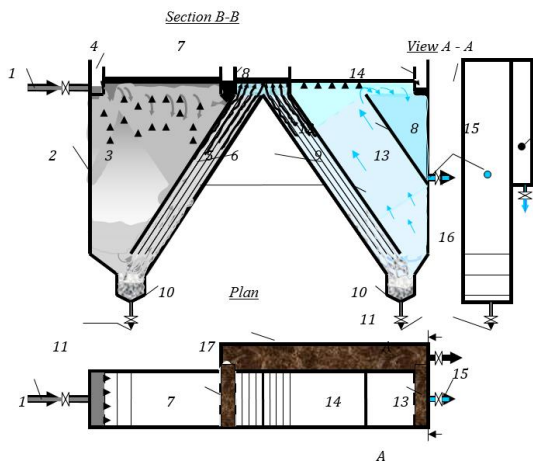


Figure 1. Process flowchart of a thin-layer oil trap.

In order to prevent the separated product from being re-mixed with the treated water in the final rinsing chamber, a baffle (14) is installed parallel to block 7. The treated water is discharged from the device via pipe 15.

The water separated from the oil and petroleum products temporarily accumulated in the separator chamber is removed through pipe 16 located in the lower part of the chamber, and the dewatered oil and petroleum products through pipe 17.

The multi-directional flow reversal in the device lengthens the flow path and increases the efficiency of the water treatment.

The oil droplets in the inter-plate channels are subject to two main forces: hydrodynamic forces tending to remove the droplets from the rinsing area and gravitational forces guiding them towards the upper channel plate. These forces determine the trajectory of the oil droplets in the inter-plate channels.

The threshold hydraulic size of oil droplets trapped in the channels varies with the flow rate and is calculated according to formulae (1) for counter-flow blocks and (2) for straight-flow blocks [7]:

$$u = (v \cdot h) / (L + h \cdot \sin \alpha) \tag{1}$$

$$u = (v \cdot h) / (L - h \cdot \sin \alpha) \tag{2}$$

In the formulas, v is the velocity of the working flow in the inter-plate channels, m/s; h is the vertical distance between the plates, m; L is the channel length, m; α is the angle formed by the channel with the horizon.

The dependence of the hydraulic size of the smallest oil droplets that can be trapped in the device on the flow rate in the channel is shown in Figure 2.

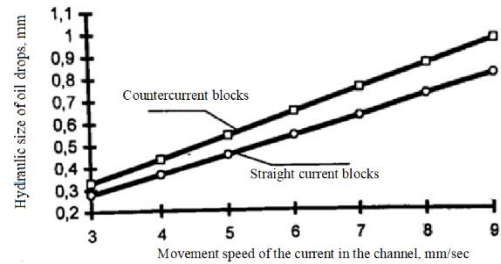


Figure 2. Flow rate in the channel

The graphs in Figure 2 show that oil droplets with a smaller hydraulic size are trapped by straight-flow blocks with parallel plates. The positioning of the two blocks - straight and counter flow - makes it possible to free the water from coarse and fine oil droplets more quickly.

The device was tested at Azerneftiyag Production Union. The studies were conducted at different work flow rates in the space between the block plates.

3.2. Analysis of Experimental Studies

According to analyses conducted by the Union's central laboratory, the amount of oil and petroleum products in the treated production water was 147-374 mg/l, and the amount of mechanical impurities was 133-165 mg/l.

Table 1. Treated water results of thin layerm oil trap

Flow rate in the inter-plate channels, mm/s	Device productivity, l/h	Quantity of mechanical impurities, mg/l			Quantity of hydrocarbons,mg/l		
		At the input	On the output	Average	At the input	On the output	Average
3.0	432	164	25 17	21.0	374	30 18	24.0
		147	26 14	20.0	256	28 19	23.5
		144	24 11	17.5	261	27 30	23.5
		137	19 13	16.0	368	30 17	23.5
4.0	576	135	31 23	27.0	363	30 18	24.0
		133	21 12	16.5	250	24 18	21.0
		141	24 15	19.5	191	20 12	16.0
		143	21 18	19.5	182	27 18	22.5
5.0	720	133	18 12	15.0	171	22 18	20.0
		137	20 16	18.0	189	20 14	17.0
		158	21 13	17.0	147	26 15	20.5
		165	21 10	15.5	197	25 18	21.5

The efficiency of the device was investigated at working flow rates of 3-5 mm/s in the inter-plate channels. For the analysis of the treated water, samples were taken 15 and 30 minutes after the start-up of the device and its complete filling of the working volume. Some of the results obtained are shown in the Table above.

The results in the Table 1 show that the residual concentrations of oil products and mechanical impurities in the samples taken after the first 15 minutes at different concentrations of oil, oil products and mechanical impurities in the water to be treated and at different working flow rates in the channels, do not differ significantly. Residual quantity for oil and petroleum products is 29-40 mg/l, for mechanical impurities is 24-40 mg/l. In the samples taken within the second 15 minutes, the residual quantity of both contaminants is significantly reduced and the optimum mode of operation of the device has been resistance, which is reflected in an increase in purification efficiency and in the thickness of the oil film formed on the flow surface in the channel.

Fig. 3 shows the dependence of the thickness of the oil film

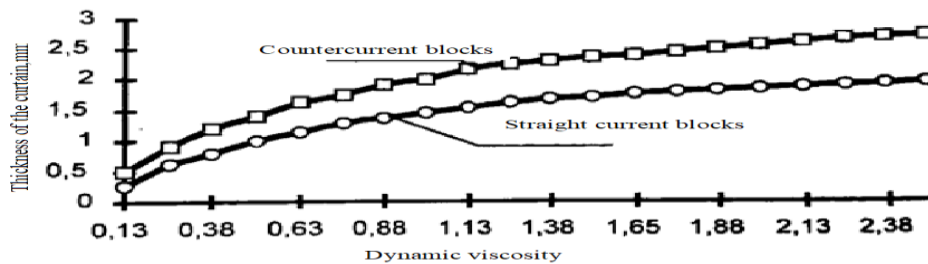


Figure 3. Dependence of the thickness of the oil film water treatment

The productivity of a tested oil trap depends on the number of channels and the width of the block, in addition to the working flow rate in the channels in the blocks. Changing these geometric parameters can give the desired productivity with

established. The residual quantity of the specified contaminants in the samples taken after this period is virtually the same as the residual quantity in the samples taken after 1.5 hours.

A variation in the working flow in the inter-plate space within 3-5 mm/sec has no tangible effect on the efficiency of the water treatment. Changes in water temperature prove to be a more active factor in this process. Thus, after treatment with a water temperature of 16°C and a hydrocarbon content of 144 mg/l, the residual hydrocarbons are 40 mg/l, while at a water temperature of 25°C the residual quantity is reduced to 20 mg/l. This can be explained by the effect of changes in water temperature on water density, i.e. on increasing or decreasing the resistance of oil and petroleum product particles to float to the water surface. An increase in water temperature results in a reduction of the dynamic viscosity coefficient as well as the

formed on the flow surface in channels in blocks on the dynamic viscosity coefficient [7]. The graphs show that the block of both types, placed in the device, is very much involved in water purification.

the same water treatment efficiency. The dependence of the productivity of devices with the number of parallel plates in blocks of 5,10 and 15 units on the width of the device for different flow rates in the channels is shown in Figure 4.

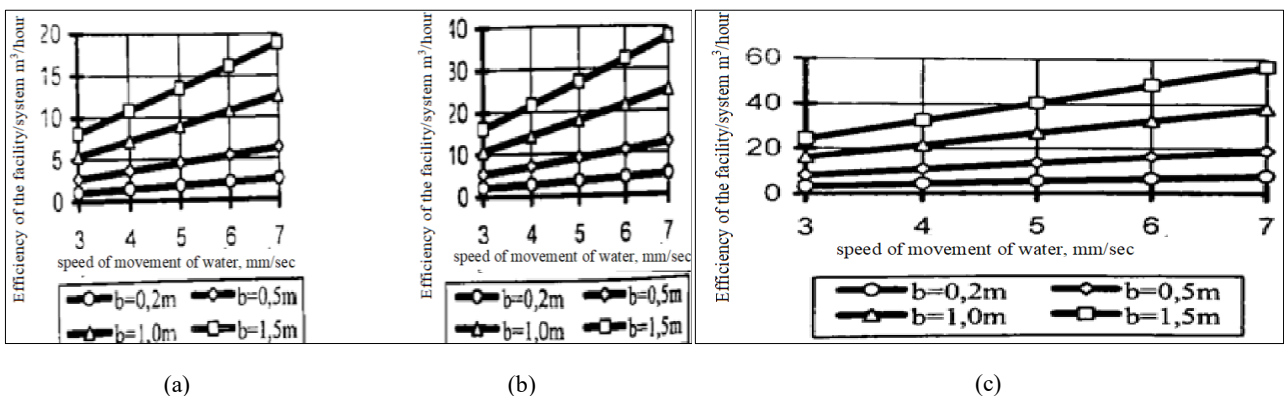


Figure 4. Variation of device productivity with number of channels in the block: a-5, b-10 and c-15 depending on the rate of working flow in the inter-plate channels.

4. Results and Conclusion

The graphs in the Figure 4 show that increasing the number of plates and the channel width from 0.2 m to 1.5 m can increase the productivity of the device by up to 6.5-7.5 times. This possibility is not the final limit. By increasing the number of parallel plates in the block, the capacity can be increased to desired limit.

Increasing the number of channels in the blocks increases the total length of the device by 0.07 - 0.1 m, which is practically negligible in terms of production area occupied.

Compared to existing oil traps, the advantages of the proposed device are that it can be made directly in the production facilities, it is inexpensive, easy to operate, requires no energy or chemical reagent consumption, and has a high purification

efficiency. The device can be applied to purify oil-containing production waters of industrial plants, as well as wastewater generated in oil fields from oil, oil products and mechanical impurities.

Efficiency tests of the new designed grease trap, which is thought to be more efficient and advantageous than the previously designed and used systems (existing horizontal grease traps), were carried out and it was tried to reveal whether the results support our hypothesis. As a result of the experiments and analytical evaluations, it has been revealed that the new system is quite successful in oil refining.

Author Contribution

Formal analysis –Gülnara Mirza Serdar (GMZ); Investigation – GMZ; Experimental Performance – GMZ; Collection GMZ; Processing – GMZ; Literature review – GMZ; Writing – GMZ; Review and editing – GMZ;

Declaration of Competing Interest

The authors declared no conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- [1] Kengerli, A. C., & Mirzayeva, G. S. (2004). A device for cleaning the liquid from oil and petroleum products. Patent of the Republic of Azerbaijan İ №: 0046.
- [2] Mirzayeva, G S., Kangarli, A.C., & Bayramov, Q.I. (2005). A device for cleaning the liquid from oil and petroleum products. Patent of the Republic of Azerbaijan, İ №: 0150, Baku, bulletin №1, pp.50-51.
- [3] Shafizadeh, I.G., & Kurbanov, M.A. (1976). Oil layer changes under an inclined sump plate//Proceedings of the VNII Vodgeo Bakfilial (Baku Branch), 12th c., pp. 41-44.
- [4] Kangarly A.J., Kangarly T.N., & Khalilov A.A. (1999). The clearance problem of Apsheron's surface waters soils and adjoining water area of Caspian sea from the technogen pollution / Proceedings of the Y International Congress on Energy, Environment and Economy, Baku, pp.7-13.
- [5] Tangeau, L. (2001). Rehabilitation of soils contaminated by hydrocarbons in Azerbaijan / Journal Energy Ecology Economy, 2(10): 76-77
- [6] Tangeau L. (2001). Rehabilitation of soils contaminated by hydrocarbons in Azerbaijan / Journal Energy Ecology Economy, Baku, Elturan, 2(10): 77
- [7] Mirzayeva, G. S., Gasanov, A., Yu. Gil. M., & Zhukovska, S.V. (2021). Factors affecting the kinetics of components of industrial waste-based pollutants. Scientific Bulletin of Civil Engineering Scientific bulletin of Civil Engineering. Kharkiv.

Research Article

Usage of an Excel Spreadsheet for a Thermal Endurance Test Report

Rabia Korkmaz Tan^{1,*}, Kaan Önder^{2,*}, Fatih Yerisenoglu^{3,*}, Reşat Mutlu^{4,*}

¹Computer Engineering Department, Çorlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu-Tekirdağ, Türkiye, 59860

^{2,3}Unika Cable, Çerkezköy, Tekirdağ, Türkiye, 59500

⁴Electronics and Communication Engineering Department, Çorlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Çorlu, Tekirdağ, Türkiye, 59860

¹rkorkmaz@nku.edu.tr, ²kaan.onder@unika.com.tr, ³fatih.yerisenoglu@unika.com.tr, ⁴rmutlu@nku.edu.tr

Received: 30.11.2023

Accepted: 26.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1398578

Abstract: Power cables are one of the important parts of electrical power systems. It is important to know the materials that make up the cable or what the life of the cable will be at a given temperature. Therefore, aging tests are performed for the materials used in the cables. One of these tests is the thermal endurance test of the cable. The curve fitting process is performed to the data obtained as a result of this test and the temperature value (the temperature index) corresponding to the 20000-hour life of the cable is found. Automating the process of curve-fitting and finding the temperature index will be useful for companies or research centers that perform this test. Instead of expensive programs such as Matlab or Mathematica, the easy-to-use and accessible Excel program is a very economical and useful solution to evaluate these test results. In this study, the thermal endurance test was briefly described and a spreadsheet was prepared in Excel to evaluate the results of this test. Using the data taken from the measurements made for the EPR material, it has been checked that the spreadsheet works correctly. Such a spreadsheet can be easily used in cable factories to evaluate thermal endurance test results.

Keywords: Thermal Endurance Test, Cables, Curve Fitting, Excel Spreadsheet

Isıl Dayanım Test Raporu İçin Bir Excel Elektronik Tablosunun Kullanımı

Öz- Güç kabloları elektriksel güç sistemlerinin önemli parçalarından birisidir. Kabloyu oluşturan malzemelerin ya da kablunun hangi sıcaklıkta ömrününne olacağına bilinmesi önemlidir. Bundan dolayı kablolarında kullanılan malzemeler için yaşlandırma testleri yapılır. Bu testlerden biri kablunun termal dayanım testidir. Bu test sonucunda elde edilen dataya eğri uydurma işlemi yapılarak kablunun 20000 saatlik ömre karşılık gelen sıcaklık değeri (sıcaklık indeksi) bulunur. Bu eğri uydurma ve sıcaklık indeksini bulma işleminin otomatize edilmesi bu testi yapan firmalar veya araştırma merkezleri için faydalı olacaktır. Matlab veya Mathematica gibi pahalı programlar yerine kullanımı ve erişimi kolay Excel programının bu test sonuçlarını değerlendirmek için kullanımı oldukça ekonomik ve faydalı bir çözümdür. Bu çalışmada termal dayanım testi kısaca anlatılmış ve bu testin sonuçlarını değerlendirmek için Excel’de bir elektronik tablo hazırlanmıştır. EPR malzemesi için yapılan ölçümlerden alınan data kullanılarak programın doğru bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Böyle bir elektronik tablo kablo fabrikalarında termal dayanım sonuçlarını değerlendirmek için kolaylıkla kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler—Isıl Dayanım Testi, Kablolar, Eğri Uydurma, Excel Elektronik Tablosu

1. Introduction

Power cables are commonly used for electrical power transmission [1, 2]. The cable insulations are susceptible to

aging when exposed to the thermal, electrical, environmental, and mechanical stresses experienced under heavy operating conditions [3-5]. The insulation performance of aged cables decreases considerably [6]. That’s why insulation aging is an

*Corresponding author

E-mail address: rmutlu@nku.edu.tr (R. Mutlu)

important issue enough to use the leakage current for its evaluation [7] or radio frequency signals for diagnosis of its location [8]. A review of the aging of extruded dielectric cables is presented in [9]. Aging Models for Electrical Insulation in Power Cables are given in [10, 11]. The aim of the tests is to predict the lifetime of electrical cables operating at elevated temperatures by applying the Arrhenius aging model on thermally aged samples [12]. One of the test properties used for thermal aging tests is the “Elongation at break test” based on two reference standards [13, 14]. The endpoint of the test property can be chosen as 50 % Elongation at break. Arrhenius equation is an exponential function and the least squares method is used to evaluate the test results or to find the parameters of the equation [4, 12]. It is time-consuming to use the least squares method by hand. It is important to automatize such test results. Although programs such as Matlab or Mathematica can be used for the evaluation of the results, they may be expensive for companies in developing countries. Microsoft Excel, part of the Microsoft Office suite, is a popular electronic spreadsheet program that provides a wide range of features for data manipulation, analysis, and visualization. Excel is widely used in business, finance, engineering, education, and many other fields due to its versatility and powerful features. Proficiency in Excel is considered a valuable skill in the workplace. The use of linear algebra in Excel provides various advantages and conveniences, making it a powerful tool for mathematical and analytical tasks. Excel simplifies matrix operations, which form the basis of linear algebra. You can perform matrix multiplication, find the inverse of a matrix, and easily manipulate matrices using built-in functions. Linear algebra is essential for solving systems of linear equations, and Excel provides functions and tools that efficiently solve a system of equations. An Excel spreadsheet is a grid of cells organized into rows and columns, where each cell can contain text, numbers, or formulas. Many engineering and social science problems are solved using writing macros or Excel spreadsheets [15-20]. A power-system analysis has been made with Impedances using spreadsheets [21]. It is shown that a commonly available spreadsheet package is usable to solve a three-dimensional heat flow problem for underground cable rating [22]. To the best of our knowledge, a spreadsheet has not been used to evaluate the aging test results. In this study, an Excel spreadsheet is used to calculate the parameters of the Arrhenius equation using experimental aging data.

The paper is arranged as follows. In the second section, the thermal endurance test is briefly described. In the third section, an Excel spreadsheet is prepared to calculate the parameters of the thermal endurance test. The paper is concluded with the conclusion section.

2. Brief Introduction to Thermal Endurance Test and Calculation of the Temperature Index

2.1 Thermal Endurance Test

The experimental procedure of the thermal endurance test is briefly explained in [12]. The flowchart of the test procedure is given in Figure 1. Some results of thermal endurance tests

performed on samples of EPR (ethylene-propylene rubber) cables are presented in [23, 24]. However, the endpoint of the test property for Extruded EPR Insulation Material is chosen as 50 % Elongation at break in this study. The properties are monitored under standard IEC 60216-2 [12].

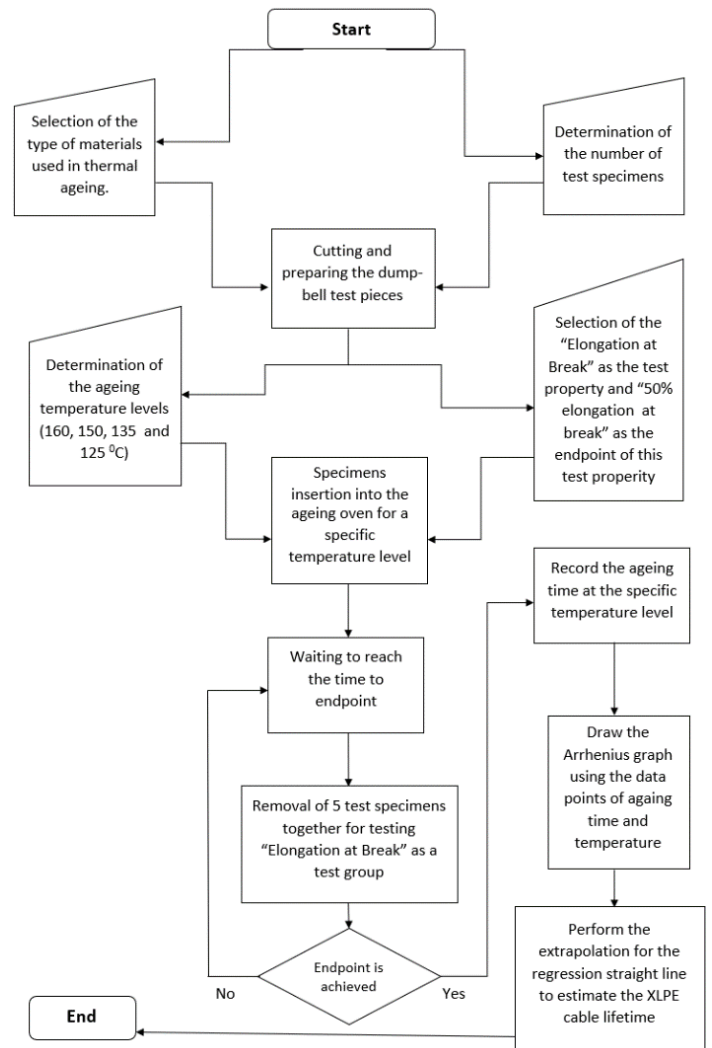


Figure 1. The experimental process flowchart [12].

The exposure temperatures and their duration are chosen according to standard IEC 60216-1 [12]. Dumb-bell test pieces are prepared with dimensions according to Standard IEC 60811-501 as seen in Figure 2 [25].

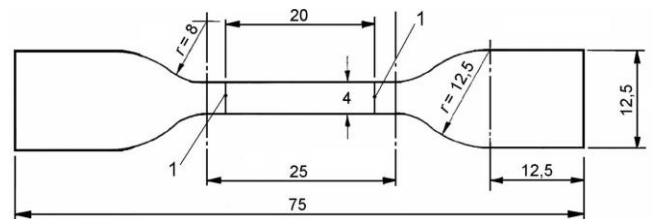


Figure 2. Dimensions of the Dumb-bell test pieces prepared according to Standard IEC 60811-501 [25]

The cutting of the dumb-bell pieces is shown in Figure 3. The prepared samples can be seen in Figure 4.

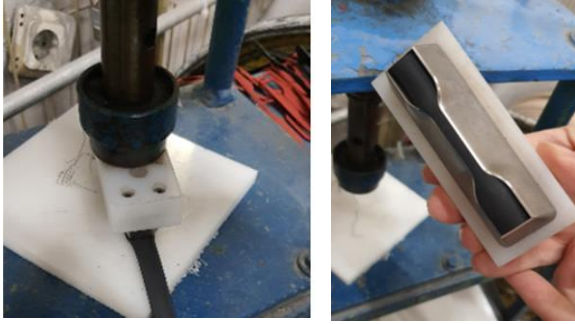


Figure 3. The cutting of the test pieces. **Figure 4.** The pieces cut.

The aging oven is shown in Figure 5. The dumb-bell pieces are inserted and suspended in the aging ovens as shown in Figure 6. At least three different exposure temperatures should be chosen with at least 10 °C intervals between temperatures. After the thermal exposure, a photo of the aged pieces is shown in Figure 7.



Figure 5. The drying oven used for the thermal endurance test



Figure 6. Placing and Suspension of the EPR test pieces inside the ageing oven.



Figure 7. The aged and unaged samples.

Mechanical tensile testing was performed according to international standard IEC 60811-501 [25] at room temperature using a Zwick/Roell Z010 10kN ProLine machine and a photo taken during an elongation at break test is shown in Figure 8. After the test, the broken EPR samples can be seen in Figure 9. The exposure temperatures and the average Time to end-point values for the temperatures obtained with the thermal endurance test to draw the Arrhenius plot are given in Table 1.



Figure 8. The elongation at break test with a Zwick/Roell Z010 10kN ProLine 739384.



Figure 9. A broken dumb-bell test piece after elongation at break test.

Table 1. Test Results

Temperature Exposure	165 °C	140 °C	115 °C
Time to end-point in hours corresponding to an elongation of less than 50%	255	1800	5308
Elongation at break			

2.2 Calculation of the Temperature Index

The thermodynamic variable is the reciprocal of the absolute temperature:

$$x = \frac{1}{273,15+\theta_i} \tag{1}$$

Logarithm of Time to end-point in hours corresponding to an elongation of less than 50% Elongation at break is assumed to be dependent on the thermodynamic variable as

$$\ln(t) = bx + a \tag{2}$$

The parameters of Eq. (2) can be obtained using the least squares method. The tangent and the vertical intercept of Eq. (3), respectively, are given as

$$b = \frac{n_i \sum_{i=1}^{n_i} x_i y_i - (\sum_{i=1}^{n_i} x_i)(\sum_{i=1}^{n_i} y_i)}{n_i \sum_{i=1}^{n_i} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n_i} x_i)^2} \tag{3}$$

and

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^{n_i} y_i) \sum_{i=1}^{n_i} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n_i} x_i) \sum_{i=1}^{n_i} x_i y_i}{n_i \sum_{i=1}^{n_i} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n_i} x_i)^2} \tag{4}$$

The life of the cable is given as

$$t = \exp(bx + a) \tag{5}$$

Temperature index in °C at 20 kilohours (kh) can be calculated by submitting t=20000 h into Equation (2) by finding the temperature:

$$T_i = \frac{b}{\ln(20000)-a} - 273.15 \tag{6}$$

These values given in Table 1 are used to calculate the values of x and y and shown in Table 2. Using Gauss’s least squares method, the temperature index is found as 98.6525 °C with the data given in Table 2.

Table 2. Experimental data used for drawing of Arrhenius plot for the EPR insulator material

Aging Temperature in (°C)	T, Aging Temperature in (°K)	x, The thermodynamic variable Reciprocal of the aging temperature (°K ⁻¹)	Time to end-point in hours (h)	Time to end-pint in days (d)	y=ln(t), the natural logarithm of time to end-point in hours
165	438.15	0.002282323405227	255	36.42857	5.541263
140	413.15	0.002420428415830	1800	257.1428	7.495541
115	388.15	0.002576323586242	5308	758.2857	5308

3. Preparation of the Excel Spreadsheet

In this section, an Excel spreadsheet was created to automate calculations that are difficult and time-consuming to calculate manually. Engineers or researchers who evaluate the cable endurance test results will be able to easily make the necessary calculations using this spreadsheet application. Figures 10 and 11 show the necessary data and the calculation results to calculate the temperature index. Figure 10 shows the appearance of the complete spreadsheet. Figure 11 gives the zoomed sections of the spreadsheet for a better view. Its columns are explained as follows.

Column A is the temperature column (in Centigrade) at which the material is aged. Column B is the life in hours that decreases to 50 percent elongation at the temperature at which the material is aged. In column C, the absolute temperature (in Kelvin) is calculated. The thermodynamic variable, which is the inverse of the absolute temperature, is calculated in column D. Column E contains the logarithm of the life in hours. The values given in column D is squared for use in the formulas of the previous section and given in column F. Similarly, the square of column E is taken and presented in column G. Column I holds the summation of x values, $\sum_{i=1}^{n_i} x_i$, whereas Column J holds the summation of y values, $\sum_{i=1}^{n_i} y_i$. Column L

represents the total number of the calculated points (n_i). The average value of x values has been calculated and recorded in column M, while the average value of y values has been calculated and recorded in column N. Column O contains the sum of x^2 values, $\sum_{i=1}^{n_i} x_i^2$, and similarly, Column P contains the sum of y^2 values, $\sum_{i=1}^{n_i} y_i^2$. Column Q denotes the sum of the products of x and y values, $\sum_{i=1}^{n_i} x_i y_i$. The product of the sum of x and y values, $(\sum_{i=1}^{n_i} x_i)(\sum_{i=1}^{n_i} y_i)$, is calculated in column Q. The products of x and y values is calculated in Column R. Column S contains the result of subtraction of the sum of the x values from the sum of x^2 values times n_i . Similarly, Column T contains the result of subtraction of the square of the sum of y values from the sum of y^2 values times n_i . Column U comprises the result of subtracting the product of the sum of x and the sum of y values from the sum of the product of x and y values times n_i . Columns V and Y contain the calculated regression coefficients, a and b, respectively. Temperature index was calculated in the Z column using the regression formula given in Eq. 6. The life of the cable at the test temperatures is calculated in column AB to draw the Thermal Endurance plot or Arrhenius plot of the tested EPR material in Excel, which is shown in Figures 10 and 12, after the curve-fitting process. The accuracy of the results obtained as a result of testing on different data has been checked by

comparing the results obtained with other mathematical programs and by hand. The time to the end point criteria or the material life decreases with increasing temperature. The thermal endurance line is drawn from the calculated Temperature index (Ti) to the maximum exposed temperature, which was 165 °C in this study.

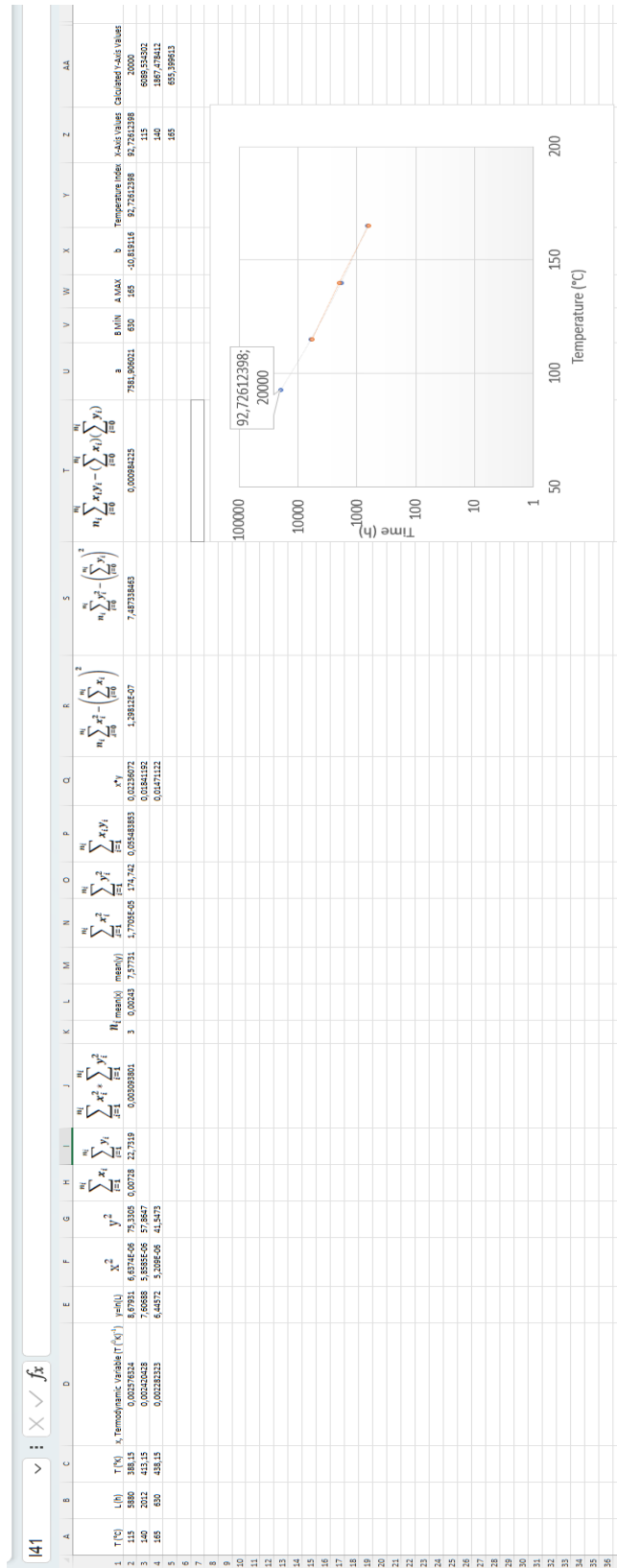
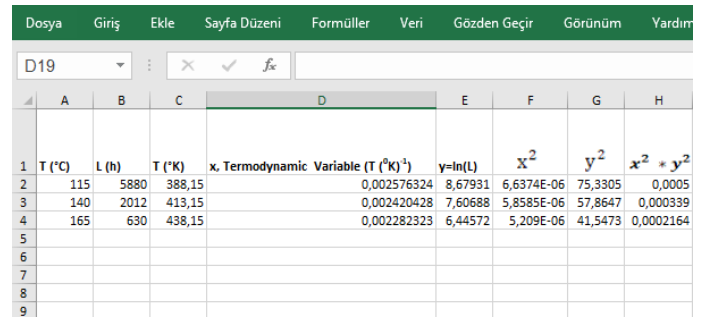
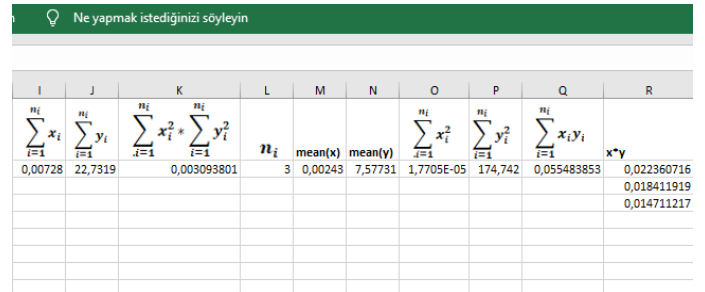


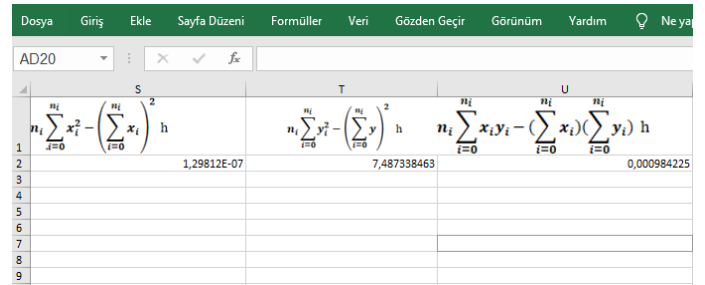
Figure 10. The appearance of the Spreadsheet prepared (Rotated to the left by 90 degrees for space consideration).



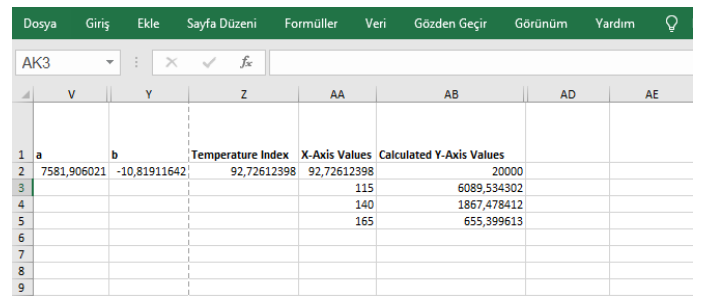
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 11. The zoomed sections (a, b, c, and d) of the prepared Excel Spreadsheet.

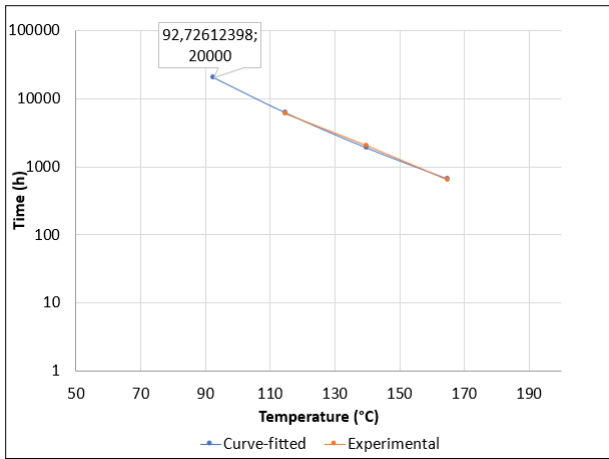


Figure 12. Thermal Endurance plot of the EPR material.

4. Conclusions

Thermal endurance tests are required for the cables made to estimate their life. In this study, the properties monitored in the thermal endurance test are the elongation at break up to an elongation of at least 50% according to IEC 60216-2. The exposure temperatures and their duration are decided according to standard IEC 60216-1. Ethylene propylene rubber is used in the experiments. The parameters of the thermal endurance test are calculated with a curve-fitting method. It takes time to use the least squares method by hand. The process needs to be automatized. In this paper, we have suggested using an Excel spreadsheet as a cheap solution for the automatization of the test results since it is already available in almost every company. Excel's Microsoft Office 365 2023 version has been used in this paper. The user should be careful not to use an earlier Excel version since it can cause unexpected errors. Creating spreadsheets in Excel is a highly flexible and functional process since Excel allows you to organize data, perform calculations, and visualize it with various graphs. This study aimed to swiftly and accurately conduct complex and time-consuming calculations related to a thermal endurance test using Excel spreadsheets. Excel's extensive range of formulas enables the needed calculations between cells, from simple operations like addition, subtraction, multiplication, division to complex mathematical formulas in an efficient way and a short time. The data provided from the thermal endurance test of the cable material examined is entered into the Excel spreadsheet, the necessary calculations is performed, and the thermal endurance plot of the tested material is visualized using graphs. The spreadsheet takes the time to end point criteria and exposure temperature as inputs, performs the curve-fitting, calculates the temperature index for a life of 20000 hours, and gives the plot of the material life versus the operation temperature. The calculations of Excel spreadsheet match well with that of Matlab. Although Matlab plots are more aesthetic, Matlab is unfortunately more expensive than Excel and harder to reach for company engineers. The Excel spreadsheet which is a simple and cost-effective solution for the preparation of the thermal endurance test is made downloadable for the cable companies and the researchers through the link given in [26]. Also, the spreadsheets can be easily used to make a database

for the thermal endurance test results of the insulation materials [27].

Author Contribution

Formal analysis –Reşat Mutlu (RM), Rabia Korkmaz Tan (RKT); Investigation – RM, RKT; Experiments – Kaan Önder (KÖ), Fatih Yerişenoglu (FY), Processing – RKT, RM, KÖ, FY.; Literature review – RM; Writing – RM, RKT; Review and editing – RM, RKT, KÖ, FY;

Declaration of Competing Interest

The authors declared no conflicts of interest concerning the research, authorship, and/or publication of this article.

Acknowledgments

This study has been supported through the project UPN-2206 funded by the research and development center of Ünika Üniversal Kablo Sanayi ve Tic. A.Ş..The authors are also grateful to Metin Yurtsever and Aşın Öztaş for many useful discussions and their contributions.

References

- [1] Moore, G. F. (Ed.), (1997). Electric cables handbook, Blackwell Science, UK.
- [2] Thue, W. A. (2017) (Ed.), "Electrical power cable engineering", CRC Press, Boca Raton.
- [3] Shwehdi, M. H., Morsy, M. A., & Abugurain, A. (2003, October). Thermal aging tests on XLPE and PVC cable insulation materials of Saudi Arabia. In 2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (pp. 176-180). IEEE.
- [4] Muhr, M., Neges, E., Woschitz, R., & Sumereder, C. (2004, October). Aging behaviour of cross-linked polyethylene (XLPE) as an insulating material for high (HV)- and extra-high voltage cables (EHV). In The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004. (pp. 232-236). IEEE.
- [5] Karhan, M., Çakir, M., Arslan, Ö., Issi, F. and Eyüpoğlu, V. XLPE dielektrik malzemelerde elektrik alanının temas açısına ve damlacık şekline etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 36, 01/27 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.700362.
- [6] Uydur, C and Arikan, O. (2022). Dielectric performance analysis of laboratory aged power cable under harmonic voltages, Electrical Engineering, 104, 08/07 2022, doi: 10.1007/s00202-022-01614-4.
- [7] Liu, Y, Wang, H., Zhang, H. and Du, B. (2022). "Thermal Aging Evaluation of XLPE Power Cable by Using Multidimensional Characteristic Analysis of Leakage Current," Polymers, 14(15), 3147. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/15/3147>.
- [8] Li, C., Chu, Z., Zhang, L., Zhang, J. and Tao, J. (2023) Insulation aging diagnosis and defect location of crosslinked polyethylene cable in the distribution network based on radio frequency identification, Materials Express, 13(10), 1772-1781, doi: 10.1166/mex.2023.2513.

- [9] Dang, C., Parpal, J. L., & Crine, J. P. (1996). Electrical aging of extruded dielectric cables: review of existing theories and data. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 3(2), 237-247.
- [10] Choudhary, M., Shafiq, M., Kiitam, I., Hussain, A., Palu, I., & Taklaja, P. (2022). A review of aging models for electrical insulation in power cables. *Energies*, 15(9), 3408.
- [11] İlhan, S., & Özdemir, A. (2014). Elektriksel Yalıtım Sistemlerinde Yaşlanma, Yaşlanma Modelleri ve İstatistiksel Veri Analizi, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2004, Bursa, Türkiye.
- [12] Alghamdi, A. S., & Desuqi, R. K. (2020). A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing. *Heliyon*, 6(1).
- [13] British Standard BS 7870-2. LV and MV Polymeric Insulated Cables for Use by Distribution and Generation Utilities- Part 2: Methods of Tests, 1999.
- [14] British Standard BS EN 60216-1. Electrical Insulating Materials – Thermal Endurance Properties – Part1: Ageing Procedures and Evaluation of Test Results, 2013.
- [15] Posavec, K., Bačani, A., & Nakić, Z. (2006). A visual basic spreadsheet macro for recession curve analysis. *Groundwater*, 44(5), 764-767.
- [16] Newman, S., & Lowenstern, J. B. (2002). VolatileCalc: a silicate melt–H₂O–CO₂ solution model written in Visual Basic for excel. *Computers & Geosciences*, 28(5), 597-604.
- [17] Shikaze, S. G., & Crowe, A. S. (2007). An excel macro for generating trilinear plots. *Groundwater*, 45(1), 106-109.
- [18] Giménez-Forcada, E., & Sánchez San Román, F. J. (2015). An Excel Macro to Plot the HFE-Diagram to Identify Sea Water Intrusion Phases. *Groundwater*, 53(5), 819-824.
- [19] Bancroft, S. L., & Bourret, J. C. (2008). Generating variable and random schedules of reinforcement using Microsoft Excel macros. *Journal of applied behavior analysis*, 41(2), 227-235.
- [20] Oke, S. A. (2004). Spreadsheet applications in engineering education: A review. *International Journal of Engineering Education*, 20(6), 893-901.
- [21] Morley, L. A., & Novak, T. (1990). Impedance-based power-system analysis using a spreadsheet. In *Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1413-1420). IEEE.
- [22] Zhao, H. P., Lyall, J. S., & Ketley, A. D. (2002). A simple procedure for evaluating the effect of short ducts on underground cable rating. *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, 21(3), 259-267.
- [23] Montanari, G. C. (n.d.). Thermal aging of EPR cables. *Proceedings., Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. doi:10.1109/icpadm.1988.38399.
- [24] Blivet, C., Larché, J. F., Israëli, Y., Bussière, P. O., & Gardette, J. L. (2021). Thermal oxidation of cross-linked PE and EPR used as insulation materials: Multi-scale correlation over a wide range of temperatures. *Polymer Testing*, 93, 106913.
- [25] IEC Central Office, International Standard IEC 60811-501. Electric and Optical Fibre Cables – Test Methods for Non-metallic Materials - Part 501: Mechanical Tests – Tests for Determining the Mechanical Properties of Insulating and Sheathing Compounds, 2011.
- [26] <https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YD5EcFhD1aRHUCiDkQWUcgdzI8vbc4YMPVi9IsJH2o/edit?usp=sharing>
- [27] Lebok, F. J. (1982). Thermal endurance data for solid insulating materials. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (1), 53-63.

Research Article

A Variational Problem for the Power Factor in Capacitance Charging Process

Hafız ALİSOY^{1,*} , Gülizar ALİSOY² , Mahir YAŞAR^{1,3} , Selcen ÇALIŞKAN³ , Gizem Büşra GÖK³ ,
Mohammadreza MASOUMISOUREH³ 

¹ Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Corlu Engineering Faculty, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdag, Türkiye, 59860

² Department of Arts and Science, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdag, Türkiye, 59860

³ Technocast Otomotiv San. Tic. A.Ş. Arge Department, Tekirdag, Türkiye, 59500

^{1*} halisoy@nku.edu.tr, ^{2*} e-mail, galisoy@nku.edu.tr, ³ mahir.yasar@technocast.com.tr, ³ selcen.caliskan@technocast.com, ³ gizembusra.gok@technocast.com.tr, reza.masoumi@technocast.com

Received: 12.10.2023

Accepted: 21.11.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1375193

Abstract: In this study, the solution of a variational problem that allows determining the input voltage form that provides the maximum power factor of the battery charging process in the RLC circuit and the change character of the charging current for constant R, L, C and charging time has been examined. The defined problem is obtained and solved in the form of a linear integro-differential equation. A quadratic voltage criterion is proposed to analyze the convergence of the power factor to its maximum value for various modes of charging the battery.

Keywords: Charging efficiency, Maksimum power factor, Variational problem.

Kapasitans Şarj İşleminde Güç Faktörü İçin Varyasyonel Problem

Özet: Bu çalışmada, sabit R, L, C ve şarj süresi için, R L C devresindeki batarya şarj işleminin maksimum güç faktörünü sağlayan giriş voltajı formunu ve şarj akımının değişim karakterini belirlemeye olanak sağlayan bir varyasyonel problemin çözümü incelenmiştir. Tanımlanan problem, lineer bir integro-diferansiyel denklem biçiminde elde edilir ve çözülür. Bataryanın şarj etmenin çeşitli modları için, güç faktörünün maksimum değerine yakınsamasının analizi için ikinci dereceden bir voltaj kriteri önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Maksimum güç faktörü, Şarj verimliliği, Varyasyonel problem

1. Introduction

In connection with the ever-increasing technological applications of capacitive energy storage devices with charge-discharge cycle features, analyzing the power factor of the charging process of devices in these device circuits attracts great attention as important problems. There is a lack of data in the literature about the extremal operating conditions of circuits that provide maximum power factor at non-sinusoidal currents and voltages.

As it is known, battery packs consisting of series or parallel connected cells are generally used as energy storage in BMSs [1,2]. Series connections control voltage, while parallel connections determine current and capacity. The charging of these capacitive energy storage devices is generally provided through either a current limiting resistor or a current limiting inductance, depending on the operating conditions of the device and the place of use [3-6].

This study aims to analyze the solution of a variational problem regarding the determination of the optimal form of the

* Corresponding author

E-mail adress: halisoy@nku.edu.tr (H. Alisoy)

input voltage $U_{in}(t)$ and the change character of the charging current $i(t)$ when charging the capacitive energy storage device C , corresponding to the upper limits of the power factor in an $R - L - C$ circuit. General expressions for power factor are found at optimum $U_{opt}(t)$ voltage and $i_{opt}(t)$ current values for various charging modes. When solving the problem, it is assumed that R, L, C circuit parameters and T charging time are given as initial data

Since a circular wire of radius R_0 has a potential $V > 0$ and a grounded flat ideally conducting electrode has zero potential, the maximum electric field strength on the surface of the cylinder will be achieved at its point P which is closest to the grounded electrode (see Fig. 1)

2. Theory

The charging efficiency is equal to:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2I^2RT}{CU_c^2}} \tag{1}$$

where I - is the effective value of the charging current.

According to (1), with the accepted initial parameters, the efficiency is determined only by the value of the charging current. The problem of finding the maximum efficiency is a variational problem on a conditional extremum and reduces to finding the extremum of some functional.

$$L = \int_0^T i^2(t)dt \tag{2}$$

Provided that the required function $i(t)$ must satisfy the additional condition:

$$\int_0^T i(t)dt = CU_c(T) \neq 0 \tag{3}$$

By using condition (3), as will be shown below, we determine the constant in solving the problem posed, without resorting to the initial conditions.

The formulated isoperimetric problem on a conditional extremum is reduced to the usual problem of the calculus of variations without additional conditions using Euler's theorem [4-8]. Euler's theorem as applied to (2) leads to varying the functional

$$L = \int_0^T [i^2(t) + \theta \cdot i(t)]dt \tag{4}$$

Let us establish the first variation of the functional (4) δL , while considering the extremum condition $\delta L = 0$, which relies on the first lemma of the calculus of variations [7-11] we have:

$$2i + \theta = 0, \quad i = -\frac{\theta}{2} \tag{5}$$

Substituting (5) into (3), we find:

$$\theta = -\frac{2CU_c}{T} \tag{6}$$

The law of change in current when charging a capacitive

storage device in the R-L-C circuit, corresponding to the minimum losses in ohmic resistance

$$i_{opt} = \frac{CU_c}{T} = const \tag{7}$$

On the other hand, if the charging circuit consists of passive RLC elements connected in series, the input voltage will be determined by the following integro-differential equation.

$$U_{in}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \int_0^T i(t)dt \tag{8}$$

and satisfying condition (7a), then we get:

$$U_{in,opt}(t) = \frac{U_c}{T} (RC + t) \tag{9}$$

The efficiency of the charging process with the taken initial data and the optimal charging mode:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2RC}{T}} \tag{10}$$

3. Results and Discussion

Thus, to obtain maximum efficiency when charging a capacitance in the $R - L - C$ circuit (see Figure 1), it is necessary to maintain the charging current constant during the charging cycle (7), and the shape of the input voltage must increase according to a linear law (9)

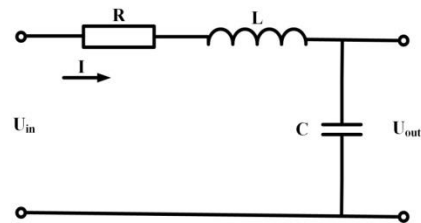


Figure 1. Equivalent charging circuit of series RLC elements

To analyze this case, consider a series-connected RLC circuit. The change in voltage across the capacitor is described by the equation [9].

$$LCU_c'' + RCU_c' + U_c = u \tag{11}$$

and the magnitude of the current in this case is equal to:

$$i(t) = CU_c'(t) \tag{12}$$

taking into account expressions (11) and (12), the functional takes the form:

$$\int_0^T u(t)i(t) dt = C \int_0^T [LCU_c''U_c' + RCU_c'^2 + U_cU_c'] dt \tag{13}$$

The minimum of functional (13) is provided by the function $u(t)$ satisfying the Euler equation, which in this case has the form:

$$U_c''(t) = 0 \tag{14}$$

Considering the law of switching in an electrical circuit, according to which the current value $i(t) = CU_c'(t)$, at the initial moment should be equal to zero. Therefore, Euler's equation (14) must satisfy the conditions:

$$\begin{cases} U_c(0) = 0 \\ U_c(T) = U \\ U_c'(0) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Since the general solution of the second-order equation (14) depends only on two arbitrary constants. Therefore, it is impossible to subject it to the three specified conditions. It follows that if there is inductance in the circuit, it is impossible to change the voltage on the capacitor, giving maximum efficiency

To clarify the physical meaning of the result obtained, let us consider the following law of voltage change on the capacitor:

$$U_c(t) = \frac{U \cdot (\exp(-\alpha t) + \alpha t - 1)}{\exp(-\alpha T) + \alpha T - 1} \quad (16)$$

where α is some parameter. Note that for any value of the parameter $\alpha \neq 0$, conditions (15) are satisfied. Based on this formula, taking into account the values of the parameters included in it, for two different values of α , the calculated values of U_c are shown in the Figure 2.

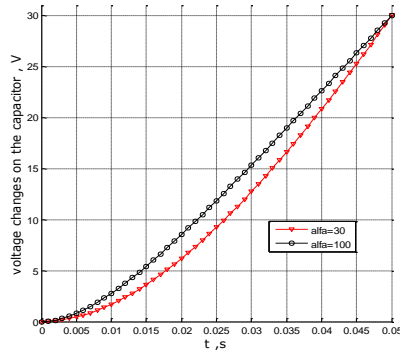


Figure 2. Change in voltage on the capacitor at different values of the alpha parameter

Obviously, function (16) is a solution to equation (11) if its right-hand side is defined as:

$$u(t) = \frac{U \cdot [(LC\alpha^2 - R\alpha + 1)\exp(-\alpha t) + \alpha t + R\alpha - 1]}{\exp(-\alpha T) + \alpha T - 1} \quad (17)$$

As can be seen from figure 2, as the parameter α increases, the function $u_c(t)$ approaches the linear function $U_c(t) \approx \frac{U}{T}t$, satisfying conditions (16).

But with increasing α , the initial value of the function $u(0)$ increases without limit (see Fig. 3), i.e. in the limit as $\alpha \rightarrow \infty$ the initial value of the function $u(0) \rightarrow \infty$. This explains the impossibility of creating a corresponding law for changing the voltage of the current source.

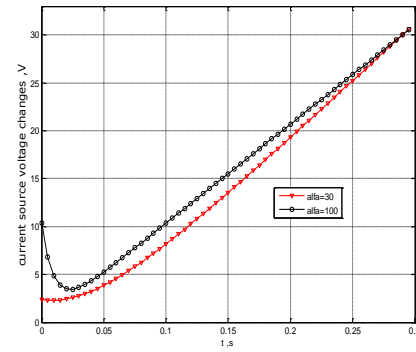


Figure 3. Changes in current source voltage at different values of the alpha parameter

The found solution to the problem is valid for $i_{opt} = const$ at all points, including for $t = 0$. However, under zero initial conditions $i(t)|_{t=0} = 0$, due to the presence of inductance in the charging circuit, the solution to the problem can be obtained only in the class of generalized functions. To determine the input voltage shape that provides maximum efficiency at zero initial conditions, we use the passage to the limit. Let the current be described by the expression:

$$i(t) = i_{opt}(1 - \exp(-\beta t)) \quad (18)$$

In the limit as $\beta \rightarrow \infty$ (18) becomes a singular function

$$i(t) = \begin{cases} i_{opt}, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \quad (19)$$

The input voltage shape corresponding to (19) under condition (8) has the form:

$$U_{in}(t) = \begin{cases} U_{in,opt}, & t > 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases} \quad (20)$$

In the practice of using capacitive storage devices, the law of change in the charging current and the shape of the input voltage are different from the obtained optimal ones (7), (19), (9), (20) and are adjustable. The shape of the input voltage is determined by the rectification circuit adopted, and the shape of the charging current, in addition, depends on the parameters R , L , C and charging modes. It is known [7-11] that if $F(t)$ is a controlled variable, then the integral:

$$\int_0^{\infty} |F(t)|^2 dt$$

It is a so-called quadratic criterion for the quality of regulation. One of the optimization methods in control technology is to give this criterion a minimum value. In our case, to assess the degree of optimization of the capacity charging process in the R-L-C boiler, we have a quadratic criterion for current

$$\gamma^2 = \int_0^T [i(t) - i_{opt}(t)]^2 dt \quad (21)$$

where $i_{opt}(t)$ is the change in current according to (7), $i(t)$ is the law of change in current for one charging cycle in the circuit at a given mode.

For charging modes of capacitor banks, in which the value of the charging current $i_{max}(t)$ is less than the value $i_{opt}(t)$, it is

appropriate to estimate γ using the formula

$$\gamma = \left| CU_c - \int_0^T i(t) dt \right| \quad (22)$$

We analyzed the process of charging the capacitance in the circuit for various forms of input voltage and circuit parameters. Efficiency rating and γ for different modes of charging the capacity was carried out subject to condition (3). Equation (8) was taken as the initial equation, which was replaced during the analysis by a finite-difference equation of the form:

$$i(t_{n+1}) = i(t_n) + \frac{\Delta t}{L} \left[U_{in}(t) - R \cdot i(t_n) - \frac{1}{C} \sum_{k=0}^n i(t_k) \Delta t \right] \quad (23)$$

Based on this formula, the calculated results of the charging current for given parameters are presented in Figure 4.

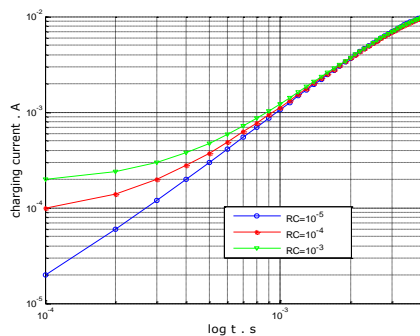


Figure 4. Charging current variation at different RC values

Summarizing the above, we can draw the following conclusions.

4. Conclusions

1. Let's find the optimal charging mode for a capacitive energy storage device in the R-L-C circuit. From the analysis of (7), (19), (9), (20) it is clear that in order to obtain the maximum possible efficiency for given R, L, C, T, U_c , it is necessary to have an initial current $i(t)$ in the circuit $i(t)|_{t=0} = \frac{CU_c}{T}$ and the shape of the input voltage should change according to (9).

2. A quadratic criterion for current has been obtained, which makes it possible to compare different modes of charging the capacity.

Author Contribution

Conceive-G.A.,H.A.; Design-H.A.,M.Y.,S.A; Supervision-HA; Experimental Performance, Data Collection and/or Processing-G.B.,M.M.,H.A; Analysis and/or Interpretation-G.A., H.A; Literature Review-M.Y.,S.A.,G.B.,H.A; Writer-S.A. G.B.; Critical Reviews –G.A., M.M.,H.A.

Declaration of Conflict of Interest

The authors have declared no conflicts of interest.

References

[1] Jiang, C., Wang, S., Wu, B., Fernandez, C., Xiong, X., & Coffie-Ken, J. (2021). A state-of-charge estimation method of the power lithium-ion battery in complex conditions based on

adaptive square root extended Kalman filter. *Energy*, 219, 119603.

[2] Perez, H. E., Hu, X., Dey, S., & Moura, S. J. (2017). Optimal charging of Li-ion batteries with coupled electro-thermal-aging dynamics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (9), 7761-7770.

[3] Pontryagin L.S., Boltianski V., Gamkrelidze R., and Mitchtchenko E. (1962). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, John Wiley and Sons, New York.

[4] Mumford, D. B., & Shah, J. (1989). Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications on pure and applied mathematics*.

[5] Sethi S. P., and Thompson G. L. (2000). *Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics*, Kluwer, Boston, 2nd edition.

[6] Sotskov A.I., Kolesnik G.V. (2002). *Optimal Control: Problems and Solutions*. Moscow, New Econ.School,58 p.

[7] Jost, J.; Li-Jost, X. (2003) *Calculus of Variations*. Cambridge University Press.

[8] Troutman, J. L. (2012). *Variational calculus with elementary convexity*. Springer Science & Business Media.


[9] Alisoy, H. Z., Alisoy, G. T., Keleş, C., Deniz, F. N., Işık, İ., & İçel, Y. (2013). Darbe generatörünün maksimum enerjisi hakkında varyasyonel problem. İnönü Üniversitesi Malatya.TOK.

[10] Clarke F. (2013) *Functional Analysis, Calculus of Variations and Optimal Control*. Springer.

[11] Noton, A. R. M. (2013). *Introduction to variational methods in control engineering*. Elsevier.

Araştırma Makalesi

İstatistik Yöntemleri ve İstatistik Mühendisliğinin Dil ve Edebiyat Araştırmalarında ve Mühendislik Alanında Kullanımına İlişkin Önerilere Bir Bakış

Adnan Mazmanoğlu^{1,*} 

¹ Endüstri Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Toros Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

¹ adnan.mazmanoglu@toros.edu.tr

Geliş: 08.08.2023

Kabul: 25.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1339553

Öz: İstatistikçiler, sundukları yöntem (metodoloji) desteği dolayısıyla diğer bilim dallarına araştırma, planlama, veri toplama ve analiz aşamalarında yardımcı olur. Bu bakımdan bazen değişik disiplinlere ait uygulamalı çalışmalar yapar veya araştırma gruplarında yer alırlar. Çağımız bilimine yön veren ülkelerde durum budur. Bizde de artık aynı yola gidişin işaretleri belirmektedir. Böylece, bir zamanlar çuvallar dolusu fiş yazmak zorunda kalan edebiyatçılarımız, şimdi bilgisayar programları yardımıyla metinler üzerinde indeks çıkarma, kelime sayma, alfabetik sıraya koyma gibi işleri anında yapabileceklerdir. Araştırmacı için bir kâbus olan ve yıllar alan bu mekanik işlemler artık birkaç dakika içinde çözülmekte, insan zekâsı asli görevi olan düşünme faaliyeti için serbest kalmaktadır. Öte yandan, saniyede bir milyarları bulan işlem hızıyla bilgisayarlar, kâğıt kalemle asla yapılamayacak veya yıllar alacak hesapları hatasız şekilde sonuçlandırarak, dağınık ve karmaşık bilgi yığınlarından (bilhassa büyük veri~ big data) mantıklı teorilere yol açacak ana fikirlerin süzülmesini sağlamaktadır. 19.yüzyıldan bu yana istatistik analiz yöntemleriyle dil ve edebiyat üzerinde çalışmalara ve istatistik mühendisliği sayesinde mühendisliğin her alanında veri olan her yerde yer verilerek hangi amaçla yapıldığı ve sağlanan yararlar üzerinde örneklerle durulmuştur. Bilhassa istatistiğin ve istatistik mühendisliğinin diğer kullanım olanakları üzerine öneriler verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Entropi, İstatistik Mühendisliği, İstatistik Yöntemi, Metin Karakteristiği

A Survey of the Proposals for the Use of Statistical Methods and Statistical Engineering in Language and Literature Studies and Engineering

Abstract: Statisticians assist other disciplines in research, planning, data collection and analysis stages due to the methodological support they offer. In this respect, they sometimes carry out applied studies from different disciplines or take part in research groups. This is the situation in the countries that direct the science of our age. There are signs of going the same way for us now. Thus, our literati, who once had to write sacks full of receipts, will now be able to instantly perform tasks such as indexing the texts, counting words, and putting them in alphabetical order with the help of computer programs. These mechanical processes, which are a nightmare for the researcher and take years, are now solved in a few minutes, and the human mind is freed for its main task, the thinking activity. On the other hand, with a processing speed of up to one billion per second, computers allow to filter out the main ideas that will lead to logical theories from messy and complex piles of information (especially big data) by concluding calculations that could never be done with pen and paper or take years. Since the 19th century, studies on language and literature with statistical analysis methods and statistical engineering have been included in every field of engineering, where data is available, for what purpose it is done and the benefits it provides are emphasized with examples. In particular, recommendations are given on other uses of statistics and statistical engineering.

Keywords: Entropy, Statistical Engineering, Statistic Methods, Word characteristic

*Sorumlu yazar

E-mail Adress: adnan. mazmanoglu@toros.edu.tr (A. Mazmanoğlu)

1. Giriş

Önce sosyal bilim konularından örneğin Türk Dili ve Edebiyatı'nda zaman zaman istatistik dergilerde bu yönde yapılmış yayınlara rastlanmaktaydı. Türk Dili ve Edebiyatı'nda bu çalışmaların yapılmaması için hiçbir sebep yoktu. İlk olarak, 1973 yılında Türk Roman'ındaki Batı kaynaklı kelimeler üzerinde bir çalışma başlatıldı. Bu arada, çeşitli metinlerde kelime uzunluklarını ele alan bir araştırma 1979 III. Milletler Arası Türkoloji Kongresi'nde bir bildiri halinde sunuldu. Bunu 1982 ve 1985 kongreleri takip etti. 1982 bildirisinde, romanımızdaki batı kaynaklı kelimelerin zaman içinde gittikçe yoğunluk kazandığı rakamlarla ispat edilmekte, dil ve kültürümüzde batılılaşmanın yarattığı kutuplaşmalar ilmi metotlarla ortaya konmaktaydı. Bu bildirinin sunulmasından sonra dinleyicilerden gelen sorular ve yapılan tartışmalar üzerine bir açıklama yapılması gerekli oldu. "İstatistik ve Edebiyat" başlıklı bu uzunca makalenin ancak bir kısmı 1983 yılında Türk Edebiyatı dergisinde yayımlandı. Daha sonra, 1984 Yazarlar Birliği Yıllığı'na da alınan bu makalenin tamamı ilk olarak bu kitapta yer almaktadır. 1985 Türkoloji Kongresi'nde sunulan "Dil ve Edebiyatta Ölçülebilir Özellikler" başlıklı bildiri, edebiyatçılarımız için niceleyici çalışmalarda yol gösterici olabilir.

2. Dil ve Edebiyatıta Ölçülebilirlik

2.1. Çağdaş Anlamda İstatistik

Çağdaş anlamda istatistik, doğal olaylara dayanan ve gözlemlenilen verilerin bilimsel yöntemlerle incelenmesi ve doğru sonuç çıkarılmasıdır. Genel olarak; gözlemlenilen verileri düzenleme, analiz etme ve bunlardan sonuç çıkarma sanatı ve bilimi olarak istatistik ortaya çıkar. Sayısal bilgiden anlam çıkarma, belirsizliğin ele alınması, örneklemenin önemi, tahmin yapma ve karar verme bağlantılarını geliştirmek için özellikle rastgele deney ve gözlemlere dayalı bilimsel ve işlevsel bağlantıları kullanmak çok önemlidir. Zira veri gruplarının düzenlenmesi, tanımlanması, sunulması ve grafiklerle, listelerle, tablolarla ifadesi bu becerilerin kazanılması çağdaş istatistikçinin yeni istatistik mesleklerinden "veri bilimcisi" donanımını elde etmek için olmazsa olmaz becerilerdir [1].

İstatistik yöntemleri edebiyatta diğer yorum şekillerinin yanında onlarla aynı değerde ve aynı düzeyde değil, metinlerin şekil özelliklerini betimleyen yardımcı unsurlardır. Hatta istatistik yöntemlerinin teolojide (manevi bilimlerde) kullanılması, bugün bile hala büyük bir şüphe ile karşılanmaktadır. Üniversitelerin araştırma ve bilgi değerlendirme merkezlerinde istatistik sonuçlarının gösterdiği gibi sosyologlar, psikologlar ve dilbilimciler, istatistiği uzun zamandan beri kullanmaktadırlar [2].

İstatistiksel edebiyat analizlerinin asıl problemi, onun yayıldığı alandır. İstatistik açısından elde edilen sonuçlar ile bir metnin anlamı içeriği ve eserin istatistik değeri arasında benzerlikler var mıdır? Dış görünüş özelliklerini anlam biliminde de etkili olması, onların anlam bilim ölçülere uyması mümkündür. Yeterli sayıda eser açısından bunu belgeleyebilen araştırmalar ise şimdiye kadar var olmamıştır. İstatistik

verilerin değerlendirmede, bu veriler arasında bir ilişki, bir bağlantı kurmak daha da zordur. İstatistik yönünden geleneksel ve öznel (sübjektif) olarak elde edilen bilgilerden daha doğru ve estetik problemler için büyük önemi olan tek ölçü olarak bir eserin tekdüze (homojen) oluşu anımsanabilir [2].

Jonathan Swift, 1725 yılında "Julver'in Seyahatleri"inde Laputan dilinin genel kelime kaynağını içeren ve bunun yardımıyla bu konudaki tüm hesaplamaları verebilen bir makineyi tasvir eder, "ayrıca nesnelere, fiillerin, isimlerin ve diğer cümle öğelerinin sayısı arasında kitaplardaki ilişkiler de verilmektedir" [2]. Jonathan Swift, burada kendi çağının bilimini uğraşı terapisi hatta dil bilimcileri de hece sayıcıları olarak hicveder.

Dildeki gelişmelerin betimlenmesinde kullanılan sayısal analiz yöntemleri, ciddi şekilde 19. Yüzyılın ortalarında denenmiştir. Fakat istatistiksel dil analizleri, ancak bilgisayarlardaki bellek kapasitesinin daha büyük hacimli veri değerlendirme etkilerinin hazırlanmasından yakın zamanda kolay ve hızlı bir şekilde önem kazanmıştır.

İçinde bulunduğumuz 20. yüzyılın ancak altmışlı – yetmişli yıllarından bu yana bir eserin veya bir edebi türün şekil özellikleri ve kullanılan kelimeler hakkındaki varsayımlar ~ iddialar ~ hipotezler, istatistik konulu metinler tarafından doğru olarak test edilip denetlendikten sonra ret veya kabul edilebilmeye başlanmıştır. Manon MAREN – Grisebach'ın yazdığı Edebiyat Bilimi'nin Yöntemleri kitabında (Türkçe 'ye çeviren Dr. Arif Ünal) öğrendiğimize göre 1852 yılında E. Förstermann'ın Almanca 'da, Latince 'de ve Yunanca 'da Sayısal Dil İlişkileri (münasebetleri)" adlı eseri yayımlanmıştır. Bu biçimdeki çalışmalar, 1890'lı yıllarda P. Valerio ve F. W. Käding tarafından devam ettirilmiştir.

Yeni çalışmaların öncüleri olarak E. ve K. Zwirner'in değişik dillerdeki ses ilişkileri hakkındaki çalışmaları ve G. K. Zipf'in, "dil'in Fizyolojisi" adlı eseri sayılabilir. Zipf, ilk önce bir metnin kelime hazinesindeki bir kelime ile çok kullanılan kelimeler sözlüğündeki bu kelimenin önceliğinin (r) sık sık kullanılışı arasındaki ilişkiye (yani istatistiksel anlamda korelasyona) işaret etmiştir. Ayrıca tekrarlanma sayısının ölçüsünü bulan frekans dağılımı ile burada geçen sözlükte en sık geçen kelime r1, en sık geçen kelime r2 vb. ile gösterilerek cümle uzunluğu hakkında en geniş bilgiyi ilk önce G. U. Yule ve C. B. Williams vermişlerdir [3].

2.2. Metin Karakteristikleri

Edebi eserlerin metin karakteristiğinin saptanması, ilk önce Achen'li fizikçi Wilhelm Fucks tarafından yapılmıştır [4]. Fucks, harfler, heceler, cümleler, bunların özellikleri ve birbirleriyle ilişkisi gibi şeylerden oluşan bir metnin unsurlarını betimlemektir. İstatistiksel bir metnin analizinin amacı, bir metnin dış görünüşü hakkındaki fikirlere. Gerekli bir tanımlamanın (description) amacı olarak bu işlemler yalnız, ağırlık noktası dış görünüş yönünden bulunan metinlerde söz konusu olmaktadır. Bu tür eserlerin genel edebiyata katkıları ölçüsünde istatistiksel inceleme yöntemi önem kazanır. 20. Yüzyılın başından beri bu alanda bir artış olduğu; (1) bilgisayar sistemlerinin bellek ve işlem hızının çok yüksek

düzye de olması, (2) bu gelişmeye paralel olarak istatistik bilimindeki analiz yöntemlerinin her veriye uygun olarak geliştirilmesi ve yazılımlarının hazırlanmasından dolayı tartışılmaz. Bu konuda Manon MAREN – Grisebach’ın bize ulaştırdığı çok örnek olmakla birlikte bazılarını sizlerle paylaşalım [2]. Christian Morgenstern [6]’in metinleri, bilhassa August Stramm’ın [7] ve Dadaistler’in çalışmaları [8] ve İngiliz Edebiyatı çerçevesinde E. E. Gumming [9] ve Getrude Stein’in [10] çalışmalarından söz edilebilir. Helmut Heissenbuttel [11] ve Fransız Cumhuriyetçi yazarların çalışmaları, günümüz edebiyatından örnekler sunar. Edebiyatın yaygın yorum yöntemleri çerçevesindeki sık sık bir analizle anlaşılacak metinlerle karşılaşırız. Örneğin Wilhelm Fucks [4], metnin hecelerinden anlaşılan özel biçim özelliklerini araştırır: Her kelimedeki orta hece sayısı ve bundan hesaplanan ve “Metin Entropisi ~ incelenen metnin unsurlarının düzen derecesini verir”. Diğer metin karakteristikleri (hecelerde), orta cümle uzunlukları ve bir metindeki aynı hece sayısının kelime zincirinin orta uzunluğudur. İstatistiksel incelemeler, ayrıca metrik analizlerini de vermektedir.

2.3. Entropi

Bir sistemdeki belirsizliğin ölçüsüne “entropi” adı verilir. S bir kaynak olsun. Bu kaynağın $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ olmak üzere n mesaj (ileti) üretilebildiğini varsayalım. Tüm mesajlar birbirinden bağımsız olarak üretilmektedir ve m_i mesajlarının üretilme olasılıkları p_i ’dir. $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ olasılık dağılımına sahip mesajları ~ metinleri üreten S kaynağının entropisi $H(S)$ şu şekildedir [12]:

$$H(S) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (1)$$

Örneğin sekiz kişinin bir soruya verdiği yanıtlar S kümesindeki gibi olsun.

$S = \{\text{evet, evet, hayır, hayır, hayır, hayır, hayır, hayır}\}$

Olasılıklar, iki adet “evet” değeri için,

$$p_1 = 2/8 = 0,25 \quad (2)$$

diğer altı adet “hayır” değeri için,

$$p_2 = 6/8 = 0,75 \quad (3)$$

hesaplanır. O halde $P = (p_1, p_2) = (0,25, 0,75)$ yazılır ve bu değerlere bağlı olarak S için toplam entropi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$H(S) = -[p_1 \log_2(p_1) + p_2 \log_2(p_2)] \quad (4)$$

$$= -[0,25 \log_2(0,25) + 0,75 \log_2(0,75)]$$

$$= 0,81128 \approx \%81$$

Yani S kümesine hangi yanıt geleceğinin belirsizlik ölçüsü %81 bulunmuştur denir. Bir bilgi sisteminin toplam enformasyon (bilgi ~ malumat) potansiyeline, Shannon, o sistemin “entropisi” adını vermiştir. Hatta metin çözümlemede daha çok termodinamikten alınan bu terimi ise kendisine büyük matematikçi ve bilişim kuramcısı John Von Neumann ısrarla önermiş ve “Entropinin ne olduğunu kimseler anlamaz, böylece sen de enformasyon kuramını anlatırken, hem ne

kadar derinmiş diye düşünürler, hem de söyleyecek pek bir şey bulamaz” demiştir. Bazı uzmanlar, Claude Shannon’un enformasyona etkisini, alfabenin mucidinin edebiyata etkisine benzetecek kadar önemli bulmaktadırlar. Hatta günümüzde kompakt disklerden süper bilgisayarlara, internetten uzay araçlarına kadar, sayısal bilgiyi saklayan, işleyen ve ileten tüm sistemlerin temelleri Shannon’un enformasyon kuramına dayanmaktadır. Şimdi yine metin entropisine uygun yapılan araştırmalardan söz etmeye çalışalım [13].

Hecelerdeki orta cümle uzunlukları için birkaç örnek verelim: Rilke’nin “Cornet” i 12.5, Goethe’nin İtalya Seyahati 38.8, Marx’ın “Kapital”i 65.4 ve Bild Gazetesinin 1968 yılı Nisan ayındaki birkaç makale 20.5.

Farklı türlerin ve farklı yazarların metinlerinin incelenmesi, metin benzetmelerinin saptanmasının sonuçlarındaki rastgele farklılıklardan kurtulmak için yaklaşık 300-400 kelime uzunluğunda bir metnin yeterli olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bu metnin farklı kısımlarının değerler dağılımı, dış şekil birliği için bir ölçü verir. Sayımların kesin sonucu, bir eserin bölümlerindeki özellikler açısından benzerliklerin ve farklılıkların saptanmasıdır. Bunun da yazarın diğer eserlerinin ve diğer yazarların eserlerinin özellikleri karşılaştırılarak yapılan çalışmalarda değer “sapma (Standard deviation)” larıyla bağlantısı vardır. Örneğin bir nesir metninde ortalama hece sayısı için değerlerin sapmasında her kelime için 0.01 – 0.02 normal karşılanmıştır. Bölümdeki sapmalarda dağılımdan bağımsız olarak genellikle tüm metnin ortalama değerinden kelime başına 0.2 hecelik bir sapma ortaya çıkar. Fucks, istatistiksel çalışmaların temelinde doğal dillerdeki kelime oluşturma teorisi ile matematiksel bir dil biçim teorisi geliştirmiştir.

2.4. İstatistiğin Diğer Kullanım Olanakları

İstatistiksel incelemeler, bir edebi türdeki metinlerin dış görünüşündeki ince farklılıkları göstermeye, şimdiye kadarki analizlerden çıkan yapı özelliklerini ispat etmeye, bir çağın (devrin) şekil özelliklerine uygun olarak bir eserin durumunu aydınlatmaya ve şekildeki gelişmelerin çizgisini belirlemeye ve tercüme hakkında bir karar varırken bazı kriterler saptamaya uygun görünmektedir.

Örneğin, verilerin kümeleneşmesi, analizi, nesneleri şiir, nesir vb. metinlerde birbirine olan benzerliklerine göre gruplarına ayırmak demektir. Elde bulunan veriler incelenerek birbirine benzeyenler bir kümeye, benzemeyenler ise başka bir kümeye toplanır. Verilerin kümeleme analizine göre modellenmesinde matematik, istatistik, bilgisayarlı makine öğrenimi ve yapay zekâ gibi birçok alandan yararlanır. Bilhassa bu yöntemle ve benzer istatistik analiz yöntemlerle dil ve edebiyatta, Türkçe nesirlerde ve aruz vezninde kullanılan kelime uzunluklarından Türk romanındaki Batı kaynaklı kelimelere ve buradan hareketle yazarlarımızın sınıflandırma (kümeleme) denemesine kadar çalışmalar yapılabilir. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşması hem hız hem de bilgi saklama kapasitelerinin artması, bilgisayar kullanımı ile bilgiye ulaşma ve onu işleme aşamasında bilim adamlarının önüne araştırma yapmak için sonsuz hedefler açmaktadır.

Oysa bilgisayarlar bilhassa metinler üzerinde indeks (fihrist) çıkarma, kelime sayma, düzeltme, sıralama, saklama, sorgulama vb. gibi işlemleri çok kısa bir (saniyeler

mertebesinde) zaman içinde çözümleyebilmektedirler. Bu açıklamaya ek olarak bilhassa istatistik 20 yüzyıldan itibaren geçirdiği yüksek gelişim, ortaya koyduğu veriye, konuya vb. uygun ölçme ve değerlendirme teknikleriyle edebiyat araştırmalarına yeni boyutlar katarak, onları zenginleştiriyor [14]. Biz istatistikçiler olarak bu çalışmada sunacağımız metodolojik destekle yani veri toplama ve analiz aşamasında dil ve edebiyata yardımcı olmaya çalışacağız. Çağımız bilimine yön veren söz sahibi ülkelerde durum böyledir. İstatistiksel edebiyat analizlerinin asıl problemi, onun yayıldığı alandır. Son yıllarda bir istatistik sistemi olarak "istatistik mühendisliği" kavramının ortaya çıkması, istatistiksel düşünme yoluyla bilim ve istatistik teorisi kullanılarak oluşturulan bu yeni istatistik disiplini sayesinde internetteki bilgi ve veri yoğunluğunun ve bunları depolayan makinelerin de eklendiği veri okyanuslarının doğru, analiz yapabilme gücü ancak aşılabilecektir. Büyük Veri (Big data) nın çok büyük miktarda bilgiyi öğretmek, onu anlak olarak analiz etmek ve kimi zaman ondan enteresan sonuçlar çıkarmak için yeni bulunmuş, yeni ortaya çıkan bir yaklaşım olduğunu söyleyebiliriz. Bu da istatistik analiz tekniklerinin ciddi olarak eğitiminin alınmasını gerekli kılmıştır.

3. Dil ve Edebiyatta İstatistik

İlk bakışta sanat ve edebiyatla istatistik ve bilgisayar arasında hiçbir ilgi yokmuş gibi gelebilir. Bazılarına göre sanat sadece hissedilebilir. Çünkü zevkler ve renkler tartışılmaz. Matematik ve buna dayalı, müspet ilimler ise aklın eseri olup objektiftirler. Kesin ispatlara dayanırlar. Sanatla ilmin malzemesi, yöntem ve ürünü tamamen birbirinden farklıdır. Dolayısıyla herkes kendi yoluna gitmelidir. Şair kelimeleriyle uğraşsın, mısralarını yontsun, cılasın. Matematikçi de formüller türetsin, denklemler kursun.

Çoğunluğun desteklediği bu düşünce tarzı ilk bakışta çekici görünmekte ise de esaslı bir temelden yoksundur. Duygu ve düşünceler arasında duvar örülemez. Güzellik içten içe bir ölçüye dayandığı gibi, dikkatle incelenirse matematik ve hendese (mühendislik) ruhunun da vardığı nokta estetik bir değer taşır. Aslında günümüzde her alanda kaydedilen baş döndürücü gelişmeler, birçok ilim ve sanat adamını dar sahalara içine hapsedmiştir. Daha XVIII. ve hatta XIX. asırda iyi eğitilmiş bir kişi, zamanın tüm bilimlerini bilme imkânına sahipti. Bin yedi yüzlü yıllarda bir bilim adamı aynı zamanda bir filozof veya sanatçıydı. Yalnız bilgi değil, irfan ve hikmet sahibiydi. Astronomi, matematik, fizik, tıp, dilbilim, din, sanat, felsefe, müzik ve mimari hakkında zamanının bütün bilgilerine vakıf olabilirdi. Bu durum, Doğu ve Batı bilginlerinin ortak vasfıydı. Zamanımızın sanatçı ve bilim adamı neden böyle değil? Sorunun cevabı gayet açıktır: Hafıza, zekâ ve zaman bakımından sınırlı olan insan, değil bütün bilim ve sanat dallarında, tek bir dalın ince ayrıntısında dahi mevcut bilgilerin tamamını öğrenmekten aciz hale gelmiştir. Çeşitli dallardaki bilimsel gelişmeleri ele alan araştırmacılar, bunların zaman içinde üslû bir fonksiyon şeklinde arttığını ortaya koymuşlardır. Bilimdeki yenilikler her on yılda bir katlanmaktadır. Bu demektir ki, 1940 yılında kendi uzmanlık alanındaki bütün bilgilere sahip olan bir bilgin, 1950'deki bilgilerin ancak yarısına, 1960 dakilerin dörtte birine sahiptir. 1990 dakilerle kıyaslandığında, onun bildikleri otuz ikide bire düşmüş demektir. Bundan ötürüdür ki bir

yandan sürekli olarak yeni ilim dalları ortaya çıkmakta ve alt dallar oluşmaktadır. Gün geçmiyor ki insanlığı hayretler içinde bırakan yeni bir buluştan söz edilmesin. Henüz teknolojiye aktarılmayan bilgileri ise kütüphane rafları bile artık çekememektedir. 1970 li yıllarda İngiltere Patent Dairesi kütüphanesinde yer alan yazı ve dergilerde 320000 konu başlığının bulunduğu düşünülürse, birbirinden habersiz olarak ilmin derin dehlizlerinde yol alan milyonlarca araştırmacının, yaptıkları buluşlarla ortaya koydukları mevcut ilim birikimi karşısında her feridin cahillik derecesini gün geçtikçe derinleştirdikleri ortaya çıkar. Gelmiş geçmiş bütün ilim adamlarının %90 ı halen hayatta olmakla beraber, bu kişiler birbirinin alanından uzak ve habersizdirler [14].

İstatistik ise yüzyılımızın başından itibaren yaptığı hamlelerle, her bilim adamının yararlanacağı yöntemleri ortaya koymuş, ölçme ve değerlendirme teknikleri sunmuştur. Bununla beraber bu yöntemlerin yaygınlık kazanması da ancak bilgisayarlar sayesinde olmuştur. Dil ve edebiyatın, İstatistik metodları kullanması ve bilgisayarlardan faydalanması da artık kaçınılmazdır. Çağın gidişi bu yöndedir. Günümüzde dil ve üslubu ele alan Stylometry adlı bir İstatistik dalı gelişmiş, dilbilime uygulanan bilgisayar yöntemlerini inceleyen Computational Linguistics gibi dergiler yayımlanmaya başlamıştır.

Zaman zaman istatistik dergilerde bu yönde yapılmış yayınlara rastlanmaktaydı. Türk Dili ve Edebiyatı'nda bu çalışmaların yapılmaması için hiçbir sebep yoktu. İlk olarak, 1973 yılında Türk Roman'ındaki Batı kaynaklı kelimeler üzerinde bir çalışma başlatıldı. Bu arada, çeşitli metinlerde kelime uzunluklarını ele alan bir araştırma 1979 III. Milletler Arası Türkoloji Kongresi'nde bir bildiri halinde sunuldu. Bunu 1982 ve 1985 kongreleri takip etti. 1982 bildirisinde, romanımızdaki batı kaynaklı kelimelerin zaman içinde gittikçe yoğunluk kazandığı rakamlarla ispat edilmekte, dil ve kültürümüzde batılılaşmanın yarattığı kutuplaşmalar ilmi metodlarla ortaya konmaktaydı. Bu bildirinun sunulmasından sonra dinleyicilerden gelen sorular ve yapılan tartışmalar üzerine bir açıklama yapılması gerekli oldu. "İstatistik ve Edebiyat" başlıklı bu uzunca makalenin ancak bir kısmı 1983 yılında Türk Edebiyatı dergisinde yayınlandı. Daha sonra, 1984 Yazarlar Birliği Yıllığı'na da alınan bu makalenin tamamı ilk olarak bu kitapta yer almaktadır. 1985 Türkoloji Kongresi'nde sunulan "Dil ve Edebiyatta Ölçülebilir Özellikler" başlıklı bildiri, edebiyatçılarımız için niceleyici çalışmalarda yol gösterici olabilir.

4. İstanbul Edebiyat Fakültesinden Bir Makale: İstatistik Metod Eleştirisi Kuramı Teorisi Hakkında Kısaca Özet Bilgi

Bütün bilim ve sanat dallarında etkilerini gördüğümüz istatistik metod kuramı [15], edebî metnin ve edebiyatla ilgili her bilginin incelenmesinde zaman zaman karşılaşılan bir dizi teklif ihtiva eder. Özellikle "verilerin" çok olduğu durumlarda verilerin birbiri ile ilişkilerinin incelendiği araştırmalar, istatistik metodun tekniklerini kullanmayı gerektirmektedir.

İstatistik, matematik bilimi ile yakından alakalı bir bilim dalıdır. Verileri, matematiksel değerleri açısından inceler. Aritmetik ortalama başta olmak üzere sayısal veri grubunun birbirlerine göre durumlarını çok çeşitli açılardan değerlendirir. Ortalamalarını alır, genel ve özel sayısal

değerlerini hesaplar, grafikler çizer, yüzdelerini ve varyanslarını (standart sapmalarını) bulur ve bunlara benzer daha pek çok çalışma ile uğraşır.

İstatistik, bir anlamda deney ve gözlemlerin matematiğidir, dolayısıyla sayma ve ölçme ile elde edilmiş verilerle uğraşan bilimsel bir yöntemdir. Saymalar ve ölçmeler sonunda araştırmacı karar verme aşamasına gelir.

İstatistik, günümüzün çok unsurlu hayatı içinde hemen her parçanın birbiri ile ilişkisini sayısal değerlerle verebildiği için önemlidir. Yıllarca fen bilimlerinin ortak bir metodu olan istatistik, artık edebiyatta da kullanılmaktadır. Edebî metinlerin dil ve üslup çalışmaları, istatistik olmadan yapılamaz. Sanatkarların kavram dünyaları ancak istatistik verilerle ölçülebilir. Bir şiirdeki asonans ve aliterasyon çalışması edebiyata İstatistik metodun en yaygın uygulamalarından biridir.

Kafiye, vezin, nazım şekli, nazım birimi gibi şiirin teknik özellikleri, istatistik ile sağlam bir biçimde ölçülebilir. Bibliyografik künye bilgileri, istatistiğin sıralama, gruplama gibi teknikleri sayesinde düzenlenebilir. Veriler içinde sayı, yüzde ve dağılım gibi değerler başta olmak üzere istatistik metodun edebî metin incelemesinde önemli bir yeri vardır.

İstatistik, günümüzün çok unsurlu hayatı içinde hemen her parçanın birbiri ile ilişkisini sayısal değerlerle verebildiği için önemlidir. Yıllarca fen bilimlerinin ortak bir metodu olan istatistik, artık edebiyatta da kullanılmaktadır. Edebî metinlerin dil ve üslup çalışmaları, istatistik olmadan yapılamaz. Sanatkarların kavram dünyaları ancak istatistik verilerle ölçülebilir.

Bir şiirdeki asonans ve aliterasyon (mısra~ dize içinde ve komşu mısralar arasında bir ahenkle tekrarlanan ünlüler asonans, ünsüzler aliterasyon oluşturur) çalışması, edebiyatta İstatistik metodun en yaygın uygulamalarından biridir.

Kafiye, vezin, nazım şekli, nazım birimi gibi şiirin teknik özellikleri, istatistik ile sağlam bir biçimde ölçülebilir. Bibliyografik künye bilgileri, istatistiğin sıralama, gruplama gibi teknikleri sayesinde düzenlenebilir. Veriler içinde sayı, yüzde ve dağılım gibi değerler başta olmak üzere istatistik metodun edebî metin incelemesinde önemli bir yeri vardır.

İstatistiki incelemeler, bir edebî türdeki metinlerin dış görünüşündeki ince farklılıkları göstermeye, şimdiye kadarki analizlerden çıkan yapı özelliklerini ispat etmeye, bir devrin şekil özelliklerine uygun olarak bir eserin durumunu aydınlatmaya ve şekildeki gelişmelerin çizgisini belirlemeye ve tercüme hakkında bir karara varılırken bazı kriterler tespit etmeye uygun görünmektedir. [6; gerçeğine sadık kalınarak alıntı yapılmıştır].

Bu çalışma İstatistik metotlar ve bilgisayar kullanımıyla dil ve edebiyat alanında neler yapılabileceğine birkaç örnek vermiş sayılabilirse amacına ulaşmış olacaktır.

5. İstatistik Mühendisliği

İstatistiğin son zamanlarda kullanılan yöntemlerden biri olan "veri madenciliği" ne bir göz atalım. Kurumlarda biriken veri içerisinden kurum için yararlı olanlarını bulup ortaya çıkarma işine veri madenciliği adı veriliyor. Bu eylem bizi "İstatistik Mühendisliğine" götürmektedir. Veri madenciliğinin

kullanılmadığı alan yok gibidir. Pazarlama, bankacılık, sigortacılık ve elektronik ticaret vb. değişik türde kullanılabilir. Veri madenciliğinin veri kümeleme tekniği dil ve edebiyatta istatistiksel analiz yöntemlerinin kullanılmasına ışık tutacağı için bir örnekle bir giriş yapalım. Rastgele bir makine kullanımının öğrenimi açısından, her bir küme gizli bir örüntüyü (pattern) temsil eder ve uygulanan öğrenme ise bir denetimsiz öğrenmedir. Bir açıdan bakıldığında ise kümelemeyi "gizli örüntülerin" ortaya çıkarılması için uygulanan bir denetimsiz "öğrenme yaklaşımı" olarak tanımlanabilir [16].

Kümelemedeki öğrenmenin denetimsiz olmasının nedeni önceden belirlenmiş sınıfların olmayışıdır. Önceden sınıflar belirli olsaydı, zaten bu kümeleme değil, bir sınıflandırma "modeli" adını alacaktı. Önceden sınıflar belirli iken, yani kadın ve erkek, evli veya bekâr diye iki ayrı sınıf varken yapılan (algoritmik) öğrenmeye denetimli öğrenme; herhangi bir sınıf adı verilmeden yapılan öğrenmeye ise denetimsiz öğrenme denilir. Örneğin, veri tabanındaki kayıtlarda her kayıdın yanında kadın veya erkek, evli veya bekâr bilgisi yazılıyor olsun, bu durumda veri tabanı üzerinde yapılan herhangi bir (kadın veya erkek olduğuna ilişkin) kural çıkarma işlemi denetimli öğrenmedir. Ancak, yapılan kural çıkarma işlemi denetimsiz öğrenmedir. Bu işlem aynı zamanda veri tabanını (iki) kümeye ayırma, yani kümeleme işlemidir. Burada, kadın/erkek gibi bir etiket ya da sınıf olmayacağı için kümeleme kayıtlar arasındaki benzerlik veya uzaklık (mesafe) ölçütüne göre yapılır.

İki verinin (metnin, şiirin vb.) benzerliğinden kasıt ise aralarındaki uzaklığın ölçülmesi ve değerlendirilmesidir [17]. Bu değerlendirme veri tabanındaki diğer verilere oranla iki verinin ne kadar yakın ya da benzer oldukları açısından yapılabileceği gibi önceden belirlenmiş kısıtlar eşik (sınır) değerleri çerçevesinde de yapılabilir.

6. İstatistiksel Mühendisliğin, Mühendislik Araştırmalarında Kullanımına İlişkin Uygulama Yöntemleri Üzerine Örnekler

6.1. İstatistik Mühendisliğinde Varyasyon-Standart Sapma Üzerine Temel Bilgi

Varyasyon~Değişim (variation) olan her ortamda bu değişimi azaltmak için istatistik yöntemlerine başvurulur. İstatistik Mühendisliğinde ise bu kavram "değişimi azaltmak" için sistematik bir algoritma" sunmayı önerir. Bu algoritma, endüstride seçilen süreç girdilerinin (input) ve çıktılarının (output) değerlerinin ölçülmesinin mümkün olduğu orta ölçekli üretim süreçlerine uyarlamaktır. Değişim (variation) kelimesi hem çıktının bir hedef değerinden sapması (deviation) hem de çıktının parçadan parçaya değişen değeri anlamında kullanılmaktadır. V6 pistonlarını üreten bir işlem

²V6 motor, tek bir krank çeviren, üçerli iki sıra halinde altı silindirden oluşan V tipi motordur. 6 Silindirli Motorlar, Motor bloğu üzerinde 6 adet silindirin olduğu yapıdır. Genellikle V şeklinde bir motor bloğu üzerinde üçerli şekilde silindirler sıralanarak 6 silindirli motor oluşturulur. Büyük motorlu araçlarda kullanılan 6 silindir yapısı, aracın ön kısmının da büyük olmasına neden olabilir.

sürecinde çap için hedef değeri 101.591 mm dir. Peş peşe üç pistonun mm türünden ölçülen çapları 101.592, 191.587, 101.598 olduğu saptanmıştır. Pistonların hiçbiri hedef çapına

sahip olmadığından ve hepsinin farklı çapları olduğundan her iki anlamda da değişim görülebilir. Problemler, azaltılmak istenen değişimin doğasını yakalayan uygun performans ölçümleri tanımlanarak formül tasarımına gidilecektir. Yüksek değişim kötü performansa, düşük müşteri memnuniyetine,

hurdaya çıkarılmaya ve yeniden işlemeye, karmaşık akıntı yönünde kontrol planlarına vb. yol açmaktadır. Eğer bu problemler çözülebilirse, giderler azaltılabilir ve kalite ve performans geliştirilebilir.



Şekil 1. Egzantirik mili

6.2. Algoritmanın Temeli Nasıl Oluşturulur?

Bir sürecin nasıl ve neden olduğu gibi davrandığının bilgisi artırılarak süreçte değişimi (variation) azaltacak uygun giderli değişikliklerin ortaya çıkartılacağı şeklindeki inançtır. Süreç bilgisini arttırmanın bir yolu deneysel olarak öğrenmek, yani gözlem ve deneyle öğrenmektir. İşte istatistik burada devreye girmektedir. Çünkü İstatistik deneysel olarak nasıl davranılacağını öğreten bir bilim koludur. İstatistik, “Süreç araştırması nasıl planlanır ya da planlanmalıdır?” ve “Eldeki veri nasıl yorumlanmalıdır?” gibi sorulara yanıtlar sağlar. Önerilen algoritma, istatistiksel yöntemlerin ve araçların var olan mühendislik bilgi ve teorisiyle birleştirilmesine bağlıdır. Algoritma kullanılarak, süreç davranışıyla ilgili öğrenmek için bir veya birden çok araştırma planlanacak ve gerçekleştirilecektir.

Çoğu kez, uygun maliyetli (giderli) olmaları için, önerilen değişimler temel tasarım değişiklikleri veya süreç donanımını değiştirmek yerine düzenli (ayarlı) bir duruma getirerek daha iyi bir süreç kontrolü veya değişiklikleri içerirler. Bu *düşük giderli değişimler genel değişimi azaltma yaklaşımlarının* bir kümesi içine sınıflandırılmış ve bir yaklaşımın erken göz önüne alınmasını zorlayacak *algoritma* yapılandırılır.

İşte istatistiksel mühendisliğin belirli amaçları bize aşağıdaki eylemler için yardımcı olacağı düşünülür:

- Uygun giderli *değişim azaltmanın* nasıl başarılacağıyla ilgili stratejik olarak düşünmeyi sağlamak.

- *Değişim kaynaklarını ve bunların süreç gelişimindeki rolünü anlamak.*
- *Deneysel yöntemlerin daha iyi nasıl kullanılacağını; yani, bir süreç araştırmasının sonuçlarını planlamanın, uygulamanın ve analiz etmenin etkili ve verimli yollarını öğrenmek.*

Ana amaç önerilen algoritma kullanılarak dile getirilebilen problem türlerinin örneklerini ortaya çıkartmaktır. Yani problemler tartışılmaya açık, fakat çözüm yolları devrede olmayacaktır. Aşağıda verilecek örnekle algoritma, yaklaşım ve yöntemleri uygulayarak kazanımlar nasıl elde edilir onları göreceğiz.

6.3. Motor Mühendisliğinden Bir Örnek: Motor Bloğu Sızıntıları Problemi ve İstatistiksel Çözüm Önerisi

Şekil 1.2’ de gösterildiği gibi, bir eksantrik milinin lobunun geometrisi bir motorun işleminde kritiktir. Eksantrik mili loblarının dönmesi motor vanalarının açılmasını ve kapanmasını yönlendirmektedir. Görüntülenen eksantrik milinin üçü beyaz oklarla gösterilen 12 lobu vardır.

Yandan görüldüğünde, lobun tabanı (merkez çizgisinden 60°) ideal olarak bir çemberin yayıdır. Şekil 1.3 bir lobun tabanı boyunca ideal, çemberden (mm olarak) sapmanın bir izidir.

Lob geometrisiyle ilişkili ölçülen altı kritik karakteristikten *taban çemberi salgısı* tarihsel olarak en sorunlu olanı ve bu yüzden bir *değişim azaltma* alıştırmasının odağı olarak seçilmişti. Taban çemberi (TÇ) salgısı gerçek lob geometrisinin ideal çemberden (60° lik yay üzerinde en fazla – en az) sapmasının pozitif bir ölçümüdür. 0.000 mm lik bir deşer tabanın tamamen dairesel olduğu anlamına gelmektedir.

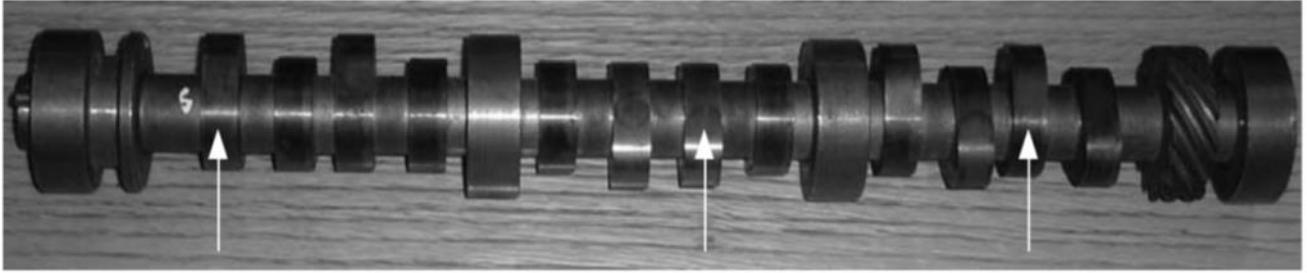
İzin verilebilir en fazla TÇ salgısı 0.040 mm veya 40 mikrondur.

12 gün boyunca günde 9 parça olmak üzere 108 parçalık bir örnek toplanmıştır ve her eksantrik mili üzerinde 12 lobun her biri için TÇ salgısı ölçülmüştür. (mikron cinsinden kaydedilmiş) 1296 salgı ölçümü ve lobların diğer bazı geometrik karakteristikleri camshaft lobe runout baseline (eksantrik mili lob salgısı taban çizgisi) dosyasında mevcuttur. Tüm loblar üzerindeki salgı değerlerinin bir histogramı Şekil 1.4 da gösterilmiştir.

Tüm loblar için TÇ salgısı şartname sınırının çok altındaydı ama bu kritik karakteristiğin motor performansı üzerindeki etkileri nedeniyle, yönetim süreci geliştirmek için bir proje başlatılmıştır. Burada amaç süreci histogramın sağ kuyruğu sola

kayacak ve lobların daha büyük bir miktarı sifıra yakın salgiya sahip olacak şekilde değiştirmekti. Salgınin pozitif olması gerektiğinden, süreci tob loblar üzerindeki alt salgiya göre ayarlamak mümkün değildi. Bu bağlamda, değişim azaltılması yapılır ki bunun anlamı salgıları hedef değeri olan 0 mikrona yakın olan daha yüksek miktarda lob olacağıdır.

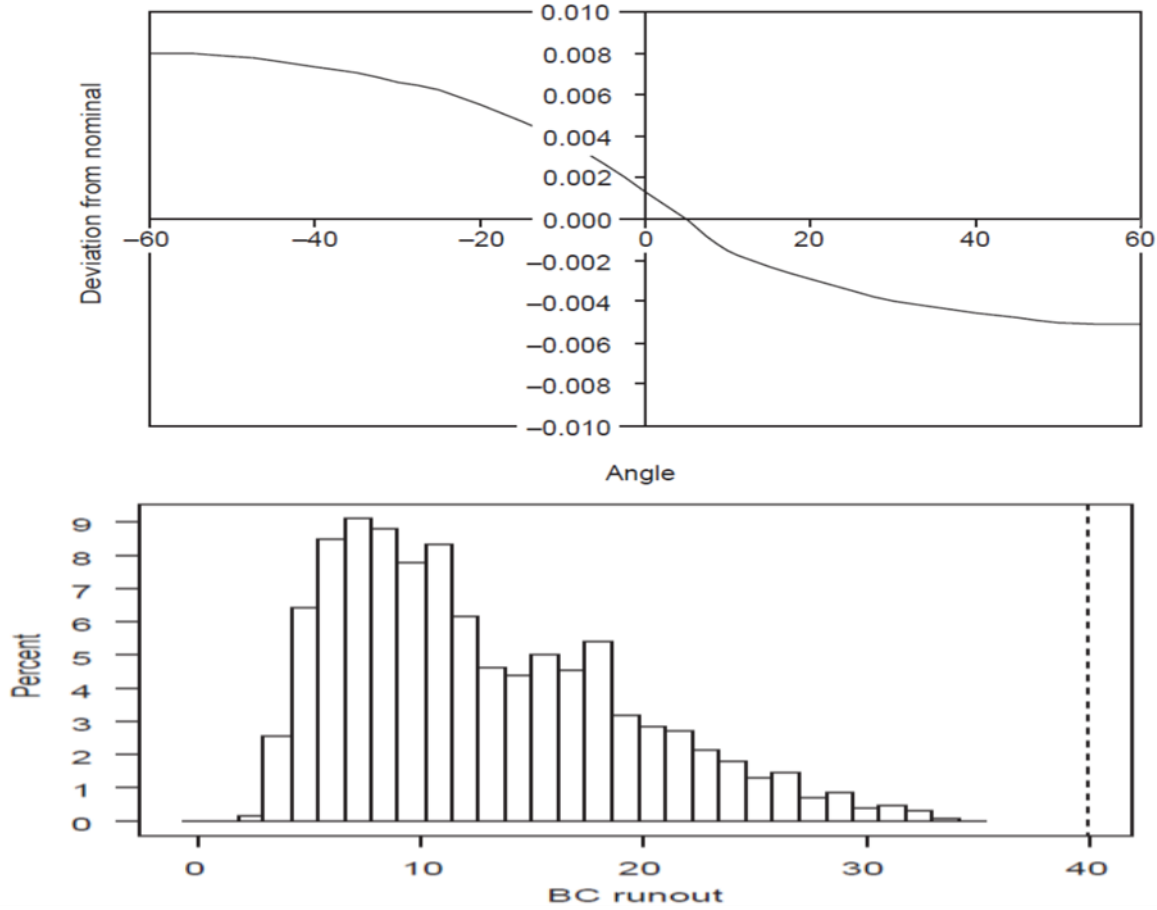
Tek yönlü bir şartnamesi ve fiziksel bir alt sınırı olan diğer birçok süreç karakteristiği vardır. Örnekler arasında pürüzsüzlük, gözeneklilik, koniklik v.b. vardır. Bu tür karakteristikler cinsinden tanımlanmış süreç performansı hedef değeri civarındaki değerlerin yoğunluğu artırılarak geliştirilebilir. Yani, hedef değeriyle ilgili süreç çıktısındaki değişim azaltılır.



Şekil 2. Eksantrik mili (Eksantrik mili de motor ile bağlantılı olarak işlem yapan bir araç içi parçadır. Araç içlerinde yer alan supapların gerekli zamanda açılıp kapanmasını sağlayan ve üzerinde kam bulunan küresel demir ya da çelik alaşımdan yapılan bir sistemdir) [18].



Şekil 3. İdealden lob sapması



Şekil 4. Eksantrik mili lob TÇ salgısının histogramı (kesikli çizgi şartname sınırını vermektedir).

7. Sonuç

Süreç çıktılarında değişimi azaltmak süreç gelişiminin kilit bir parçasıdır. Süreç değişimini azaltmak için İstatistiksel Mühendislik olarak adlandırılan bir algoritmanın etrafında bir yapılandırma gerekliliğinin önemine vurgu yaptık. Algoritmalar örneğin üretim ve montaj süreçlerinde mevcut yüksek ile orta ölçekli kronik problemleri çözmek için tasarlanırlar. Algoritmanın ana temeli eğer bir sürecin nasıl ve neden yaptığı gibi davranışıyla ilgili bilgi arttırılırsa değişimi azaltacak süreçte uygun maliyetli değişiklikler keşfedileceği şeklindeki bir inanç olduğuna inanıyoruz.

Süreç bilgisini azaltmanın kilit bir yolunu açıklarsak deneysel olarak-yani, gözlem ve deneyle-öğrenmektir. Biz de çalışmamızda Deneysel araştırmaları planlamak ve analiz etmek için kısaca SPVAS (Soru, Plan, Veri, Analiz, Sonuç) olarak bilinen bir çerçeveyi detaylı biçimde kullandık gerek dil konusunda gerekse mühendislik deneysel araştırmalarda nasıl kullanıldığına ilişkin uygulamalardan söz ettik. Çünkü SPVAS çerçevesi İstatistiksel Mühendislik algoritmasının birçok aşamasında uygun araştırmaların sonuçlarını planlamaya, analiz etmeye ve yorumlamaya yardımcı olmak için kullanımının çok önemli olduğunu deneysel problemlerle gösterdik. Hangi veri olursa olsun mutlaka bir araştırma için amaç ve planlamanın bir algoritmanın evresinin, daha önceki araştırmalardan ortaya çıkmış sonuçlarla ilgili bilgilerin, eğer konu mühendislik ise süreç ve bilgilerinin varlığına bağlı olduğunun sonucuna ulaşmış olduk. Bu çalışmayla araştırmacıların yaklaşımların ve yöntemlerin kullanımında güven kazanmasına yardımcı olması için araştırmaları cesurca

denemesi ve veri kümelerini (hatta büyük veri ~ big data) keşfetmesini tavsiye ediyoruz.

Yazar Katkısı

Veri iyileştirme -Yazar Adı Soyadı(AS); Biçimsel analiz - AS; Araştırma - AS; Deneysel performans - AS; Veri toplama - AS; Veri işleme - AS; Literatür taraması - AS; Yazan - AS; İnceleme ve düzenleme - AS...

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir. İkar Çatışması Beyanı

Kaynaklar

- [1] Mazmanoğlu, Adnan. (2016) Herkes için İstatistik Analiz Yöntemleri I, 1.Baskı, Ankara, Nobel Akademik Yayınları
- [2] Grisebach, Manon Maren. (1995). Edebiyat Bilim'inin Yöntemleri, (Çev.: Arif Ünal), Ankara: Atatürk Kültür, Dil ve Tarih Yüksek Kurumu, Atatürk Kültür Merkezi Yayını Sayı 99
- [3]https://www.google.com/search?q=g.u.yule+ve+c.b.+williams&tbm=isch&ved=2ahUKEwjjjeDSuur_AhUlgv0HHZJa_CiUQ2-cCegQIABAA&oq=g.u.yule+ve+C.B.+Will&gs_lcp=CgNpbWcQARgA
- [4] https://de.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Fucks [10] M. G. Kendall Yule, G. Udney, An Introduction to the Theory of Statistics. Fourteenth edition, revised and enlarged Hardcover

– 1 Jan. 1965

- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Christian_Morgenstern
- [7] <https://www.poetryfoundation.org/poets/august-stramm>
- [8] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Dadaizm>
- [9] <https://www.jstor.org/stable/455407>
- [10] [https://www.themaggar.com/gertrude-stein-kimdir-yasami/\(Who is gertrude-stein\)](https://www.themaggar.com/gertrude-stein-kimdir-yasami/(Who%20is%20gertrude-stein))
- [11] https://de.wikipedia.org/wiki/Helmut_Hei%C3%9Fenb%C3%BCtte
- [12] C. E. SHANNON, A Mathematical Theory of Communication, Reprinted with corrections from The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.
- [13] Musođlu, Erdal, (2016-Ekim). Claude Shannon, sayısal

devrimi başlatan mühendis, İstanbul: HBT sayı 28-7 Ekim

- [14] Sezgin, Fatin. (1993) Dil ve Edebiyatta İstatistik ve Bilgisayar Uygulamaları, 1. Basım, İstanbul: Dergâh Yayınları
- [15] İstatistik Metot Eleřtiri Kuramı Teorisi Hakkında Kısaca Özet Bilgi, <https://www.edebiyatfakultesi.com/istatistik-metot-elestiri-kurami.htm>, 06.06.2023
- [16] P.Berkhin , A Survey of Clustering Data Mining Techniques, https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-28349-8_2
- [17] Cleaver, G.B., Nanopoulos, D. V. A. E. FARAGGI, and T. TER VELDHUIS, TOWARDS STRING PREDICTIONS, International Journal of Modern Physics AVol. 16, No. 21, pp. 3565-3581(2001)
<https://doi.org/10.1142/S0217751X01004918>
- [18] <https://otolye.com/blog/eksantrik-mili>

Araştırma Makalesi

Doğal Polimer Bazlı Hidrojellerin Sentezi ve Karakterizasyonu

Betül Taşdelen^{1,*} , Ömer Faruk Güder² , Uğur Akyol³ 

¹ Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 59860

² Biyomedikal Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye, 34119

¹btasdelen@nku.edu.tr, ²omfrkgdr@gmail.com, ³uakyol@nku.edu.tr

Geliş: 13.11.2023

Kabul: 21.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1389940

Öz: Biyomedikal uygulamalarda pek çok kullanımı bulunan yumuşak doku genişleticiler cerrahi uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Dental implantların osseointegrasyonunun sağlanmasında yumuşak doku genişleticiler önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, kitosan (CS), hyaluronik asit (HA) ve jelatin (GEL) doğal polimerleri kullanılmıştır. CS, CS-HA, CS-GEL, GEL-HA ve CS-HA-GEL hidrojellerinin sentezi gerçekleştirilmiştir. HAP ile hidrojel sentezinde gama radyasyon kullanılmıştır. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ve Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile karakterizasyonları yapılmıştır. Dinamik şişme testleri distile suda gerçekleştirilmiştir. Hidrojellerin şişme davranışları ve şişme kinetikleri belirlenmiştir. Çapraz bağlayıcı konsantrasyonunun ve farklı çapraz bağlayıcıların (glutaraldehit (GA) ve hidroksiapatit (HAP)) şişme davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Hidrojellerin difüzyonunda Fickian mekanizması görülmüştür. Sonuçlar, en yüksek kütlece şişmeye ve en uygun şişme profiline sahip hidrofilik yapılı CS-HA-1 hidrojinin biyomedikal uygulamalarda yumuşak doku genişletici olarak kullanılabilceği göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Doğal polimerler, Doku genişletici, Hidrojel, Yumuşak doku genişlemesi

Synthesis and Characterization of Natural Polymer Based Hydrogels

Abstract: Soft tissue expanders, which have many uses in biomedical applications, are also encountered in surgical applications. Soft tissue expanders play an important role in ensuring osseointegration of dental implants. In this study, natural polymers chitosan (CS), hyaluronic acid (HA) and gelatin (GEL) were used. Synthesis of CS, CS-HA, CS-GEL, GEL-HA and CS-HA-GEL hydrogels has been performed. Gamma radiation was used in hydrogel synthesis with HAP. They were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Dynamic swelling tests were performed in distilled water. Swelling behavior and swelling kinetics of hydrogels were determined. The effect of cross-linker concentration and different cross-linkers (glutaraldehyde (GA) and hydroxyapatite (HAP)) on swelling behavior was evaluated. Fickian mechanism has been observed in the diffusion of hydrogels. The results show that the hydrophilic CS-HA-1 hydrogel with the highest mass swelling and the most suitable swelling profile can be used as a soft tissue expander in biomedical applications.

Keywords: Hydrogel, Natural polymers, Soft tissue expansion, Tissue expander

1. Giriş

Yüksek absorplama ve desorplama yeteneğine sahip hidrojeller, su varlığında suyun büyük bir kısmını ağ yapıları

içerisine alıp şişerken karakteristik olarak suda çözünmezler.

Hidrojellerin ağ yapısı ve hidrofilik fonksiyonel grupları absorplama yeteneğini belirler. Hidrofilik grupların çokça bulunması hidrojellerin şişme karakterini önemli ölçüde

*Sorumlu yazar

E-mail adresi: btasdelen@nku.edu.tr (B. Taşdelen)

arttırır. Fonksiyonel gruplarının ve çapraz bağlarının etkisiyle hidrojel, su içerisinde bir denge hacmine kadar kütsel ve hacimsel artarken şekillerini kaybetmeden karakteristik olarak şişerler. İstenilen özelliklere göre sentezlenebildiklerinden hidrojel, canlı dokulara benzer eşsiz malzemeler arasında yer almaktadır [1,2]. Doğal polimerik hidrojel canlı dokularda toksik etki göstermediklerinden yüksek biyoyumludur. Özellikle biyoteknoloji ve doku mühendisliği alanında doğal polimerik hidrojel önemli malzemeler arasında yer almaktadır [3].

Yumuşak ya da sert dokuların genişlemesi, varoluştan beri devam eden fizyolojik olayların sonucunda meydana gelmektedir. Doku genişletme, dokulardaki eksikliklerin, mevcut dokuyla benzer yapıdaki dokuların, farklı teknik, işlem ve farklı malzemelerin kullanılmasıyla yeni dokuların elde edilerek doku eksikliğinin giderilmesidir [4]. Plastik cerrahi ve dental uygulamalardaki doku kayıplarının giderilmesinde yumuşak dokuların genişletilmesi sıklıkla kullanılmaktadır. Çok sayıda ve çeşitte biyomalzemeler ile istenilen şekil ve boyutta tasarlanabilen hidrojel, yumuşak doku genişletici olarak kullanılmaktadır [5].

Osseointegrasyon, implant ve kemik dokunun birbiriyle entegrasyonudur. Dental implantların başarısı osseointegrasyonun sağlanmasıyla doğrudan ilişkilidir [6]. Greftleme işleminde otojen kemik greftlerinin beslenmesi ve vaskülarizasyonun sağlanması, eksik kemik dokunun tamamlanmasında çok önemlidir. Otojen kemik greftleme tekniğinde kullanılan bu yöntem, gerilim oluşturmadan primer kapatılma ve dokudaki mevcut yapının bozulmadan vaskülarizasyonun sağlanmasında yüksek potansiyelli çözüm olarak görülmektedir [7,8].

2. Literatür Özeti

1957 yılında ilk kez travmatik kulak deformitesi hastalarında preauriküler cildin genişletilmesi için balon tekniğini kullanan Neumann, lateks balon ile yumuşak doku genişleticileri kullanan ilk cerrah olmuştur [9].

Austad vd. (1982) silikon balon membranını geçirgen hale getirerek, çevre dokulardan ekstrasellüler sıvıları ozmotik kuvvetlerle içine çekerek kendiliğinden şişen yumuşak doku genişleticileri ortaya koymuşlardır [10].

Downes vd. (1992) biyoyumlu özellikte, ozmotik kuvvetlerle şişen ve genişleyen poli (hidroksietil metakrilat) (pHEMA) hidrojelini doku genişletici olarak kullanmışlardır. Literatürde ilk kez hidrojel doku genişletici olarak kullanılmıştır [11].

Wiese (1993) 2-vinil piroolidon-ko-metilmetakrilat hidrojelini kullanarak literatüre yeni bir doku genişletici hidrojel kazandırmıştır. Yaptığı çalışmayla hidrojel doku genişletici olarak kullanılabilirliğini kanıtlamıştır [5].

Zeiter vd. (1998) yumuşak doku genişletici destekli greftleme tekniğini endosseous dental implant uygulamasında kullanmışlardır. Yumuşak doku genişleticilerle desteklenen greftleme tekniğinde sürecin kolaylaştığı ve yüksek başarı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır [12].

Von See vd. (2010) kemik greftleme uygulamalarında yeni oluşturdukları yumuşak doku genişletici hidrojel

kullanmışlardır. Dokularda açılma, enfeksiyon ya da komplikasyon görülmeden yumuşak dokunun miktarca artışının başarılı şekilde gerçekleştiğini göstermişlerdir. Çalışma sonucunda yumuşak doku genişletici hidrojel kullanımının uygulamalardaki pozitif yanlarını ortaya koymuşlardır [8].

Yumuşak doku genişleticilerin biyomedikal uygulamalardaki başarısı dikkat çekmektedir. Bu çalışmanın amacı, biyomedikal uygulamalarda kullanılmakta olan yumuşak doku genişletici hidrojelere alternatif oluşturabilecek, literatürden farklı biyopolimerler ve çapraz bağlayıcıların kullanıldığı yeni yumuşak doku genişletici hidrojel ortaya koymaktır.

Bu amaç doğrultusunda CS, CS-HA, CS-GEL, GEL-HA ve CS-HA-GEL hidrojel sentezlenmiştir. Hidrojel karakterizasyonu ve şişme kinetikleri incelenmiştir. Çapraz bağlayıcı konsantrasyonunun ve farklı çapraz bağlayıcıların (GA ve HAP) şişme davranışına etkisi incelenmiştir.

3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada kullanılan tüm kimyasallar herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan kullanılmıştır. Hidrojel sentezinde kullanılan kitosan (CS), hyaluronik asit (HA), jelatin (GEL), glutaraldehit (GA), hidroksiapatit (HAP), N,N'-Metilenbis (Akrilamid) (MBA), potasyum persülfat (KPS) ve asetik asit Sigma-Aldrich'ten satın alınmıştır. Hidrojel dinamik şişme testleri distile su içerisinde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Hidrojel Sentezi

Tablo 1. Hidrojel formülasyonu

Hidrojel	CS (g)	HA (g)	GEL (g)	Çapraz Bağlayıcı
CS-1	0.1			GA (%0.6)
CS-2	0.2			GA (%0.4)
CS-HA-1	0.2	0.01		GA (%0.4)
CS-HA-2	0.2	0.01		HAP (0.01g)
CS-GEL	0.2		0.02	GA (%0.4)
GEL-HA		0.02	2.5	MBA/KPS (0.01g)
CS-HA-GEL	0.2	0.01	0.02	GA (%0.4)

Hidrojel sentezinde kullanılan polimer çeşitleri, polimer miktarları ve çapraz bağlayıcıları Tablo 1'de verilmiştir.

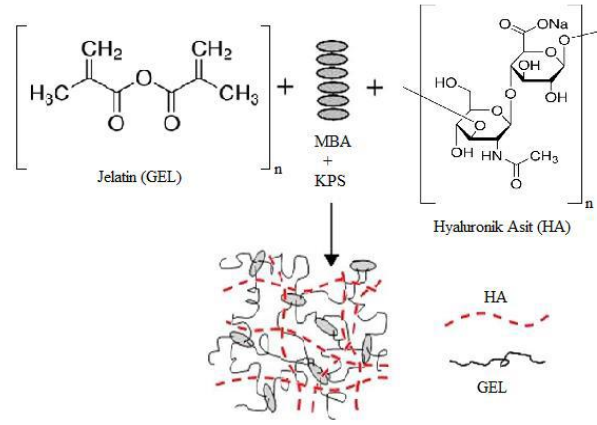
CS-1, CS-2, CS-HA-1, CS-GEL ve CS-HA-GEL -20 °C'de dondurularak jelleştirilmiştir. CS-GEL oda sıcaklığında serbest radikal zincir polimerizasyonu ile jelleştirilmiştir. CS-HA-2, 3 kGy/saat'lik gama radyasyon kaynağı (Co-60) kullanılarak (NORDION, JS9600, IR-185, KANADA) ile 25 kGy'de işlenmiştir.

Sentez sonrasında kuru ağırlıklardaki değişimlerden (1) ile hidrojel jelleşme yüzdeleri hesaplanmaktadır [15].

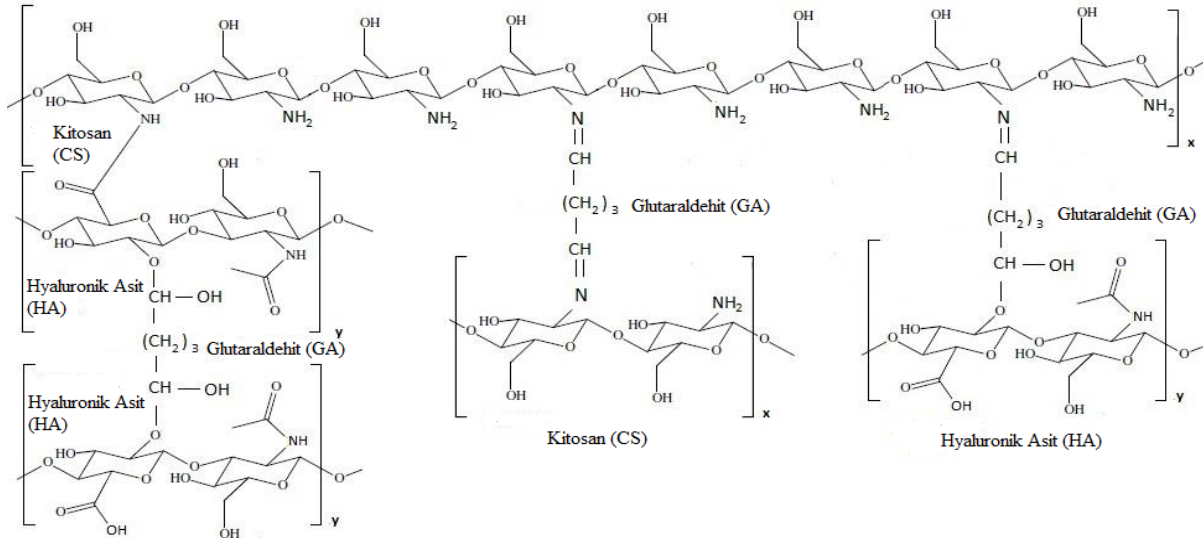
$$\text{Jelleşme (\%)} = \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

Burada w_1 hidrojel sentezi sonrasındaki kuru ağırlığı ve w_2 hidrojel çözelti içerisinde şişmesinden sonraki kuru ağırlığını göstermektedir [15].

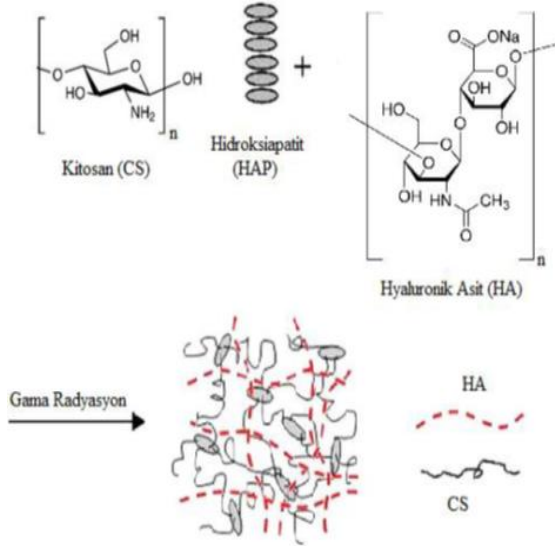
Şekil 1-6'da polimerlerin çapraz bağlayıcılar ile bağlanması ve hidrojel oluşum mekanizmaları verilmiştir.



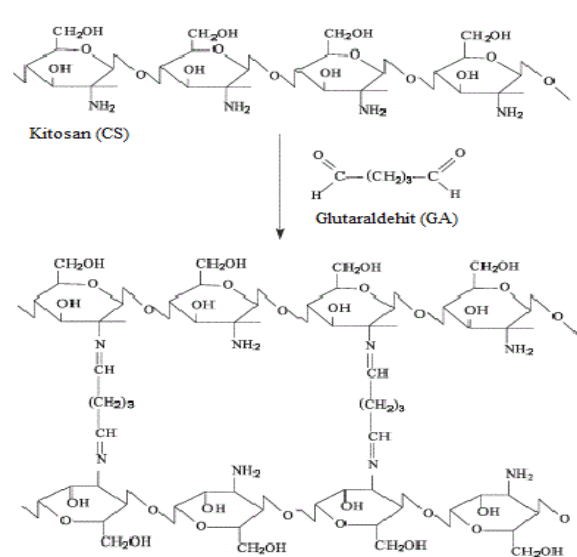
Şekil 1. GEL-HA'nın oluşum mekanizması



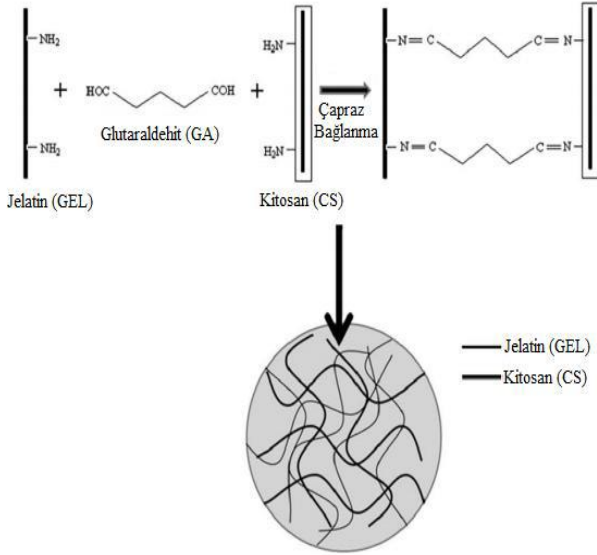
Şekil 2. CS ve HA'nın GA ile çapraz bağlanması



Şekil 3. CS-HA-2'nin oluşum mekanizması



Şekil 4. CS'nin GA ile çapraz bağlanması [16]



Şekil 5. CS-GEL'in oluşum mekanizması [17]

GEL-HA'nın sentezinde çapraz bağlayıcısı olarak 0.01 g MBA kullanılmış ve 0.01 g KPS eklenerek 60°C'de 3 saat polimerize edilmiştir.

3.2. Karakterizasyon

Hidrojellerin molekül yapısı, 400-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında (BRUKER, VERTEX 70 ATR, ABD) ile Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) spektrumları alınarak ve yüzey yapıları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) (FEİ, QUANTA FEG 250, ABD) ile incelenmiştir.

3.3. Şişme Çalışmaları

Hidrojellerin kütlece yüzde şişme değeri (%S) ve denge durumunda kütlece şişme değeri (%Seq) (2) ve (3) ile hesaplanmaktadır [15].

$$\%S = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\%S_{eq} = \frac{(m_{\infty} - m_0)}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

m_0 kuru jelin kütlesi, m_t t zamanında şişmiş jelin kütlesi ve m_{∞} dengede şişmiş hidrojin kütlesidir. Schott'un ikinci derece eşitliği kullanılarak kinetik analiz yapılabilir (4).

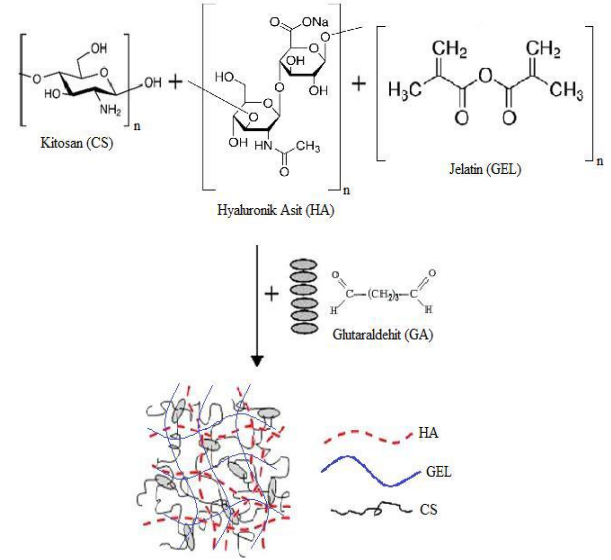
$$\frac{dS}{dt} = k_s (S_{eq} - S)^2 \quad (4)$$

Burada dS/dt şişme hızı, k_s şişme hız sabiti, S_{eq} hidrojin t anından denge durumuna ulaştığındaki şişme derecesi ve S , t anındaki şişme değeridir. Eşitlik 4'teki sınır koşulları $t=0$ için $S=0$ ve $t=t$ de $S=S_{eq}$ olarak matematiksel olarak düzenlenir ve integral alınırsa (5)'e dönüştürülebilir [18].

$$\frac{t}{S} = A + Bt \quad (5)$$

Başlangıçtaki $[(dS/dt)_0]$ şişme hızının tersi $A=1/k_s S_{eq}^2$ ve dengedeki şişmenin tersi olarak da $B=1/S_{eq}$ verilmiştir (5) [19].

Fick kanunu hidrojinlerin difüzyon türünün açıklanmasında ve şişme kinetiğinin belirlenmesinde temeldir. Şişebilen polimerlerin şişme kinetiği (6)'da gösterilmiştir [20].



Şekil 6. CS-HA-GEL hidrojininin oluşum mekanizması

$$F = \frac{M_t}{M_{\infty}} = kt^n \quad (6)$$

Burada k difüzyon sabiti, M_t t anındaki çözücü kütlesi, M_{∞} denge halindeki çözücü kütlesi ve n ise penetrant taşınım mekanizmasını gösteren şişme üstelidir [20].

Eşitlik 6'nın logaritmik temelde yazılmasıyla (7) elde edilir [21].

$$\ln(M_t / M_{\infty}) = \ln k + n \ln t \quad (7)$$

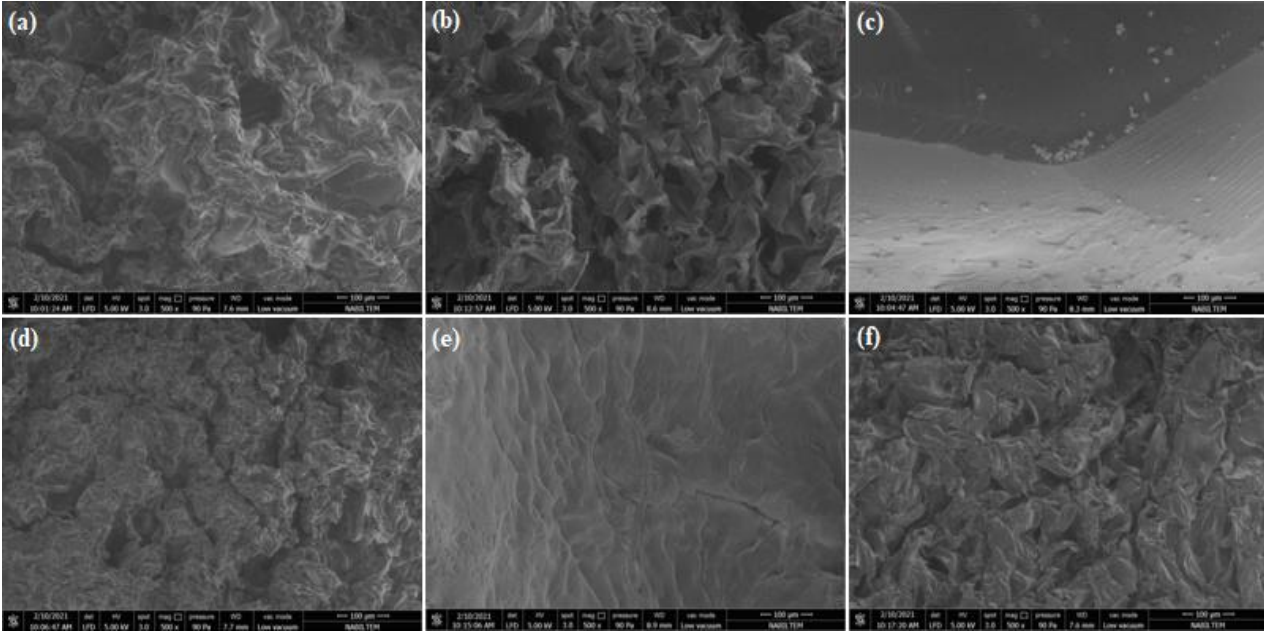
Eşitlik 7 ile t 'ye karşı M_t/M_{∞} 'nin logaritmik eksen grafikleri, k ordinatı kesim noktası ve difüzyon üsteli n ; $\ln F$ ve $\ln t$ doğrusunun eğiminden hesaplanabilmektedir. Difüzyon türü şişebilen sistemlerde, n 'ye bağlı olarak belirlenmektedir [21].

Fick'in II. kanununun düzenlenmesiyle silindirik geometriye sahip yapıların difüzyon katsayısı bulunabilir. Difüzyon katsayısı (D), $\ln F/\ln t$ grafiklerinden hesaplanan difüzyon sabiti k ve difüzyon üsteli n 'nin (8)'de kullanılmasıyla hesaplanır. Burada r , cm cinsinden şişmiş hidrojinin yarıçap uzunluğudur [21].

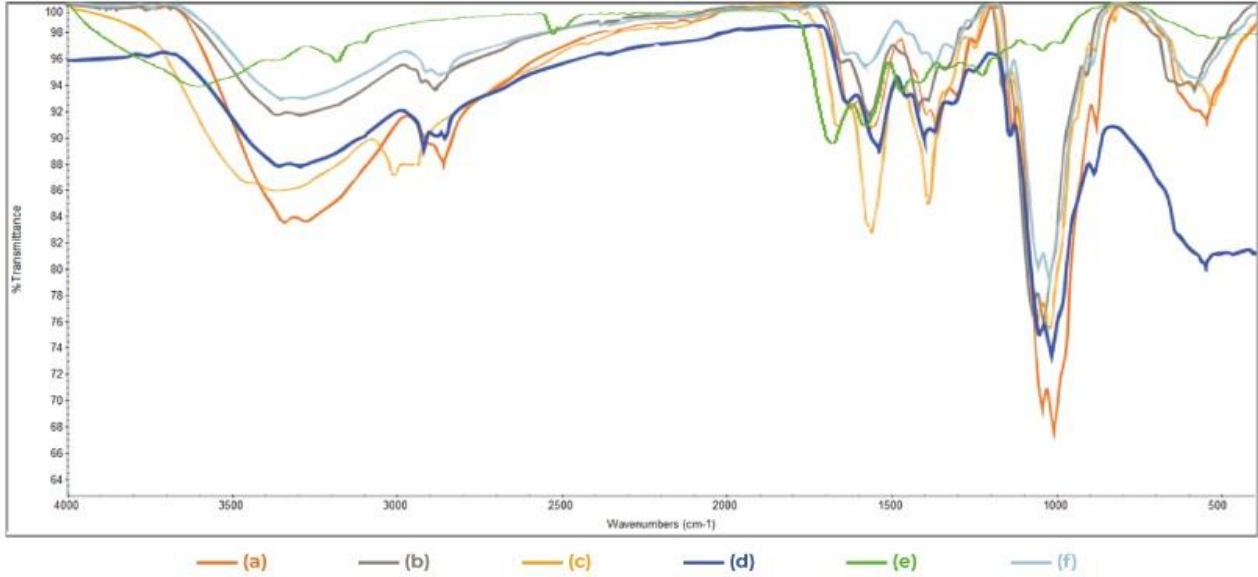
$$D = \pi r^2 \left(\frac{k}{4}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

4. Bulgular ve Tartışma

CS-2, CS-HA-1, CS-GEL ve CS-HA-GEL'in pürüzlü yüzey ve gözenekli yapıya CS-HA-2'nin ise pürüzsüz ve düzgün yüzey yapısına sahip olduğu görülmektedir. GEL-HA gözenekli yapıdadır. (Şekil 7). CS-2'de 3353.6 cm⁻¹, CS-HA-1'de 3284.3 cm⁻¹, CS-HA-2'de 3273.4 cm⁻¹, CS-GEL'de 3288.2 cm⁻¹ ve CS-HA-GEL'de 3353.4 cm⁻¹'de yayvan olarak gözlemlenen bant, moleküller arasındaki hidrojen bağları ve hidroksil gruplarının (O-H) etkisiyle gerçekleşmektedir [15]. Polimerlerin temel piklerinden sp^3 hibritleşmesinin gerçekleştiği C-H gerilme titreşim bandı, CS-2'de 2874 cm⁻¹'de, CS-HA-1'de 2874.4 cm⁻¹'de, CS-HA-2'de 2921.2 cm⁻¹ ve 2872.4 cm⁻¹'de, CS-HA-GEL'de 2873.7 cm⁻¹'de görülmüştür (Şekil 8).



Şekil 7. SEM görüntüleri (100µm) a)CS-2 b)CS-HA-1 c)CS-HA-2 d)CS-GEL e)GEL-HA f)CS/HA/GEL



Şekil 8. FT-IR spektrumları a)CS-2 b)CS-HA-1 c)CS-HA-2 d)CS-GEL e)GEL-HA f)CS/HA-GEL

CS-2'de 1582.5 cm^{-1} 'de görülen 'Schiff base' formasyonu yani C=N imin spesifik bandı, kitosan zincirlerindeki amin (-NH₂) grubu ile GA'nın karbonil grubunun (C=O) reaksiyona girdiğini göstermektedir [22]. Reaksiyonun varlığı ve gözlemlenen bant, yapının çapraz bağlandığını kanıtlamaktadır. HA'nın yapısındaki karboksil gruplarının (C=O) gerilme bandı CS-HA-1'de 1556.8 cm^{-1} 'de ve CS-HA-2'de 1541.3 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir. CS-GEL'in 1600 cm^{-1} civarındaki tepe noktası C=O eğilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. GEL-HA'da ise 1600 cm^{-1} civarında C=O germe titreşiminin oluşturduğu pik görülmektedir (Şekil 8) [23].

GEL-HA'nın 1615 cm^{-1} ve 1415 cm^{-1} 'deki pikleri, karboksil gruplarının asimetric ve simetric germe titreşimi oluşturmaktadır [24]. GEL bileşenlerinden kaynaklanan CS-GEL'in 1546.3 cm^{-1} 'deki ve GEL-HA'nın 1546.3 cm^{-1} 'deki pikleri, C-N'nin germe titreşimini ve ikincil amid N-H'nin bükülme titreşiminden kaynaklanmaktadır [23]. GEL-HA'nın

1450 cm^{-1} 'deki tepe noktası, C-O esneme bandını göstermektedir [24]. CS-HA-1'de 1405.8 cm^{-1} 'de tepe noktası C-H bükülme bantlarıdır. CS-2'de 1377 cm^{-1} 'deki pik ise O-H gruplarının bükülme pikidir (Şekil 8).

CS hidrojellerinin parmak izi bölgesi olarak bilinen bölgede, CS yapısından kaynaklanan spesifik eter bağı (C-O-C) ve primer alkollerin neden olduğu C-OH bağı sırasıyla, CS-2'de 1150.8 cm^{-1} ve 1061.2 cm^{-1} 'de, CS-HA-1'de 1151.2 cm^{-1} , 1062.5 cm^{-1} 'de ve 1027 cm^{-1} 'de, CS-HA-2'de 1151.8 cm^{-1} ve 1026 cm^{-1} 'de ve CS-HA-GEL'de 1151.2 cm^{-1} 'de ve 1027.9 cm^{-1} 'de görülmüştür. Ayrıca HA'nın etkisiyle GEL-HA'de 1151.2 cm^{-1} ve 1062.5 cm^{-1} arasında C-O-C gerilim bantları oluşmuştur. GEL-HA'nın 1080 cm^{-1} 'deki piki, C-H bükülmenin ester bandını göstermektedir (Şekil 8) [24].

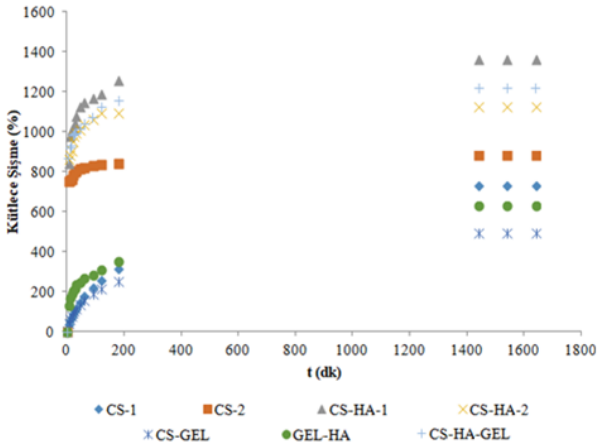
CS-HA-1 ve CS-HA-2 FTIR spektrumları karakteristik olarak benzerlik gösterse de CS-HA-2'nin 600 cm^{-1} 'deki piki HAP'ın hidroksil iyonlarının titreşiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca CS-HA-2'deki 1026 cm^{-1} ve 558.7 cm^{-1} 'deki pikleri HAP'taki

fosfat eğilme titreşimini ifade etmektedir. 1060 cm^{-1} civarında ve 897 cm^{-1} 'deki tepe noktaları da HAP'taki fosfat titreşimi ve fosfat gerilmesidir. CS-HA-2 FTIR spektrumu üzerinde görülen tüm karakteristik tepe noktaları, CS, HA ve HAP arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon oluşmadığını kanıtlamıştır. Ayrıca CS-HA-1'de 880 cm^{-1} civarındaki tepe noktası CS ve HA'nın CHO grupları arasında oluşan reaksiyonu kanıtlamaktadır (Şekil 8).

Şekil 8'deki CS-HA-GEL spektrumu üzerinde CS, HA ve GEL'e ait karakteristik piklerin görülmesi bu hidrojelde üç polimerin varlığını kanıtlamaktadır [25].

Hidrojellerin FTIR spektrumu değerlendirildiğinde, CS-2 ve CS-HA-2'in Taşdelen ve diğerleri, CS-HA-1'in Tomihata ve Ikadan, CS-GEL'in Lv ve diğerleri, GEL-HA'nın Zhang ve diğerleri ve CS-HA-GEL'in Bazmandeh ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen verilerle uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 8) [15, 23-26].

Hidrojellerin distile su içerisindeki kütlece şişmeleri (2) ile hesaplanarak Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Hidrojellerin kütlece şişmeleri

En yüksek kütlece şişme CS-HA-1'de görülmüştür. CS'ye HA eklenmesiyle kütlece şişmenin arttığı saptanmıştır (Şekil 9). Bu durum HA'nın yüksek su tutma yeteneği, yapıya esneklik sağlaması ve gözenek boyutlarını arttırmasıyla oluşmaktadır [17]. CS-HA-GEL'nin CS-GEL, GEL-HA ve CS-HA-2'den daha yüksek; CS-HA-1'den daha düşük kütlece şişmeye sahip

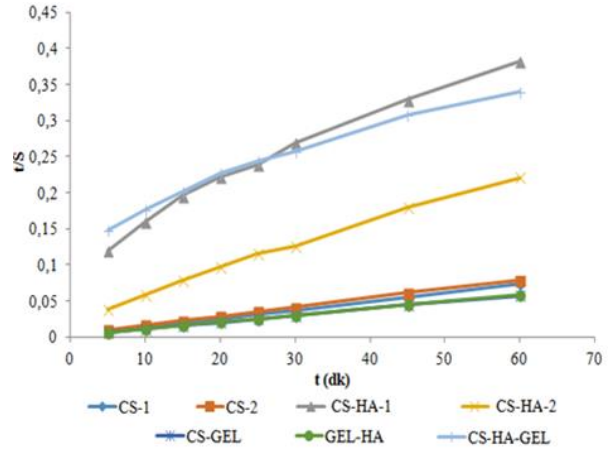
olduğu görülmüştür (Şekil 9).

Kütlece en düşük şişme ise CS-GEL'de gözlemlenmiş ve GEL-HA'nın kütlece şişmesi en düşük olan ikinci hidrojel olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). GEL'in kütlece şişmeyi azalttığı saptanmıştır. CS'ye GEL eklendiğinde polimer zincirleri arasında fiziksel dolaşma gerçekleşerek yapının yoğunluğu artmaktadır. Bu yoğunluk artışı da kütlece şişmenin azalmasına sebep olmaktadır [23].

4.1 Şişme Kinetiği

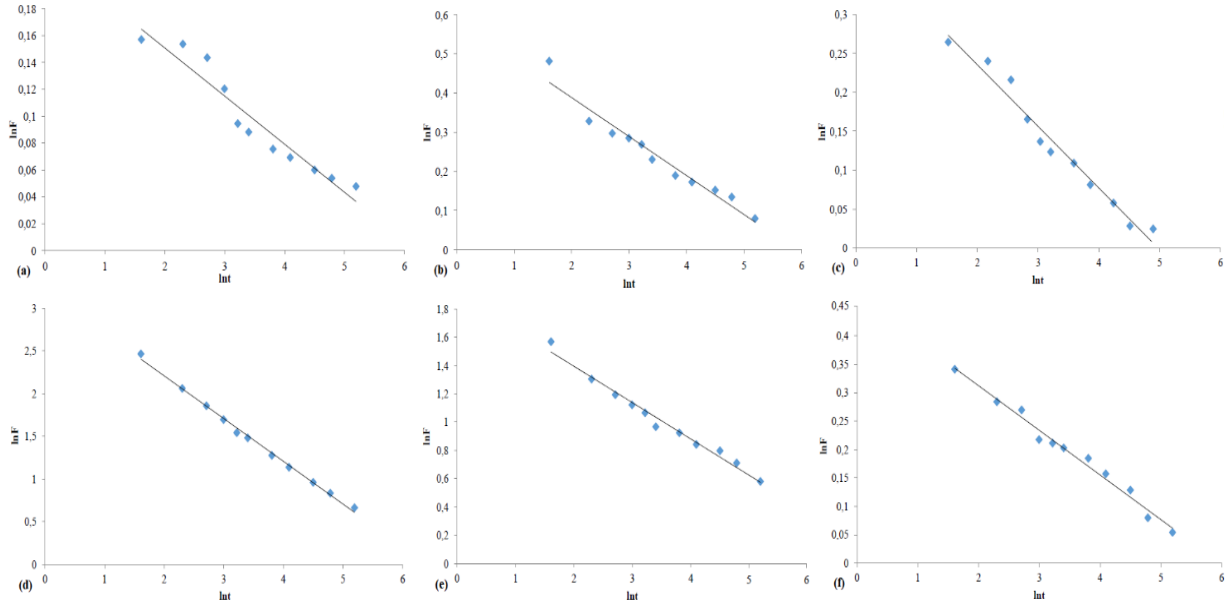
Schott'un hidrojellerin yüksek hacimlerde şişmesini ikinci derece kinetik ile açıklayan model (4) ve (5)'te tanımlanmıştır. Fick Kanunu ise hidrojellerin şişmesini transportun, difüzyonun konsantrasyon gradiyentine bağlıyla açıklamaktadır. Polimer yapıların difüzyon mekanizmasındaki "güç kanunu modeli" (6)'da verilmiştir [27]. Güç kanunu modelinde (7) kullanılarak difüzyonel üstel n ve k değerleri bulunur ve (8) ile hidrojellerin difüzyonu belirlenir.

Hidrojellerin distile suda dinamik şişme testleriyle kütlece şişmelerinden t/S grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 10).



Şekil 10. Hidrojellerin t/S oranlarının zamana göre değişimi

Kütlece şişmeler (7)'de kullanılarak hidrojellerin $\ln F/\ln t$ grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 11). t/S grafiklerinin eğimi (5)'te kullanılarak S_{eq} (Teorik) ve k_s değerleri hesaplanmıştır. $\ln F/\ln t$ grafiklerinin eğimleri de (8)'de kullanılarak hidrojellerin difüzyonu belirlenmiştir (Tablo 2).



Şekil 11. Hidrojellerin $\ln F/\ln t$ grafikleri a) CS-2 b) CS-HA-1 c) CS-HA-2 d) CS-GEL e) GEL-HA f) CS-HA-GEL

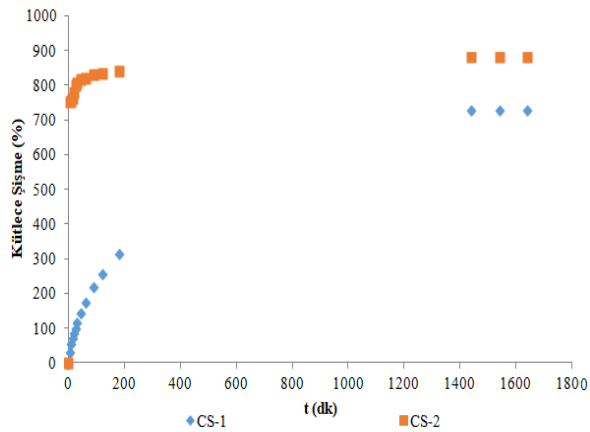
Tablo 2. Hidrojellerin jelleşme yüzdeleri, S_{eq} değerleri ve difüzyonu

Hidrojel	Jelleşme (%)	S_{eq} (Teorik)	S_{eq} (Uygulama)	$k_s \times 100$	$k_x \times 100$	n	D (cm^2/dk)
CS-1	92	434.8	728.3	0.003	36.8	0.18	4.31×10^{-24}
CS-2	86	833.3	882.1	0.09	80.1	0.04	3.71×10^{-23}
CS-HA-1	87	1250	1363	0.017	55.6	0.09	2.14×10^{-10}
CS-HA-2	91	1111	1124.5	0.027	67.5	0.07	1.60×10^{-12}
CS-GEL	84	303.1	490.8	0.007	4.04	0.49	6.3×10^{-25}
GEL-HA	84	370.4	630.5	0.017	14.8	0.26	2.54×10^{-24}
CS-HA-GEL	87	1111	1223.2	0.021	62.5	0.08	2.39×10^{-12}

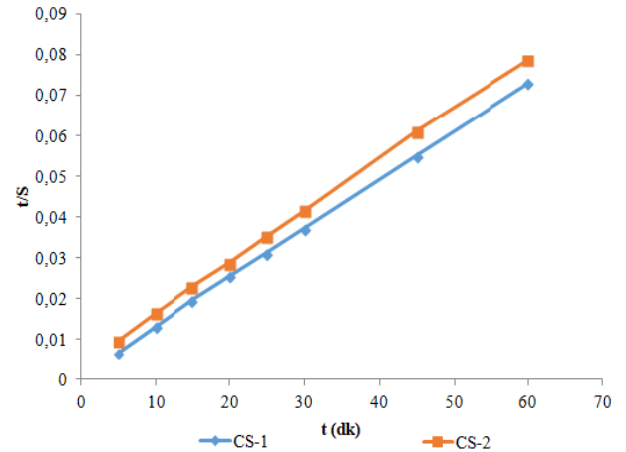
Hidrojellerin şişmesi Schott'un ileri sürdüğü modele ve ikinci dereceden difüzyon kinetiğine uymaktadır (Şekil 10). Hidrojellerin şişmesinin denge anına ulaştığı S_{eq} (Uygulama) ve hesaplanan S_{eq} (Teorik) verileri birbirleriyle uyumludur (Tablo 2).

Hidrojellerin kütlece şişmeleri arttıkça difüzyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Hidrojellerin n değerleri 0.5'ten küçük olduğundan Fickian difüzyon mekanizması görülmüştür. Hidrojellerin jelleşme yüzdeleri %84 ile %92 arasındadır (Tablo 2).

4.2. Çapraz Bağlayıcı Konsantrasyonu Etkisi



Şekil 12. Farklı konsantrasyonda çapraz bağlayıcı ile sentezlenen CS hidrojellerinin kütlece şişmeleri

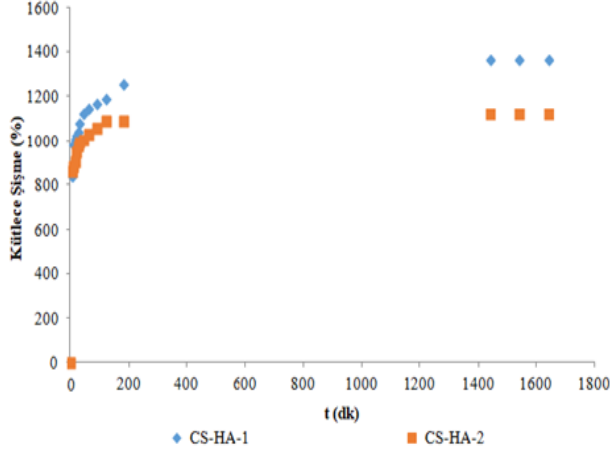


Şekil 13. Farklı konsantrasyonda çapraz bağlayıcı ile sentezlenen CS hidrojellerinin t/S değişimi

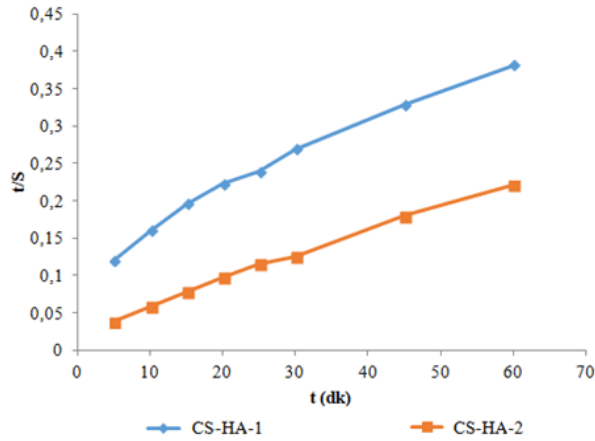
CS-2 (%0.4 GA)'nin CS-1 (%0.6 GA)'e göre daha yüksek kütlece şişme ve t/S oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 12-13). GA derişiminin artmasıyla kütlece şişme azalmakta ve difüzyon hızı yavaşlamaktadır. Çapraz bağlayıcının yüksek derişimde olması polimer zincirlerinin birbirine daha sıkı bağlanmasına ve yapıdaki boşlukların azalmasıyla beraber gözeneklerin daralmasına neden olmaktadır. Bu durum yüksek derişimde kütlece şişmede azalma ve difüzyonda yavaşlama meydana getirmektedir [28].

4.3. Farklı Çapraz Bağlayıcı Etkisi

CS-HA'da çapraz bağlayıcı olarak GA'nın tercih edilmesi HAP'a göre daha yüksek kütlece şişme ve t/S oranı sağlamıştır (Şekil 14-15). HAP, polimer zincirlerini daha sıkı bağladığından daha az miktarda çözücü hidrojel yapısına girebilmektedir. Bu durum HAP'ın çapraz bağlayıcı kullanımında daha düşük ve yavaş kütlece meydana getirmektedir.



Şekil 14. Farklı çapraz bağlayıcılarla sentezlenen CS-HA'ların kütlece şişmeleri



Şekil 15. Farklı çapraz bağlayıcılarla sentezlenen CS-HA'ların t/S değişimi

5. Sonuçlar

Yumuşak doku genişleticiler, klinikte cerrahi uygulamalarda kullanılmaktadır. Yumuşak dokuların genişletilmesindeki üstünlükleri sebebiyle hidrojel sıklıkla tercih edilmektedir. Biyomedikal alanda yumuşak doku genişleticilerin pek çok kullanımı bulunmaktadır. Özellikle dental implant uygulamalarında osseointegrasyonun sağlanmasında yumuşak doku genişleticiler hayati önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, geliştirilmiş difüzyon ve şişme yeteneğine sahip yeni yumuşak doku genişletici hidrojellerin belirlenmesi amacıyla kitosan (CS), hyaluronik asit (HA) ve jelatin (GEL) biyoyumlu doğal polimerleri kullanılmıştır. Hidrojellerin, karakterizasyonu gerçekleştirilerek distile sudaki şişme kinetikleri incelenmiştir.

CS-1, CS-2, CS-HA-1, CS-GEL ve CS-HA-GEL -20 °C'de dondurularak ve CS-GEL serbest radikal zincir polimerizasyonu ile oda sıcaklığında jelleştirilmiştir. CS-HA-2 gama

radyasyonla ışınlanarak sentezlenmiştir. Hidrojellerin jelleşme yüzdeleri %84-92 arasındadır. FTIR spektroskopisi ve SEM analizleri literatürdeki çalışmalarla uyumludur ve hidrojellerin başarılı şekilde hazırlandığının kanıtıdır.

Çapraz bağlayıcı konsantrasyonunun artmasıyla kütlece şişmenin ve şişme hızının azaldığı belirlenmiştir. Çapraz bağlayıcının yüksek derişimde olması polimer zincirlerinin birbirine daha sıkı bağlanmasına neden olduğundan hidrojel yüzeyindeki gözenekler daralmakta ve kütlece şişmede azalmaktadır. Çapraz bağlayıcı olarak GA kullanımının HAP'a göre daha fazla ve daha hızlı kütlece şişmeye neden olduğu gözlemlenmiştir. HAP, polimer zincirlerini daha sıkı bağladığından hidrojel içerisine daha az miktarda çözücü molekül girebilmektedir. Bu durum da kütlece daha az ve yavaş şişmeye neden olmaktadır.

CS-HA-1 en yüksek kütlece şişmeye sahiptir. HA'nın yüksek miktarda su tutma kabiliyeti bilinmektedir. CS'ye HA ilave edilmesiyle hidrojel yapısının esnekliği ve gözenek boyutları artmıştır. GA çapraz bağlayıcısı CS ve HA zincirleri arasında ideal bağlanma sağlamıştır. CS'ye HA eklenmesiyle kütlece şişme kabiliyetinde gelişme sağlanmıştır. CS-GEL ise kütlece en düşük şişme göstermiştir. CS'ye GEL eklendiğinde, polimer zincirleri birbirleriyle fiziksel olarak dolaşmaktadır. Bu durum hidrojel yapısının yoğunluğunu arttırdığından kütlece şişme azalmaktadır. GEL'in kütlece şişmeyi düşürdüğü saptanmıştır. Hidrojellerin şişmeleri Schott'un ileri sürdüğü modele ve ikinci dereceden difüzyon kinetiğine uymaktadır. Kütlece şişme yüzdeleri arttıkça difüzyon katsayıları da artmaktadır. Hidrojellerin n değerleri 0.5'ten küçüktür. Fickian difüzyon mekanizması görülmüştür.

Veriler, en yüksek kütlece şişmeye ve en uygun şişme profiline sahip hidrofilik yapıları CS-HA-1 hidrojelinin biyomedikal uygulamalarda yumuşak doku genişletici olarak kullanılabileceği göstermektedir.

Yazar Katkısı

Literatür taraması – Ö.F.G; Araştırma – Ö.F.G; Deneysel performans – Ö.F.G; Yazan – Ö.F.G; İnceleme ve düzenleme – B.T., U. A.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- [1] Caló, E. ve Khutoryanskiy, V.V., "Biomedical Applications of Hydrogels: A Review of Patents and Commercial Products", *European polymer journal*, 65., 252-267, 2015.
- [2] Zohouriaan-Mehr, M. ve Kabiri, K., "Superabsorbent Polymer Materials: A Review", *Iranian polymer journal*, 17(6), 451-447, 2008.
- [3] Yang, J.M., Olanrele, O.S., Zhang, X., Hsu, C.C., "Fabrication of Hydrogel Materials for Biomedical Applications", *Advances in experimental medicine and biology*, 1077., 197-224, 2018.
- [4] Küçük Kurt, S. ve Alpaslan, G., "Yumuşak Doku Genişletici Materyaller ve Oral & Maksillofasiyal Cerrahide

- Kullanımları", *Atatürk üniversitesi diş hekimliği fakültesi dergisi*, 26(4), 0-0, 2016.
- [5] Wiese, K.G., "Osmotically Induced Tissue Expansion with Hydrogels: A New Dimension in Tissue Expansion? A Preliminary Report", *Journal of cranio-maxillo-facial surgery: official publication of the european association for cranio-maxillo-facial surgery*, 21(7), 309–313, 1993.
- [6] Pikos, M.A., "Block Autografts for Localized Ridge Augmentation: Part II. The Posterior Mandible", *Implant dentistry*, 9(1), 67–75, 2000.
- [7] Kaner, D. ve Friedmann, A., "Soft Tissue Expansion with Self-Filling Osmotic Tissue Expanders Before Vertical Ridge Augmentation: A Proof of Principle Study", *Journal of clinical periodontology*, 38(1), 95–101, 2011.
- [8] Von See, C., Gellrich, N.C., Jachmann, U., Laschke, M.W., Bormann, K.H., Rücker, M., "Bone Augmentation After Soft-Tissue Expansion Using Hydrogel Expanders: Effects on Microcirculation and Osseointegration", *Clinical oral implants research*, 21(8), 842–847, 2010.
- [9] Neumann, C.G., "The Expansion of An Area of Skin by Progressive Distention of A Subcutaneous Balloon; Use of the Method for Securing Skin for Subtotal Reconstruction of the Ear", *Plastic and reconstructive surgery (1946)*, 19(2), 124–130, 1957.
- [10] Austad, E.D. ve Rose, G.L., "A Self-Inflating Tissue Expander", *Plastic and reconstructive surgery*, 70(5), 588–594, 1982.
- [11] Downes, R., Lavin, M., Collin, R., "Hydrophilic Expanders for the Congenital Anophthalmic Socket", *Advances in ophthalmic plastic and reconstructive surgery*, 9, 57–61, 1992.
- [12] Zeiter, D.J., Ries, W.L., Weir, T.L., Mishkin, D.J., Sanders, J.J., "The Use of A Soft Tissue Expander in An Alveolar Bone Ridge Augmentation for Implant Placement", *The international journal of periodontics & restorative dentistry*, 18(4), 403–409, 1998.
- [13] Miranda, D.G., Malmonge, S.M., Campos, D.M., Attik, N.G., Grosogeat, B., Gritsch, K., "A Chitosan-Hyaluronic Acid Hydrogel Scaffold for Periodontal Tissue Engineering", *Journal of biomedical materials research, part B: applied biomaterials*, 104(8), 1691–1702, 2016.
- [14] Ahmadian, E., Eftekhari, A., Dizaj, S.M., Sharifi, S., Mokhtarpour, M., Nasibova, A.N., Khalilov, R., Samiei, M., "The Effect of Hyaluronic Acid Hydrogels on Dental Pulp Stem Cells Behavior", *International journal of biological macromolecules*, 140, 245–254, 2019.
- [15] Taşdelen, B., Erdoğan, S., Bekar, B., "Radiation Synthesis and Characterization of Chitosan/Hyaluronic Acid/Hydroxyapatite Hydrogels: Drug Uptake and Drug Delivery Systems", *Materials today: proceedings*, 5(8), 15990–15997, 2018.
- [16] Gonçaves, V.L., Laranjeira, M.C.M., Fávère, V.T., Pedrosa, R.C., "Effect of Crosslinking Agents on Chitosan Microspheres in Controlled Release of Diclofenac Sodium", *Polímeros: ciência e tecnologia*, 15(1), 6-12, 2005.
- [17] Kathuria, N., Tripathi, A., Kar, K.K., Kumar, A., "Synthesis and Characterization of Elastic and Macroporous Chitosan-Gelatin Cryogels for Tissue Engineering", *Acta biomaterialia*, 5(1), 406–418, 2009.
- [18] Peniche, C., Cohen, M.E., Vazquez, B., Roman, J.S., "Water Sorption of Flexible Networks Based on 2-Hydroxyethyl Methacrylate-Triethylenglycol Dimethacrylate Copolymers", *Polymer*, 38(24), 5977-5982, 1997.
- [19] Azizian S., "Kinetic Models of Sorption: A Theoretical Analysis", *Journal of colloid and interface science*, 276(1), 47–52, 2004.
- [20] Peppas, N.A. ve Franson, N.M., "The Swelling Interface Number As A Criterion for Prediction of Diffusional Solute Release Mechanisms in Swellable Polymers", *Journal of polymer science: polymer physics edition*, 21(6), 983–997, 1983.
- [21] Dengre, R., Bajpai, M., Bajpai, S.K., "Release of Vitamin B12 from poly(N-vinyl-2-pyrrolidone)-Crosslinked Polyacrylamide Hydrogels: A Kinetic Study", *Journal of applied polymer science*, 76, 1706-1714, 2000.
- [22] Drury, J.L., ve Mooney, D.J., "Hydrogels for Tissue Engineering: Scaffold Design Variables and Applications", *Biomaterials*, 24(24), 4337–4351, 2003.
- [23] Lv, B., Bu, X., Da, Y., Duan, P., Wang, H., Ren, J., Ma, J., "Gelatin/PAM Double Network Hydrogels with Super-Compressibility", *Polymer*, 210(23), 123021, 2020.
- [24] Zhang, F., He, C., Cao, L., Feng, W., Wang, H., Mo, X., Wang, J., "Fabrication of Gelatin-Hyaluronic Acid Hybrid Scaffolds with Tunable Porous Structures for Soft Tissue Engineering", *International journal of biological macromolecules*, 48(3), 474–481, 2011.
- [25] Bazmandeh, A.Z., Mirzaei, E., Fadaie, M., Shirian, S., Ghasemi, Y., "Dual Spinneret Electrospun Nanofibrous/Gel Structure of Chitosan-Gelatin/Chitosan-Hyaluronic Acid As A Wound Dressing: In-vitro and In-vivo Studies", *International journal of biological macromolecules*, 162, 359–373, 2020.
- [26] Tomihata, K. ve Ikada, Y., "Crosslinking of Hyaluronic Acid with Glutaraldehyde", *Journal of polymer science, part A: polymer chemistry*, 35(16), 3553-3559, 1997.
- [27] Ganji, F., Vasheghani-Farahani, S., Vasheghani-Farahani, E., "Theoretical Description of Hydrogel Swelling: A Review", *Iranian polymer journal*, 19(5), 375-398, 2010.
- [28] Doğu, Y. ve Okay, O., "Swelling-Deswelling Kinetics of poly(N-isopropylacrylamide) Hydrogels Formed in PEG Solutions", *Journal of applied polymer science*, 99(1), 37–44, 2006.

Araştırma Makalesi

PES/CO Kumaşlarda Geri Dönüştürülmüş PES ve Virjin PES Kullanımının Etkisi

Rıza ATAV^{1,*}, Selma SOYSAL², Fatma YILDIZ³

¹Textile Engineering, Çorlu Engineering Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye, 59860

^{2,3}Gülle Tekstil A.Ş., Tekirdağ, Türkiye, 59870

¹ratav@nku.edu.tr, ²selma.soysal@gulletekstil.com.tr,

³fatma.tok@gulletekstil.com.tr

Geliş: 02.11.2023

Kabul: 06.12.2023

DOI: 10.55581/ejeas.1385246

Öz. Bu çalışmada, PES kısmında virjin lif veya geri dönüştürülmüş lif kullanılması yoluyla üretilen belirli bir renge sahip PES/CO karışımı kumaşın iplik ve kumaş performans özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Virjin elyaftan kumaş üretimi ile geri dönüştürülmüş elyaftan kumaş üretimi arasında ürün performans özelliklerinin karşılaştırılmasının ötesinde, bu üretim rotasının çevresel etkilerinin ortaya çıkarılması da amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, PES/CO karışımı kumaş üretimi sırasında virjin elyaf yerine geri dönüştürülmüş poliestere kullanılacağı ve renk ve haslık açısından olduğu kadar, kumaşın genel görünümü ve fiziksel-teknolojik özellikleri açısından da %100 virjin liflerden elde edilen kumaşın sahip olduğu standartlara yakın olacağı belirtilebilir. Ayrıca geri dönüştürülmüş lif kullanılması durumunda bir atık geri dönüştürüldüğü için önemli çevresel faydalar sağlanacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Poliestere/pamuk karışımı, virjin lif, geridönüşüm, çevresel fayda.

Effect of Using Recycled PES versus Virgin PES in PES/CO Fabrics

Abstract: In this study, it was aimed to compare the yarn and fabric performance properties of a certain color PES/CO blended fabric produced using virgin fiber or recycled fiber in the PES component. Beyond comparing the product performance characteristics between the production of fabric from virgin fiber and the production of fabric from recycled fiber, it was also aimed to reveal the environmental effects of this production route. According to the obtained results, it can be said that recycled polyester can be used instead of virgin fiber during the production of PES/CO blended fabric and that it will be close to the standards provided by the fabric produced from 100% virgin fiber in terms of color and fastness, as well as the general appearance and physical-technological properties of the fabric. It is also thought that if recycled fiber is used, significant environmental benefits will be achieved due to the recycling of waste.

Keywords: Polyester/cotton blend, virgin fiber, recycled, environmental benefit.

1. Giriş

Çevrenin korunması ve atıkların geri dönüşümü, bilimsel ve endüstriyel topluluğun karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan ikisi hâline gelmiştir [1]. Bu nedenle tekstil

sektöründe geri dönüşüm konusu giderek artan bir önem kazanmıştır.

Tekstil atıkları, uygun bir geri dönüşüm metodolojisi ile katma değeri yüksek ürünlerin geliştirilmesi için hammadde olabilir [2]. Tekstil endüstrisinde yaygın kullanımı ve mükemmel

* Corresponding author:

E-mail address: ratav@nku.edu.tr (R.Atav)

performansı nedeniyle tüm dünyada poli(etilen tereftalat) (PET) liflerine büyük bir talep vardır. PET lifleri her yıl dünyadaki tüm lif türlerinin neredeyse %40'ını oluşturmaktadır. PET atıklarının kullanılmasıyla rejenere PET üretim prosesinin daha az kirlilik ve düşük üretim maliyeti gibi avantajları vardır. Virjin liflerle karşılaştırıldığında, geri dönüştürülmüş liflerin kalitesi, geçmiş yıllarda bu liflerin pazardaki yayılımı açısından büyük bir kısıtlayıcı faktör olmuştur [3]. Öte yandan karışım kumaşlar çeşitli avantajlarından dolayı tekstil sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Karışımlar, fiziksel veya kimyasal özellikleri bakımından farklılık gösteren birçok lif polimerinin oluşturabileceği popülasyon olasılıklarını ifade eder [4]. Karışımlar, giyim konforunu optimize etmek ve ayrıca moda sektörüne yeni trendler sunmak amacıyla tüketicilerin yükselen taleplerini karşılamak için anahtar kelime hâline gelmiştir. Poliester liflerinin pamuk veya viskon ile karışımları daha fazla miktarda üretilmektedir [5].

Poliester lifleri, yüksek mukavemet, kolay yıkanabilirlik, iyi dayanıklılık ve aşınma ile kırılmama gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle tüm sentetik lifler arasında birinci sırayı almıştır [6]. Öte yandan poliester kumaşların neme karşı çok az ilgisi vardır, yani oleofiliktirler ve tüylenmeye eğilimlidirler [7]. Poliesterin selülozik liflerle karışımındaki amaç esas olarak su emiciliği ve giysi konforunu artırmaktır [8].

Literatürde geri dönüştürülmüş liflerin kullanımına ilişkin çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [9-14]. Ancak geri dönüştürülmüş pamuk ve poliester liflerinin PES/CO karışımı kumaş üretiminde kullanımına yönelik çalışmaların sayısının fazla olduğu söylenebilir. Geri dönüştürülmüş kumaşın performans özelliklerinin virjin kumaşla karşılaştırılması, virjin elyaf yerine geri dönüştürülmüş elyaf kullanabilme potansiyelini anlamak için faydalı olacaktır. Dolayısıyla bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı söylenebilir.

Önceki çalışmamızda PES/CO karışımı kumaşlarda virjin pamuk elyafı veya geri dönüştürülmüş pamuk elyafı kullanımına ilişkin sonuçlar verilmiştir [15]. Bu çalışmada, PES kısmında virjin lif veya geri dönüştürülmüş lif kullanılması yoluyla üretilen belirli bir renge sahip PES/CO karışımı kumaşın iplik ve kumaş performans özelliklerinin karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Virjin elyaftan kumaş üretimi ile geri dönüştürülmüş elyaftan kumaş üretimi durumunda elde edilen ürün performans özelliklerinin karşılaştırılmasının ötesinde, bu üretim rotasının çevresel etkilerinin de ortaya koyulması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

%50/50 PES/CO karışımı kumaşlar, virjin ve geri dönüştürülmüş poliester kullanılarak üretilmiştir. Bu kumaşların boyanmasında iki banyolu boyama yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada PES bileşeni dispers boyalarla, ikinci aşamada ise pamuk bileşeni reaktif boyalarla boyanmıştır. Daha sonra patlama mukavemeti (ISO 13938-2), haslık (yıkama ISO-105 C06, kuru ve yaş sürtme (ISO 105-X12), su (ISO 105-E01), alkali ve asidik ter (ISO 105-E04), tükürük haslığı (GB/T 1886-2009)) testleri tüm kumaş numunelerine uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin refleksiyon (R%) değerlerinin belirlenmesi için Datacolor 850

spektrofotometre (D 65/10°) kullanılmıştır. Ardından Kubelka-Munk denklemi kullanılarak renk verimi (K/S) değerleri aşağıda verilen formüle göre bulunmuştur;

$$K/S = (1 - R)^2 / 2R \quad (1)$$

R: Maksimum absorpsiyon dalga boyundaki refleksiyon değeri

K: Absorpsiyon katsayısı

S: Saçılma katsayısı

3. Bulgular ve Tartışma

Üretilen ipliklerin USTER test değerleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. İpliklerin USTER test değerleri

Özellik	50% Virjin Pamuk / 50% Virjin Poliester	50% Virjin Pamuk / 50% Geri Dönüştürülmüş Poliester
Gramaj (g/m ²)	169	195
Um %	10,4	14,9
İnce yer (- 50%)	0,5	41,5
Kalın yer (+50%)	148,5	1230
Neps (-200)	479,3	3075
Neps (+280)	207,3	1050
Tüylülük (H)	5,71	7,28
Mukavemet (cN/tex)	21,14	19,98
Elastikiyet	8,75	8,11
İplik numarası (Ne)	30	30,2
İplik CV (Ne)	0,83	1,5
Büküm T/m	797	768
Büküm % CV	4,54	4,07
Parafin Ortalaması [μ]	0,09	0,29
Nem	5	6,30

Tablo 1 incelendiğinde, virjin PES kullanılarak üretilen 50/50 PES/CO karışımı iplik için ince yer-kalın yer, tüylülük, neps gibi değerlerin oldukça iyi olduğu ancak %50 geri dönüştürülmüş poliester elyaf kullanıldığında bu değerlerin bozulduğu görülmektedir. Ancak iplik bükümü, iplik numarası, mukavemet ve elastikiyet değerleri arasında anlamlı bir fark gözlenmemiştir.

Üretilen kumaşların fotoğrafları Şekil 1'de verilmektedir. Virjin ve geri dönüştürülmüş poliester liflerinden üretilen kumaşların renk verimi (K/S) ve CIE L*a*b* değerleri Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 1. Virjin ve geri dönüştürülmüş poliester lifleri kullanılarak üretilen kumaş numunelerinin fotoğrafları

Tablo 2. Virjin ve geri dönüştürülmüş poliester liflerinden üretilen kumaşların renk verimi (K/S) ve CIE L*a*b* değerleri

Kumaş	L*	a*	b*	C*	h°	K/S
Virjin	40,89	50,91	17,91	53,97	19,38	11,39
Geri Dönüştürülmüş	43,04	51,52	19,96	55,25	21,18	13,51

Tablo 2’de verilen değerlerden geri dönüştürülmüş poliester kullanılarak üretilen kumaşın renk nüansının, virjin poliesterden üretilen kumaşa göre daha kırmızı (daha yüksek a* değeri) ve daha sarı (daha yüksek b* değeri) olduğu söylenebilir.

Numunelerin yıkama, su, kuru ve yaş sürtme, alkali ve asidik ter ve tükürük haslığı testi (lekelenme) sonuçları Tablo 3-5’te verilmektedir. Her bir haslık testi için renk değişim değerleri her iki kumaş tipi için de 4/5 olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Geri dönüştürülmüş ve virjin poliester liflerinden üretilen kumaşların yıkama ve su haslığı test değerleri

	Yıkama Haslığı						Su Haslığı					
	WO	PAC	PES	PA	CO	CA	WO	PAC	PES	PA	CO	CA
50% Virjin Pamuk / 50% Virjin PES	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
50% Virjin Pamuk / 50% Geri Dönüştürülmüş PES	4/5	4/5	4/5	2/3	4	3/4	4/5	4/5	4/5	4	4	4

Tablo 4. Geri dönüştürülmüş ve virjin poliester liflerinden üretilen kumaşların alkali ve asidik ter haslığı test değerleri

	Asidik Ter Haslığı						Alkali Ter Haslığı					
	WO	PAC	PES	PA	CO	CA	WO	PAC	PES	PA	CO	CA
50% Virjin Pamuk / 50% Virjin PES	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
50% Virjin Pamuk / 50% Geri Dönüştürülmüş PES	4/5	4/5	4/5	3/4	4	4/5	4/5	4/5	4/5	3/4	4	4/5

Tablo 5. Geri dönüştürülmüş ve virjin poliester liflerinden üretilen kumaşların tükürük ve sürtünme haslığı testi değerleri

	Tükürük Haslığı						Sürtünme Haslığı	
	WO	PAC	PES	PA	CO	CA	Kuru	Yaş
50% Virjin Pamuk / 50% Virjin PES	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	3/4
50% Virjin Pamuk / 50% Geri Dönüştürülmüş PES	4	4/5	4	3/4	3/4	3/4	4/5	3/4

Genel olarak virjin PES veya geri dönüştürülmüş PES kullanılarak üretilen kumaşların haslık değerlerinin oldukça iyi olduğu söylenebilir ancak geri dönüştürülmüş elyaf kullanılması durumunda haslık değerlerinin özellikle PA üzerindeki lekelenmede bir miktar düştüğü söylenebilir. Kumaş numuneleri aynı zamanda patlama mukavemeti açısından da test edilmiştir ve sonuçlar Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 6. Geri dönüştürülmüş ve virjin poliester liflerinden üretilen kumaşların patlama mukavemeti değerleri

	Patlama Mukavemeti		
	KPA	mm	Saniye
50% Virjin Pamuk / 50% Virjin PES	233	28,42	19
50% Virjin Pamuk / 50% Geri Dönüştürülmüş PES	195	59,52	20,4

Tablo 6’dan görülebileceği gibi, geri dönüştürülmüş lif kullanılan kumaşların patlama mukavemeti daha düşüktür.

Ayrıca kumaş tutumları da subjektif yöntemle karşılaştırıldığında, tutumun terbiye işlemleriyle iyi dengelendiği ve virjin elyaftan üretilen kumaşa eşit olmasa da ona benzer bir performans elde edilebileceği söylenebilir.

Üretilen kumaşların (%50 Pamuk / %50 Poliester) maliyet analizleri de yapılmış olup sonuçlar Tablo 7’de verilmektedir.

Tablo 7. Geri dönüştürülmüş ve virjin poliester liflerinden üretilen kumaşların maliyet karşılaştırması

Maliyet Kalemi	Virjin poliester yerine geri dönüştürülmüş poliester kullanılması durumunda maliyet değişimi
Pamuk (\$/kg)	0
Poliester (Virjin/Geri Dönüştürülmüş) (\$/kg)	+%13
İplik (\$/kg)	+%10
Örme (\$/kg)	0
Boyama/Yıkama (\$/kg)	0
Apri (\$/kg)	0
Toplam (\$/kg)	+%10

Tablo 7 incelendiğinde geri dönüştürülmüş lif içeren kumaşların üretim maliyetlerinin %100 virjin lif kullanımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni geri dönüştürülmüş PES lifinin daha pahalı olması ve dolayısıyla geri dönüştürülmüş PES’ten iplik üretim maliyetinin daha yüksek olmasıdır. Örme, boyama ve terbiye işlemleri her iki kumaşta da aynı olduğundan bu işlemler açısından maliyet farkı oluşmamaktadır.

4. Sonuç

Yapılan çalışmalar sonucunda PES/CO karışımı kumaş üretimi sırasında virjin elyaf yerine geri dönüştürülmüş poliester kullanılabilirliği ve bu kumaşın özelliklerinin renk ve haslık açısından olduğu kadar kumaşın genel görünümü ve fiziksel-teknolojik özellikleri açısından da %100 virjin liften üretilen kumaşın sağladığı standartlara yakın olacağı söylenebilir. Ayrıca geri dönüştürülmüş lif kullanılması durumunda atıkların geri dönüştürülmesi nedeniyle önemli çevresel faydalar elde edileceği düşünülmektedir.

Deneyel sonuçlara göre, PES/CO karışımı kumaşların PES bileşeninde geri dönüştürülmüş lif kullanılması durumunda, PES/CO karışımı kumaşta geri dönüştürülmüş pamuk kullanılan önceki çalışmamıza [12] kıyasla mekanik performans açısından daha başarılı sonuçlar alınabileceği söylenebilir.

Yazar Katkısı

Biçimsel analiz - Rıza ATAV (RA), Selma SOYSAL (SS), Fatma YILDIZ (FY); Araştırma – RA, SS, FY; Deneyel performans - SS; Veri toplama – SS, FY; Veri işleme – RA, SS; Literatür taraması – RA, SS; Yazan – RA, SS; İnceleme ve düzenleme - RA

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- [1] M.T. Halimi, M.B. Hassen, F. Sakli Cotton waste recycling: Quantitative and qualitative assessment, *Resour. Conserv. Recycl.*, 52 (2008), pp. 785-791
- [2] Vadicherla, T., & Saravanan, D. (2014). Textiles and Apparel Development Using Recycled and Reclaimed Fibers,

Book Chapter in “Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing”, 139-160.

[3] S.S. He, M.Y. Wei, M.H. Liu, W.L. Xue Characterization of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate) (PET) fibers, *J. Text. Inst.*, 106 (8) (2015), pp. 800-806

[4] Anış, P., & Eren, H.A. (2003). Poliester/Pamuk Karışımlarının Boyanması: Uygulamalar ve Yeni Yaklaşımlar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 8(1): 131-139.

[5] Shore, J. (1998). Blends Dyeing. *Society of Dyers & Colourists*, 169.

[6] Almetwally, A.A. (2022). Alkaline Hydrolysis of Polyester Woven Fabrics and Its Influence on Thermal Comfort Properties, *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(12): 259-274.

[7] Zeronian, S.H., Collins, M.J. (1989). Surface Modification of Polyester By Alkaline Treatments, *Textile Progress*, 20(2): 1-26.

[8] Kazan, C. (2015). Liflerin Kimyasal Modifikasyonu Yoluyla Poliester/Pamuk Karışımlarının Tek Banyoda Boyanabilirliğini Sağlayacak Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ-Türkiye

[9] Inoue, M., & Yamamoto, S. (2004). Performance and Durability of Woven Fabrics Including Recycled Polyester

Fibers, *Journal of Textile Engineering*, 50.

[10] Kurtoğlu Necef, Ö., Seventekin, N., & Pamuk, M. (2013). A Study on Recycling the Fabric Scraps in Apparel Manufacturing Industry, *Journal of Textile & Apparel*, 23(3), 286-289.

[11] Telli, A., Özdil, N. (2015). Effect of Recycled PET Fibers on the Performance Properties of Knitted Fabrics, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 10(2), 47-60.

[12] Yuksekkaya, M. E., Celep, G., Dogan, G., Tercan, M., Urhan, B. (2016). A Comparative Study of Physical Properties of Yarns and Fabrics Produced from Virgin and Recycled Fibers, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 11(2), 68-76.

[13] Ütebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2019). Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. *Journal of Cleaner Production*, 222, 29-35.

[14] Liu, Y., Huang, H., Zhu, L., Zhang, C., Ren, F., & Liu, Z. (2020). Could the recycled yarns substitute for the virgin cotton yarns: a comparative LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 2050-2062.

[15] Atav, R., Soysal, S., Yıldız, F. (2022). Could Dyeing Process Be Eliminated for PES/CO Fabrics Through Recycling?. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(1), 57-6