



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances
in Engineering and Pure Sciences

MARMARA JEPS



In the name of Rectorate of Marmara University, *Rector*
Prof. Dr. Mustafa KURT

In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, *Director*
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

Editor-in-Chief
Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Associate Editors
Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU

Editorial Boards

Dr. Aris Quantana NEDELCO,
Materials Science

Asst. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Chemical Engineering

Asst. Prof. Dr. Beste TURANLI,
Bioengineering

Prof. Dr. İsmail USTA,
Textile Engineering

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,
Bioengineering, Bioinformatics

Prof. Dr. Kozet BAKIRCI,
Environmental Engineering, Occupational Health
and Safety

Asst. Prof. Dr. Merve ER,
Industrial Engineering

Dr. Mohammad ALSUNAIDI,
Electrical and Electronics Engineering

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,
Mechanical Engineering-Energy

Asst. Prof. Dr. Z. Aysun ALTIKARDEŞ,
Computer Science and Medical Informatics

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,
Mechanical Engineering- System Dynamics and Mechanics

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Mathematics

Assoc. Prof. Dr. Ömer KORÇAK,
Computer Science and Engineering

Assoc. Prof. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,
Biology

Asst. Prof. Dr. Rosa Maria FLORES,
Environmental Engineering

Dr. Sergey V. DOROZHKIN,
Bio-Materials (Ceramics)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,
Physics

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,
Material Sciences

Assoc. Prof. Dr. Yeşim GÜRTÜĞ,
Architectural and Civil Engineering

Dr. Süleyman Enes HACIBEKTAŞOĞLU
Occupational Safety

Publishing Editor Arda ŞAHİN

Correspondance and Communication

Hayriye KORKMAZ
Electrical and Electronics Engineering,
Faculty of Technology, T4-211
Maltepe /İSTANBUL
Tel: +90 216 777 3830
hkorkmaz@marmara.edu.tr

Publisher

Marmara University Press
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, *Rektör*
Prof. Dr. Mustafa KURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, *Müdür*
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

Editör

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU

Editörler Kurulu

Dr. Aris Quantana NEDELCOŞ,
Malzeme Bilimleri

Dr. Öğretim Üyesi Berçem KIRAN YILDIRIM,
Kimya Mühendisliği

Dr. Öğretim Üyesi Beste TURANLI,
Biyomühendislik

Prof. Dr. İsmail USTA,
Tekstil Mühendisliği

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,
Biyomühendislik, Biyoinformatik

Prof. Dr. Kozet BAKIRCI,
Çevre Mühendisliği

Dr. Öğretim Üyesi Merve ER,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Mohammad ALSUNAIDI,
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,
Makine Mühendisliği- Enerji

Dr. Öğretim Üyesi Z. Aysun ALTIKARDEŞ
Bilgisayar Bilimleri ve Medikal Bilişim

Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,
Makine Mühendisliği- Sistem Dinamiği ve Mekaniği

Doç. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Matematik

Doç. Dr. Ömer KORÇAK,
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Doç. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,
Biyoloji

Dr. Öğretim Üyesi Rosa Maria FLORES,
Çevre Mühendisliği

Dr. Sergey V. DOROZHKIN,
Biyomalzemeler (Seramikler)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,
Fizik

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,
Malzeme Bilimleri

Doç. Dr. Yeşim GÜRTUĞ,
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

Dr. Süleyman Enes HACİBEKTAŞOĞLU
İş Güvenliği

Yayın Editörü

Arda ŞAHİN

Yazışmalar ve İletişim

Hayriye KORKMAZ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği,
Teknoloji Fakültesi, T4-211
Maltepe /İSTANBUL
Tel: +90 216 777 3830
hkorkmaz@marmara.edu.tr

Yayıncı

Marmara Üniversitesi Yayınevi
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

1. Görünür Işık Altında Indigo Karminin Fotodegradasyonunu Artırmak için CaTiO₃/g-C₃N₄ Heteroyapısının Sentezlenmesi

Özlem TUNA

Sayfa/Page:1-9

2. Çanakkale ilinde Ölçülen Meteorolojik Faktörlerin Troposferik Ozon Konsantrasyonlarına Etkileri

Hilal ARSLAN

Sayfa/Page:10-17

3. The Effect of Pressure on Anisotropic Elastic Properties of SbSeI:DFT Calculation

Tahsin ÖZER

Sayfa/Page:18-26

4. Web Tarayıcıları için Etkili Tohum URL Seçimi ve Kapsam Genişletme Algoritması

Zülfü ALNAOĞLU, M.Ali AKCAYOL

Sayfa/Page : 27-38

5. Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Şehirlerin Hava Kalitesi Tahmini

Mehtap ÖKLÜ, Pelin CANBAY

Sayfa/Page : 39-53

7. Dark Energy from the Scalar Field and Gauss-Bonnet Interactions

Dilek KAZICI

Sayfa/Page : 66-71

8. Prediction of the Production Quality During Flat Bottom Drilling of Low Lead Brass Alloy using Fuzzy Logic and Regression Models

Nima ZOGHIPOUR, Yusuf KAYNAK

Sayfa/Page : 72-80

9. Strongly Confined Electromagnetic Waves in a Hybrid Photonic-Plasmonic Resonator for Enhancing Light-Matter Interaction

Belkıs GÖKBULUT

Sayfa/Page : 81-88

10. Dövme ve Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Inconel 625 Alaşımlarının Termal Yöntemle Hızlı Delinmesinde Elektrot Aşınmasının İncelenmesi

Gürel ÇAM, Ferhat CERİTBİNMEZ, Ali GÜNEN, Uğur GÜROL

Sayfa/Page :89-99

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

11. Numerical Optimization of Gas Cooler Geometry in Transcritical Refrigeration Cycles
Ahmet Furkan URKUT, Efe Oğuzhan KARCI, Mehmed Rafet ÖZDEMİR
Sayfa/Page :100-115

12. Elektrikli Araçlarda Hava Giriş Konumu ve Hızının Batarya Soğutma Performansına Etkisinin Araştırılması
Hasan UZAL, Ramazan ŞENER, Hasan OKTAY
Sayfa/Page :116-124

13. Improving the Performance of Sentiment Analysis by Ensemble Hybrid Learning Algorithm with Nlp and Cascaded Feature Extraction
Ayşe Berna ALTINEL GİRĞİN, Sema ŞAHİN
Sayfa/Page:125-141

14. Yerel Elektrik Santral Büyüklüğünün ve Konumunun Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi
Tuba GÖZEL
Sayfa/Page:142-156

Derleme/ Review Articles

6. The Disruptive Nature of 3D Printing Technology on Mass Customization and Supply Chain In The Context of Environment and Economy
Gökçen BAYRAM, B. Gültekin ÇETİNER
Sayfa/Page: 54-65

Construction of CaTiO₃/g-C₃N₄ Heterostructure for Boosting Photodegradation of Indigo Carmine under Visible Light Illumination

Özlem TUNA¹ 

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, 77100 Yalova, Türkiye

Abstract

Graphitic carbon nitride (CN) modified CaTiO₃ (CTO) heterostructures were fabricated and utilized in photocatalytically indigo carmine (IC) decomposition. The CTO/CN(III) heterostructure exhibited the best photocatalytic performance for IC degradation under visible light irradiation. For the optimal sample, the apparent rate constants of the reaction were 1.69 and 10.50 times that of CN and CTO, respectively. This could be due to the satisfactory separation of photoinduced species in an easy way. The photocatalyst dosage increased the removal efficiency, while the initial dye concentration negatively affected the IC degradation rate. Under acidic condition, the catalyst showed superior degradation rate. Moreover, the superoxide radicals ($\bullet\text{O}_2^-$) was the most effective carrier for IC photodegradation and depending on the results of the trapping agent experiments, the possible photocatalytic reaction mechanism of CTO/CN(III) sample was proposed. In addition, the composite achieved considerable performance in ions-included water bodies, namely tap water and drinking water. This study provides a promising and stable photocatalyst as a graphitic carbon nitride modified with calcium-based perovskite for dye removal.

Keywords: CaTiO₃, graphitic carbon nitride, indigo carmine, photocatalyst

1. INTRODUCTION

Dye components have been detected in different water environments obtained from various industries especially textile and paint industries. Indigo carmine (IC), one of the oldest dyes, has been applied in foods, drugs, clothes. The occurrence of IC in water body has potential negative effects on human and aquatic organisms [1]. The removal of the organic dye in the industrial wastewater has become an important research subject in the field of environmental management. In this case, various attempts have been applied as physicochemical and biological methods, namely coagulation–flocculation, electrocoagulation, adsorption, ion exchange irradiation, ultrasound, membrane filtration, ozonation, electrochemical destruction [2,3]. Apart from these attempts, degrading the organic pollutant to CO₂ and H₂O by photo-induced process is one of the most promising way due to its the high efficiency and safety properties [1]. In this field, perovskites have been widely concerned as functional materials due to their unique features, namely excellent strong oxidation ability, durable stability, high compositional and structural flexibility [4]. Perovskites have been generally presented with the general formula ABO₃. In this crystal structure, the A site is occupied by the larger cation, while the B site is occupied by the smaller cation [5].

Calcium titanate (CaTiO₃), n-type semiconductor, is one of the most important perovskite material that shows satisfactory photoluminescent, and excellent dielectric polarization properties, resulting that it can be successfully used in optical and electrical applications [6]. However, the titanate-based perovskite has drawbacks, such as lack of active sites, wide band gap energy (3.4 eV), and weak charge carrier extraction, resulting in low photocatalytic degradation performance [7]. To overcome the drawbacks, research efforts have been dedicated to modulating the energy level of the perovskite that provides bandgap tuning toward the visible range and the efficient separation of electron-hole pairs. For that, recent approach is to construct heterojunction photocatalysts by incorporate CaTiO₃ perovskite with different structures.

Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) has been deemed as an efficient candidate to improve the activity of CaTiO₃ in photocatalysis field due to its excellent thermal and chemical stability with unique optoelectronic properties [8]. The polymeric carbon nitride is constructed by the building blocks of triazine or tri-s-triazine (heptazine) rings bridged with the conjugated N atoms to the 2D layer structure [9]. The free electrons of N atoms can provide activating under visible light illumination. However, the pure graphitic carbon nitride depicts low photocatalytic activity due to its high recombination rate of the photo-induced charge carriers [10]. In this point, the couple g-C₃N₄ with perovskites has been important to decrease the recombination rate of the electron-holes of the pristine g-C₃N₄. The incorporation of g-C₃N₄ with perovskites enable the band structure of the heterojunction to be well positioned, resulting in excellent visible light absorption and superior charge separation ability [11].

In this case of perovskite, LaFeO₃ [12-15], LaMnO₃ [16], LaNiO₃ [17,18] and SrTiO₃ [19-21] have been widely used to design the heterojunction photocatalyst. Besides these, CaTiO₃ has been utilized in the improvement of the graphitic carbon nitride of photocatalytic efficiency. Pan et al. [22] synthesized CaTiO₃/g-C₃N₄ by performing hydrothermal followed by deposition method. The interaction increased the H₂ production rate of the bare perovskite due to sufficient the separation rate of the photogenerated charge species. In other study, the photocatalytic activity of CaTiO₃/g-C₃N₄ was examined in the degradation of crystal violet (CV) and malachite green (MG) under sunlight irradiation [23]. Kumar and co-workers [24] depicted that graphitic carbon nitride nanosheets (CTCN) provided good excitation dissociation at interface for the photoinduced electrons-holes pairs in CaTiO₃/CTCN photocatalyst. They also obtained efficient organic molecule degradation rates by performing it under sunlight irradiation. Although the relevant studies showed that g-C₃N₄-incorporated with CaTiO₃ could be successively used in photocatalytic process driven by sunlight irradiation, to our knowledge, no study has examined the photocatalytic efficiency of CaTiO₃/g-C₃N₄ sample under visible light illumination. Therefore, in this study CaTiO₃ was interacted with g-C₃N₄ to obtain satisfactory IC degradation under visible light irradiation.

Herein, we report the synthesis of CaTiO₃/g-C₃N₄ photocatalysts by hydrothermal method and their utilization in photocatalytic degradation of indigo carmine dye at first time. The effect of graphitic carbon nitride amount on the catalytic reaction was examined under visible as well as UV-A light irradiations, as well as dark conditions. By using optimum photocatalyst, the decomposition efficiency was evaluated under different catalyst dosage and initial dye concentration. The effects of different factors (pH, active substance, water body, and reusability) on the removal efficiency were examined, and subsequently, photocatalytic mechanisms for IC degradation were proposed.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Chemicals

CaCl₂•2H₂O, FeCl₃•9H₂O (99%) and CH₄N₂O were supplied from Merck. Melamine was obtained from Iso Lab. The other chemicals as IPA (70%), EDTA-2Na (≥ 98.5%), BQ (≥98%), NaOH and HCl (37%) were obtained from Merck and Isolab. Indigo carmine (IC), common synthetic dye, was performed as model pharmaceutical pollutant. All chemicals were applied without purification and distilled water was utilized for all experiments.

2.2. Preparation of photocatalysts

Sole graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) material was synthesized by heating melamine to 550 °C in a semi-closed crucible with a heating rate of 3 °C min⁻¹ under

air condition and the temperature was maintained at stable for 3 h. After cooling to room temperature, the yellowish g-C₃N₄ powder was obtained [12]. The final sample was labeled as CN. On the other hand, pristine CaTiO₃ particles (CTO) were fabricated by performing hydrothermal method. Primarily, 1.109 g CaCl₂•2H₂O was dissolved in basic aqueous solution, and simultaneously 3.404 g Ti(C₄H₉O)₄ was dissolved in 10 mL ethanol. Next step, the calcium salt solution was added drop by drop into the titanium-included solution under rigorous stirring for 2h. Thereafter, the solution was placed in autoclave and treated at 180 °C for 18 h. Finally, the precipitation was dried at 60 °C for overnight followed by calcination at 600 °C for 3 h [25]. The final photocatalyst was named as CTO.

CTO-incorporated with CN heterostructures were produced by performing hydrothermal method. In this method, the certain CTO amount was distributed in distilled water (30 mL), then the specific amount of CN was added into the dispersion. After that, the precursor solution was homogenized in a ultrasonic bath and it was further mixed under vigorously stirring for 3 h at ambient temperature. Then, the mixture was treated at 200 °C in for 18 h in an autoclave. The resultant sample was washed and dried. Finally, the as-fabricated powder was obtained. According to the synthesis method, three CTO/CN photocatalysts were fabricated with various carbon nitride amount. The weight ratio of CTO:CN was determined as 1:0.25, 1:0.50, and 1:1, as well as the heterostructures were named as CTO/CN(I), CTO/CN(II), and CTO/CN (III), respectively.

2.1. Characterization

The crystalline properties of the as-obtained heterostructured photocatalysts were identified by performing X-ray powder diffraction (XRD) analysis (Panalytical X'Pert PRO Model). The morphology of the samples was monitored using a field-emission scan electron microscopy (SEM-EDAX: Bruker). In order to examine the optical features of the samples, UV-vis diffuse reflectance spectra (DRS) analysis was performed.

2.4. Photocatalytic Experimental Studies

Photocatalytic degradation of indigo carmine was studied in a glass reactor placed into a square cabinet including two visible lamps (Osram 150 W, λ: 400–800 nm). During the reaction, a fan-cooling system was utilized to ensure the temperature of the reaction solution at ambient level. The reaction solution was stirred magnetically for 30 min to achieve adsorption-desorption equilibrium in dark. During the photocatalytic experiment, aliquots (3 mL) were taken at time intervals from 30 to 120 min and filtered using a syringe filter. Then, the concentration of the residual IC was evaluated by the absorbance at 552 nm [26].

To observe the effect of catalyst dosage on the removal efficiency, the photocatalytic experiments were performed under various catalyst dosage (0.1, 0.2, and 0.3 g/L). Also, the role of the initial dye concentration was evaluated by considering the performance in the presence of 5, 10 and 15 mg/L IC. Furthermore, the effect of solution pH was determined by performing the photocatalytic test under alkaline and acidic environments. Scavenger tests were also conducted to identify the main radical oxidative species (ROS) in visible-light-assisted IC degradation by using h⁺, •OH, and •O₂⁻ trapping agents (EDTA-2Na, IPA and BQ, respectively). Moreover, the reaction was carried out in case of drinking water and tap water media. By using the water sources, IC solutions with the concentration of 10 mg/L were prepared. In addition, the chemical stability of CTO/CN sample was investigated by reusing five times in the catalytic system. After each cycle, the fresh dye with desired concentration was spiked into the solution for further run. In this study, all experiments were performed in triplicate and average results were reported.

The degradation rate of IC was determined by following Equation (1):

$$\text{Removal Efficiency \%} = (C_0 - C) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

where C₀ and C are the initial and final concentrations (mg/L) at 0 and t min of irradiation time, respectively. Also, the reaction kinetic properties were illustrated by pseudo-first-order kinetics based on the following Equation (2).

$$\ln(C_{in}/C_{out}) = kt \quad (2)$$

where C_{in} and C_{out} are the starting and final concentrations of IC in the reaction process, and the slope k (min⁻¹) and t (min) are the apparent rate constant and reaction time, respectively.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Characterization

The phase structures of the pristine g-C₃N₄, CaTiO₃ and the as-fabricated heterostructure (CaTiO₃/g-C₃N₄) were thoroughly investigated using XRD. Figure 1 illustrates the XRD patterns of the samples. The dominant diffraction peaks (2θ) represented CaTiO₃ crystal plans of (111), (121), (002), (220), (202), (212), (042) (004), and (242), respectively (ICDS 06-2149) [27,28]. Furthermore, the diffraction peak appeared at 27.5° was attributed to the presence of g-C₃N₄ [23]. In case of CTO/CN, besides the main peaks of CTO sample, the peak corresponding to the crystal phase of CN was observed in the composite. The results showed that CTO/CN was successfully synthesized by performing the hydrothermal method in this study.

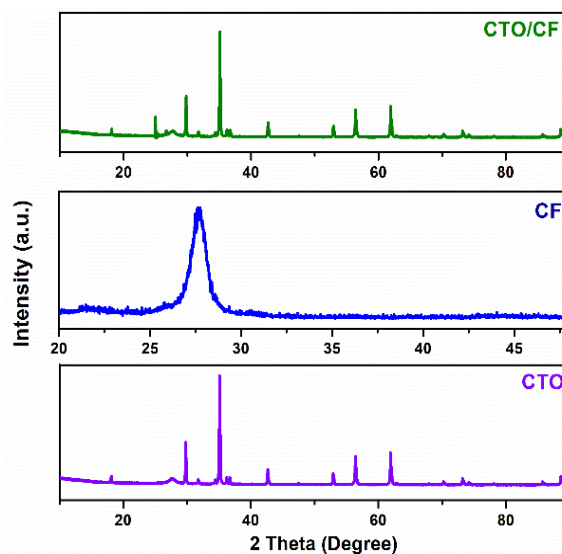


Figure 1. XRD spectrums of CTO, CN and CTO/CN(III) samples

SEM was employed to identify the micromorphology and composition of the as-prepared materials. The SEM photos of the samples are presented in Figure 2. The formation of CTO particles in cubic morphology was observed in this figure. Moreover, irregular rod shapes were depicted on the material indicating the occurrence of particle agglomeration during the preparation section. In terms of CN, the image showed layer structure with a relatively smooth and flat surface. In addition, it could be obviously observed that the dispersity of CTO particles formed on the surface of g-CN sheets, which was assigned to the formation of CTO/CN composite.

UV-vis and diffuse reflectance spectroscopy was conducted to determine the light absorption properties of the perovskite and the carbon-based material (Figure 3). CN showed wider the wavelength region of the irradiated light than that of CTO. It was suggested that the incorporation of graphitic carbon nitride into CaTiO₃ could effectively extend the light absorption capacity. The indication was supported with the efficiency of CTO/CN in the photocatalytically IC degrading images of CTO, CN and CTO/CN(III) samples.

3.2. Primarily photocatalytic dye degradation

To investigate the photocatalytic efficiency of pristine (CN), sole CaTiO₃, and CaTiO₃-incorporated with CN samples (CTO/CN(I), CTO/CN(II), and CTO/CN(III)), the indigo carmine degradation was performed under visible light and UV-A light illumination, as well as dark conditions (Figure 4). Observing the dark adsorption performances of the catalysts, the removal efficiencies were calculated as 10.17%, and 39.39% for bare CN and CaTiO₃, respectively. The dye adsorption ability enhanced with increasing carbon-based constituent: CTO/CN(I), CTO/CN(II) and

CTO/CN(III) showed 47.01%, 48.18% and 49.56% indigo carmine removal (Figure 4a).

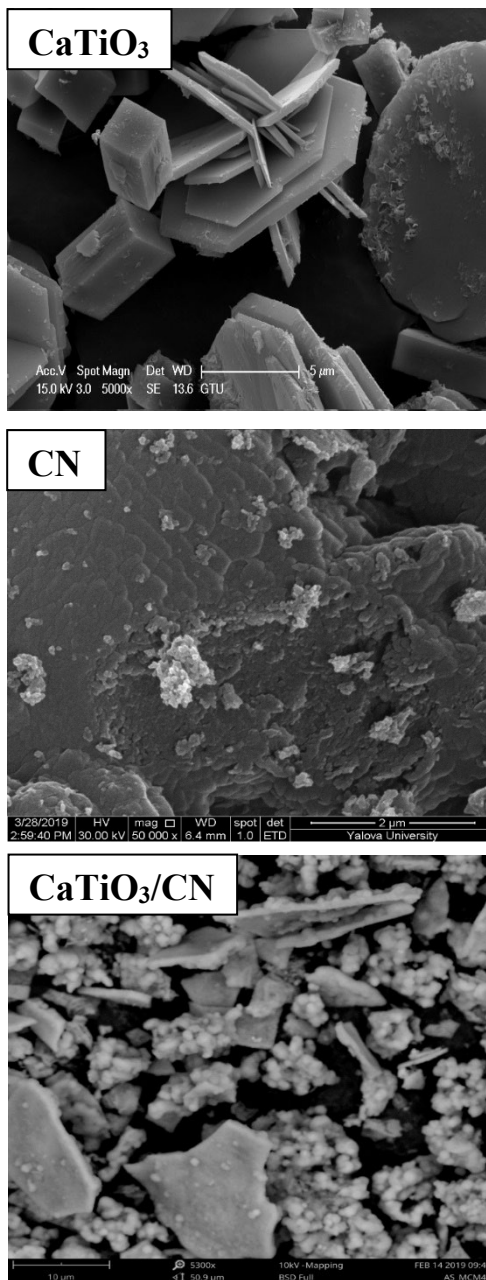


Figure 2. SEM images of CTO, CN and CTO/CN(III) samples

The results indicated that electrostatic attraction and hydrogen bonding between the functional groups of the dye components (C=O, N-H and SO₃) and the active species of the CN facilitated the indigo carmine adsorption on the samples [29]. In terms of UV-A light-driven removal, the incorporation CN into CTO improved the reaction rate; the IC removal values of CTO/CN(I), CTO/CN(II) and CTO/CN(III) were found as 77.51%, 95.30% and 97.04%, respectively (Figure 4b). Similar behavior was observed under visible light illumination; CTO/CN(III) depicted significant the photodegradation efficiency (76.38%) (Figure 4c).

Furthermore, all removal rates were higher than that of bare CN and CTO. This could be due to the synergetic effect of the composite material that improved adsorption ability. Thus, it could be concluded that the photocatalytic IC decomposition property was boosted the contributions of graphitic carbon nitride, which was assigned to enhanced visible light absorption ability. In addition, the degradation rate constants (k , min⁻¹) were found to be 0.007, 0.0084 and 0.0108 min⁻¹ for the CTO/CN(I), CTO/CN(II) and CTO/CN(III) photocatalysts, respectively. The maximum rate constant was obtained by utilizing CTO/CN(III) and therefore, the photocatalyst were used in subsequent experiments.

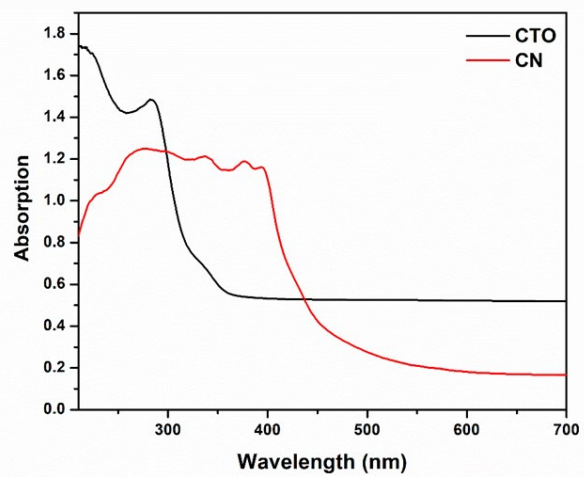


Figure 3. UV-Vis DRS spectra of CTO and CN

3.3. Effect of catalyst dosage

The experiment results of the effect of catalyst dosage on the degradation efficiency are plotted in Figure 5a. It was observed that with increasing catalyst dose from 0.10 to 0.30 g/L, the efficiency of dye degradation was increased from 68.34% to 99.02%. This increment was also reflected in the reaction coefficient values; the k constant was calculated as 0.0088, 0.0108 and 0.0349 min⁻¹ for 0.10, 0.20 and 0.30 g/L, respectively. The increase trend can be due to the enhancement in the surface area or active sites for reaction of the indigo carmine molecules.

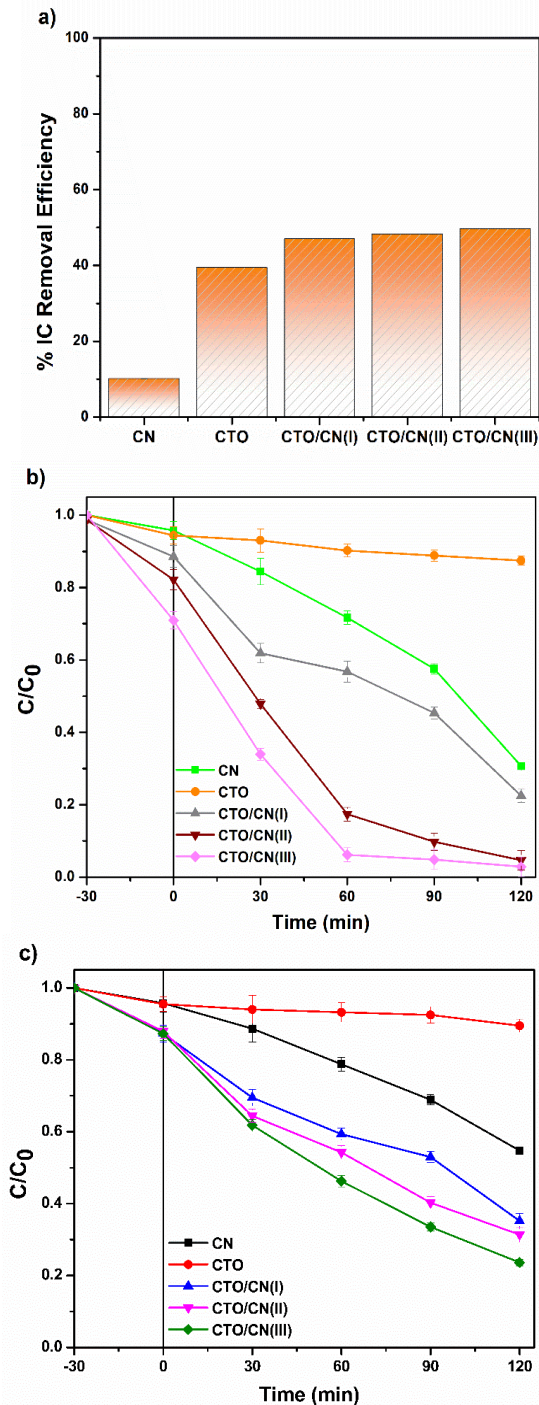


Figure 4. (a) Photocatalytic indigo carmine degradation studies in dark environment, (b) under UV-A light irradiation and (c) under visible light irradiation (0.2 g/L of catalyst dosage and 10 mg/L of IC concentration)

3.4. Effect of initial dye concentration

Figure 5b depicts the plot of degradation vs time with respect to different initial dye concentrations (5-15 mg/L). It showed the highest efficiency (86.41%) at mere low initial concentration of the dye (5 mg/L), which was attributed to the adsorption of dye molecules onto the catalyst surface and immediately dye degradation. As the initial solution concentration

increased, the degradation efficiency reduced. In case of high IC amount, more dye molecules were adsorbed onto the surface of CTO/CN; however, the adsorbed dye molecules were not able to immediately degrade. Since, the light intensity on the photocatalyst surface decreased, resulting that the path length of the photons entering the solution was increased due to more colored reaction mixture. Hence, the production of radicals which were effective on the IC decomposition was limited. In addition, the reaction rate constants were calculated as 0.0139, 0.0108 and 0.0073 min⁻¹ in the presence of 5, 10 and 15 mg/L dye concentration, respectively.

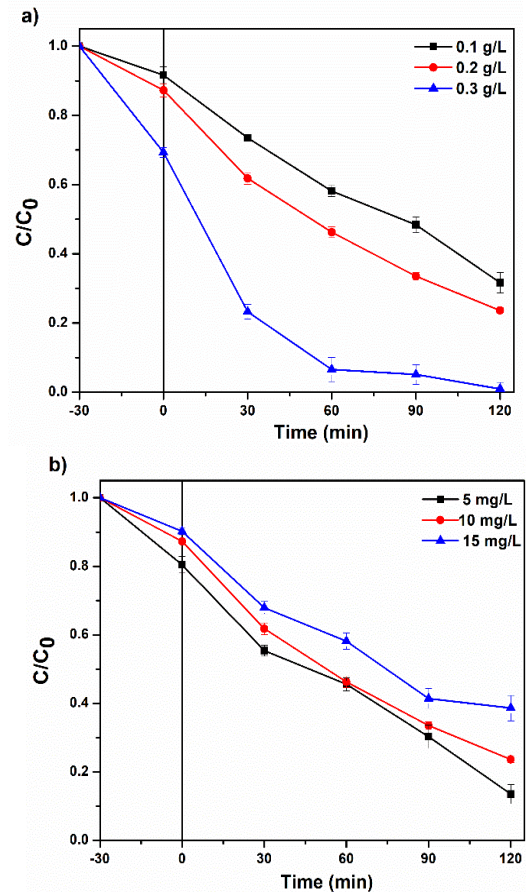


Figure 5. (a) The effect of catalyst dosage and (b) the effect of initial dye concentration on dye removal in the presence of CTO/CN(III)

3.5. Effect of pH

In terms of dye degradation in wastewater, pH value is an essential factor, since the property significantly affects the adsorption of the organic molecule on catalyst surface, which is first step of the degradation. Figure 6a depicts the photocatalytic performances at different pH values. The maximum removal efficiency (90.81%) was observed under acidic condition (pH 3). When the solution pH value changed from 6 to 10, the decomposition efficiency declined from 76.38% to 44.44%. On the other hand, the activity changes driven by pH value of reaction environment could be due to

the charge features of active species and pKa value of IC dye at various pH values. IC molecule possesses pKa value of 12.6, and therefore it predominantly exists as anionic form, also it is negatively charged in a wide pH range. Thus, it was stated that the sorption could be improved by enhanced electrostatic attraction between negatively charged dye component and positively charged photocatalyst at pH 3. Furthermore, at pH values around 10, the rate of dye removal limited due to a gradual loss of the positive charges on the adsorbent surface and partly due to the competition between the medium OH⁻ and the anionic dye to interact with the adsorbent surface. The results were indicated that the performance of IC decomposition on CTO/CN (III) was unfavorable under alkaline condition. Similar phenomenon was observed by other researchers [30,31].

3.6. Effect of scavengers

To determine the mechanism of the photocatalytic indigo carmine degradation on CTO/CN (III), free radical capture experimental studies were carried out. IPA, EDTA-2Na and BQ, were selected as scavengers for $\bullet\text{OH}$, h^+ and $\bullet\text{O}_2^-$, respectively. As observed in Figure 6b, the catalytic performance was significantly limited, when the trapping agent for superoxide radical was added into the reaction solution. That is, the activity decreased from 76.38% (no scavenger: control experiment) to 18.13%. The observation showed that $\bullet\text{O}_2^-$, could be considered as the most effective reactive oxygen species in the visible light driven-indigo carmine removal process. In terms of EDTA-2Na and IPA, the decomposition efficiency partly decreased to 72.14% and 71.13%, respectively, indicating that h^+ and $\bullet\text{OH}$ had minor contributions on the degradation.

The potential mechanism for the decomposition reaction of indigo carmine over CTO/CN (III) was presented in Figure 7. Firstly, light photons were observed on the heterostructure. The photogenerated electrons accumulated on the CB of CTO reduced O₂ molecules adsorbed on the composite catalyst surface to superoxide radicals. Then, indigo carmine was mainly decomposed to smaller dye molecules by the reactive groups. Besides, the photo-induced holes on the VB of CN and $\bullet\text{OH}$ radicals was obtained via serial reactions facilitated the oxidization of IC. Finally, the organic molecule further degraded into CO₂ and H₂O

3.7. Effect of water bodies

To further examine the availability of CTO/CN (III) as a photocatalyst for wastewater treatment, the dye degradation was assessed in different water media namely, distilled, drinking water and tap water. As observed in Figure 6c, the removal performances were found as 76.38%, 73.98% and 71.3% in case of distilled water, tap water, and drinking water, respectively; stating that the performance slightly affected from the type of aqueous phase.

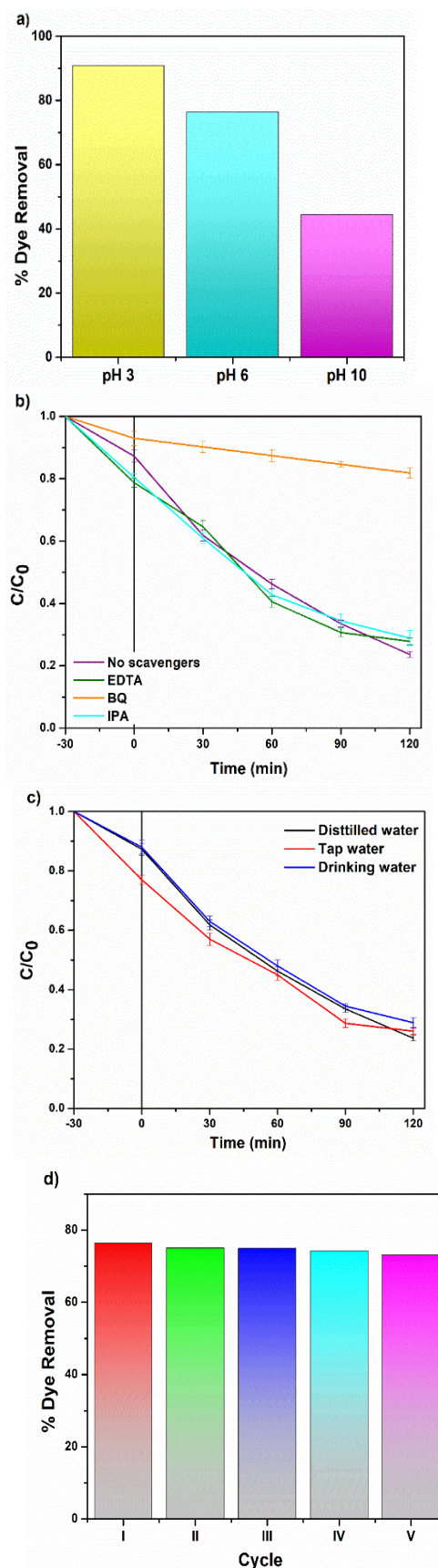


Figure 6. (a) The effect of solution pH, (b) scavengers, (c) water medium and (d) reusability of CTO/CN(III) on dye removal

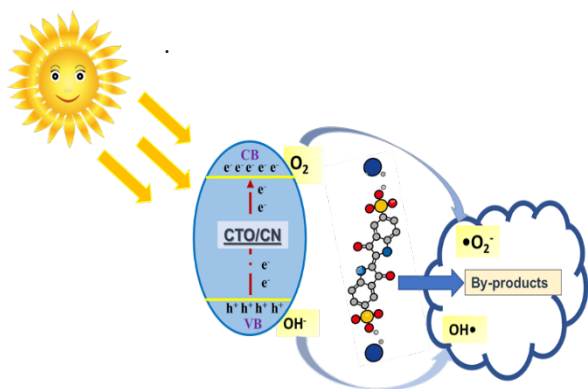


Figure 7. Schematically possible degradation mechanism

The change could depend on the many parameters, especially the pH of the reaction environment, charged ions, and organic contaminants. The most effective inhibition resulted from SO_4^{2-} and Cl^- , which were more dominant species in tap and drinking water bodies. Since the competitive adsorption between anions and IC molecules on the photocatalyst surface occurred. Therefore, it could be indicated that the dye removal rate was limited by the competitive adsorption driven by anions.

3.8. Reusability

For practical and full-scale industrial application, the most important consideration is to investigate reusability of photocatalysts. In view of this, five successive photocatalytic experiments were performed under visible light irradiation to examine the stability of CTO/CN (III) sample. As presented in Figure 6d, only 4.29% reduction in IC degradation rate was observed after fifth cycle. It could be concluded that CTO/CN heterostructure provided excellent stable photocatalytic efficiency for indigo carmine degradation.

IV. CONCLUSION

In summary, CaTiO₃/g-C₃N₄ photocatalysts were effectively produced by a simple hydrothermal method, in which graphitic carbon nitride particles were anchored with the perovskite. The as-prepared CTO/CN composites exhibited good photocatalytic activity for the degradation of IC under visible and UV-A light irradiation. The weight ratio CTO:CN of 1:1 (CTO/CN(III)) performed highest photocatalytic degradation efficiency of 97.09% and 76.38% in the presence of 120 min under UV-A and visible light irradiation, respectively. The characterization revealed that the reason for improving photocatalytic performance was to enhance the incident light trapping ability and promote separation of photo-induced charges. With increasing photocatalyst dosage, the catalytic performance improved, resulting increase active sites. However, the efficiency decreased, and this

might be attributed to overlapping or aggregation of adsorption sites. The dye degradation was significantly driven by super oxide radicals. Interestingly, CTO/CN(III) showed good activity under tap water and drinking water. In addition, the catalyst exhibited high performance even if after five-cycle experiment, stating stable photocatalyst for dye removal. This study provides a new perspective for the application of CaTiO₃-based carbon nitride-based composites in photocatalytic degradation of organic pollutants.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Yalova University (project no. 2022/AP/0003).

REFERENCES

- [1] Ferdous, M., Khander, S., Sarker, F., Islam, A. (2020). Current treatment technologies and mechanisms for removal of indigo carmine dyes from wastewater : A review. *J. Mol. Liq.*, 318, 114061.
- [2] Flox, C., Ammar, S., Arias, C., Brillas, E. (2006). Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradation of indigo carmine in acidic aqueous medium, *Appl. Catal.*, 67, 93–104.
- [3] Bafana, A., Devi, S., Chakrabarti, T. (2011). Azo dyes: past , present and the future. *Environ. Rev.*, 370, 350–370.
- [4] Lin, N., Gong, R., Wang, Y., Zhang, X. (2022). Critical review of perovskite-based materials in advanced oxidation system for wastewater treatment: Design , applications and mechanisms, *J. Hazard. Mater.* 424, 127637.
- [5] Kanbere, P., Chen, Z. (2014). A Review on Visible Light Active Perovskite-Based Photocatalysts, *Molecules*, 19, 19995-20022.
- [6] Kov, T. (2021). Nano and micro-forms of calcium titanate: Synthesis , properties and application, *Open Ceramics*, 8, 100177.
- [7] Passi, M., Pal, B. (2021). A review on CaTiO₃ photocatalyst : Activity enhancement methods and photocatalytic applications. *Powder Technol.*, 388, 274–304.
- [8] Nasir, M.S., Yang, G, Ayub, I., Wang, S., Wang, L., Wang, X., Yan, W., Peng, S., Ramakarisha, S. (2019). Recent development in graphitic carbon nitride based photocatalysis for hydrogen generation. *Appl. Catal. B Environ.* 257:117855.
- [9] Ong, W.J., Tan, L.L., Ng, Y.H., Yong, S.T., Chai, S.P. (2016). Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)- based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: are we astep closer to achieving sustainability?. *Chem. Rev.* 116:7159–7329.

- [10] Zhao, Z., Sun, Y., & Dong, F. (2015). Graphitic carbon nitride based nanocomposites: a review. *Nanoscale*. 7(1), 15-37.
- [11] Khan, M. S., Zhang, F., Osada, M., Mao, S. S., & Shen, S. (2020). Graphitic carbon nitride-based low-dimensional heterostructures for photocatalytic applications. *Solar RRL* 4(8), 1900435.
- [12] Acharya, S., Mansingh, S., Parida, KM. (2017). The enhanced photocatalytic activity of g-C₃N₄-LaFeO₃ for the water reduction reaction through a mediator free Z-scheme mechanism. *Inorg.Chem. Front.* 4:1022–1032.
- [13] Ye, Y., Yang, H., Wang, X., Feng, W. (2018). Photocatalytic, Fenton and photo-Fenton degradation of RhB over Z-scheme g-C₃N₄/LaFeO₃ heterojunction photocatalysts. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 82:14–24.
- [14] Ismael, M., Wu, Y. (2019). A facile synthesis method for fabrication of LaFeO₃/g-C₃N₄ nanocomposite as efficient visible-light-driven photocatalyst for photodegradation of RhB and 4-CP. *New J. Chem*, 13783–13793.
- [15] Zhang, J., Zhu, Z., Jiang, J., Li, H. (2020). Fabrication of a novel AgI/LaFeO₃/g-C₃N₄ dual Zscheme photocatalyst with enhanced photocatalytic performance. *Mater. Lett.* 262:127029.
- [16] Luo, J., Chen, J., Guo, R., Qiu, Y., Li, W., Zhou, X., Ning, X. (2019). Rational construction of direct Z-scheme LaMnO₃/g-C₃N₄ hybrid for improved visible-light photocatalytic tetracycline degradation. *Sep. Purif. Technol.* 211:882–894.
- [17] Zhou, X., Chen, Y., Li, C., Zhang, L., Zhang, X., Ning, X., Zhan, L. (2019). Construction of LaNiO₃ nanoparticles modified g-C₃N₄ nanosheets for enhancing visible light photocatalytic activity towards tetracycline degradation. *Sep. Purif. Technol.* 211:179–188.
- [18] Ye, C., Wang, R., Wang, H., Jiang, F. (2020). The high photocatalytic efficiency and stability of LaNiO₃/g-C₃N₄ heterojunction nanocomposites for photocatalytic water splitting to hydrogen. *BMC Chem.* 14:1–13.
- [19] Konstas, P., Konstantinou, I., Petrakis, D., Albanis, T. (2018). Synthesis, characterization of gC₃N₄/SrTiO₃ heterojunctions and photocatalytic activity for organic pollutants degradation. *Catalys.* 8(11):554.
- [20] Luo, Y., Deng, B., Pu, Y., Liu, A., Wang, J., Ma, K., Gao, F. (2019). Interfacial coupling effects in g-C₃N₄/SrTiO₃ nanocomposites with enhanced H₂ evolution under visible light irradiation. *Appl. Catal. B Environ.* 247:1–9.
- [21] Tan, C.E., Lee J.T., Su, E.C., Wey, M.Y. (2020). Facile approach for Z-scheme type Pt/g-C₃N₄/SrTiO₃ heterojunction semiconductor synthesis via low-temperature process for simultaneous dyes degradation
- [22] Pan, J., Jiang, Z., Feng, S., Zhao, C., Dong, Z., Wang, B., Wang, J., Song, C., Zheng, Y. (2018). The enhanced photocatalytic hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy.* 43:19019–19028.
- [23] Chen, X., He, X., Yang, X., Wu, Z., Li, Y. (2020). Construction of novel 2D/1D g-C₃N₄/CaTiO₃ heterojunction with face-to-face contact for boosting photodegradation of triphenylmethane dyes under simulated sunlight. *J. Taiwan. Inst. Chem. Eng.* 107:98–109.
- [24] Kumar, A., Schuerings, C., Kumar, S., Kumar, A., Krishnan, V. (2018). Perovskite-structured CaTiO₃ coupled with g-C₃N₄ as a heterojunction photocatalyst for organic pollutant degradation. *Beilstein. J. Nanotechnol.* 9:671–685.
- [25] Simsek, E. B. (2022). Construction of CaTiO₃ nanosheets with boron nitride quantum dots as effective photogenerated hole extractor for boosting photocatalytic performance under simulated sunlight. *Ceramics International.*
- [26] Balta, Z. Simsek, E. B. (2022). Understanding the structural and photocatalytic effects of incorporation of hexagonal boron nitride whiskers into ferrite type perovskites (BiFeO₃, MnFeO₃) for effective removal of pharmaceuticals from real wastewater. *J. Alloys. Compd.* 898, 162897.
- [27] Han, J., Liu, Y., Dai, F., Zhao, R., Wang, L. (2018). Fabrication of CdSe / CaTiO₃ nanocomposites in aqueous solution for improved photocatalytic hydrogen production. *Appl. Surf. Sci.*, 459, 520–526.
- [28] Holliday, S., Stanishevsky, A. (2004). Crystallization of CaTiO₃ by sol – gel synthesis and rapid thermal processing. *Surf. Coat. Technol.*, 189, 741–744.
- [29] Khadhri, N., El, M., Saad, k., Moussaoui, Y. (2019). Batch and continuous column adsorption of indigo carmine onto activated carbon derived from date palm petiole. *J. Environ. Chem. Eng.* 7, 102775.
- [30] Kas, H. (2005). Aminofunctionalized acrylamide – maleic acid hydrogels :

-
- Adsorption of indigo carmine. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng.*, 266, 44–50.
- [31] Donneys-victoria, D., Machuca-martínez, F. (2020). Indigo carmine and chloride ions removal by electrocoagulation . Simultaneous production of brucite and layered double hydroxides. *J. Water Process Eng.*, 33, 101106.

Impacts of Meteorological Parameters on Tropospheric Ozone Concentrations in Çanakkale

Hilal ARSLAN¹ 

¹University of Health Sciences, Hamidiye Faculty of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety, Istanbul, Turkey

Abstract

Meteorological factors have a significant impact on the formation and transport of tropospheric ozone. In addition to the meteorological factors, solar radiation and associated chemical reactions, topography, and pollution sources also affect the ozone concentration levels (O₃). In this study, the influences of the meteorological factors (temperature, wind speed, relative humidity, solar radiation) on O₃ were investigated for Çanakkale throughout the 2014-2018 period. It was found that O₃ concentration levels in summer season are linked with the high humidity and, especially high temperature. The statistical analysis indicated that O₃ concentrations at Çan district (SE Çanakkale) were positively correlated with temperature during summer and autumn seasons (r=0.53). Similarly, a statistically significant positive correlation was found at Lapseki station of Çanakkale during autumn (r=0.48), spring (r=0.41), and summer months (r=0.40), respectively. On the other hand, relative humidity (RH) displayed negative correlations with O₃ at Çan and Lapseki stations. In addition, negative correlation was observed between nitrogen oxides (NO_x) and O₃ values measured at Lapseki station. The main important factors affecting ozone concentration levels in Çanakkale were found as local meteorological conditions and long-range transportation of pollutants from anthropogenic sources (e.g. vehicle, industrial emissions, volatile organic compounds (VOCs) emitted from solvents and industry).

Keywords: Tropospheric ozone, air quality, meteorological factors, correlation coefficient, Çanakkale

I. INTRODUCTION

Ground-level ozone (O₃) is one of the six criteria air pollutants (particulate matter (PM), sulfur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), and lead (Pb)). It is a chemical generated from gases (many of which come from anthropogenic causes) in the lower atmosphere by solar radiation-driven photochemistry [1]. Nowadays, ground-level ozone is constantly increasing especially in urban areas of developed countries. Similarly, increases are observed in rural areas as well [2-3].

Ground-level ozone differs from the ozone layer in the upper atmosphere [4]. Ozone is produced from oxygen in the stratosphere, the upper layer of the atmosphere, via processes triggered by solar radiation. Approximately 90% of ozone is created in the stratosphere, where it performs a critical function in absorbing UV radiation, which is dangerous to life on Earth if it exceeds critical limits. However, tropospheric ozone damages vegetation, ecosystems, agricultural products, materials, and human health because of its highly reactive chemical characteristics [5].

Tropospheric ozone is formed from the emissions of NO_x and volatile organic compounds (VOC_s). Methane (CH₄) and CO also contribute but at a lesser degree [5]. The rate of photochemical processes forming ozone in the atmosphere is influenced by solar radiation, temperature and geographical factors. Ozone gases are emitted from a diverse range of anthropogenic (e.g. road transport, international maritime shipping, aircraft, thermal power plant, industrial activities, solvent use, biomass burning) and natural sources (e.g. soils and lightning). In addition to this, ozone concentrations may rise as a result of climate change [6-8].

Ozone is influenced by meteorological factors as well as anthropogenic emissions. Meteorological factors such as strong solar radiation [9], cloudiness, high temperature [10-11], low relative humidity [10], atmospheric stability and location of the pollutant source affect the ozone concentrations. Otero et al., (2016) investigated the association between local and synoptic meteorological conditions and surface ozone concentrations over Europe

in spring and summer seasons [12]. Li et al., (2017) showed that high temperature, low relative humidity, easterly wind and low wind speed (ws) conditions influence urban ozone episodes in China [10]. Chen et al., (2020) indicated that temperature was the most influential factor for ground ozone concentrations in China [9].

Many epidemiological studies have shown that exposure to ozone leads to a wide range of health problems such as increased asthma morbidity and mortality, reduced lung function, bronchial symptoms and lung diseases [13-15]. In European Union, annually 14.000 respiratory hospital admission is related with ozone concentrations [5]. Diaz et al., (2018) analyzed the relationship between high ozone concentrations and daily mortality and found a positive relationship between them, especially among susceptible children who play outdoors in polluted environments [16]. In addition to children, the elderly and cardiovascular patients are adversely affected by ozone concentrations.

World Health Organization (WHO) sets a target value of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ as a maximum daily 8 hours mean for O_3 to protect human health. As of January 1, 2022, the target value for O_3 in Turkey is $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ as a maximum daily 8-hour mean. However, even if the legal limit values are achieved, health problems can still arise.

Studies in Turkey mainly focused on the factors causing the changes in PM_{10} concentration levels, such as long-range transport [17-19], local meteorological factors [20], and their impact on health problems [21-22]. For Ozone, Im et al., (2006) analyzed hourly ozone, NO_x and VOC concentrations during summer and found that decrease in inversion heights in the early hours of the day leads to increase in ozone concentrations [23]. Can (2017) found that the highest ozone value is observed in summer season [24]. Unal et al., (2021) analyzed relationship between air pollution and asthma, bronchitis and pneumonia and found that pneumonia, asthma and bronchitis cases were associated with increases in ozone concentrations [25].

The existence of power plants, industrial facilities, and growing sea traffic resulted in considerable increases in pollutant concentrations in Çanakkale. In this study, ozone values measured in Çan and Lapseki districts between 2014-2018 are determined and their temporal and spatial distributions are shown. In addition, relationship between meteorological parameters (temperature, wind speed, relative humidity, and solar radiation) and ozone concentrations are examined. For Lapseki station, relationship between NO_x and ozone was also studied. Also, pollutant sources are identified and variation of pollutant concentrations depending on meteorological factors are estimated. Seasonal and regional ozone exposure levels are determined.

II. DATA AND METHODOLOGY

2.1. Study Area and Air Quality Data

The study area and sampling sites in Çanakkale, Turkey are shown in Figure 1. Çanakkale is a province located in the Northwest of Turkey, within the Marmara Region. This province lies on both Asian and European sides of the Dardanelles. Due to its geographical features, the climate of this province is transitional between the Mediterranean climate and the Black Sea climate and has the characteristics of the Mediterranean climate. The average minimum temperature is measured at the lowest in February (-4.2°C) and the highest average temperature is measured in August ($+35.8^\circ\text{C}$). The prevailing wind direction is northerly winds. The most precipitation is observed in December, January and February.

In this study, ozone concentration data measured in Çan and Lapseki stations from January 2014 to December 2018 were provided by the National Air Quality and Monitoring Network database [26]. Furthermore, wind speed (m/s), wind direction, temperature, solar radiation, total precipitation, relative humidity values of the meteorological stations are obtained from the Turkish State Meteorological Service. Meteorological data used in this study represent characteristic meteorological properties of the pollutant source area. These monitoring stations are fully automated and provide hourly recordings. Data validation is conducted regularly by the Air Quality Monitoring Center of the Ministry of Environment and Urban Planning (MoEUP). As reported in Sahin (2020), incomplete recordings from the dataset were deleted and used data validation and measurement methodologies [27]. Figure 1 shows the locations of air quality monitoring stations and meteorological stations.

2.2. Statistical Analysis

Correlation matrix was used to analyze the strength of the association between O_3 concentrations, NO_x levels and meteorological factors (temperature, wind speed, solar radiation and RH). All statistical calculations and graphics were done using R version 3.1.2 [28].

The regions and seasons with the highest concentrations of pollutants were found by utilizing the inverse distance weighted (IDW) interpolation technique. This method is widely used in the research of air quality [29-30].

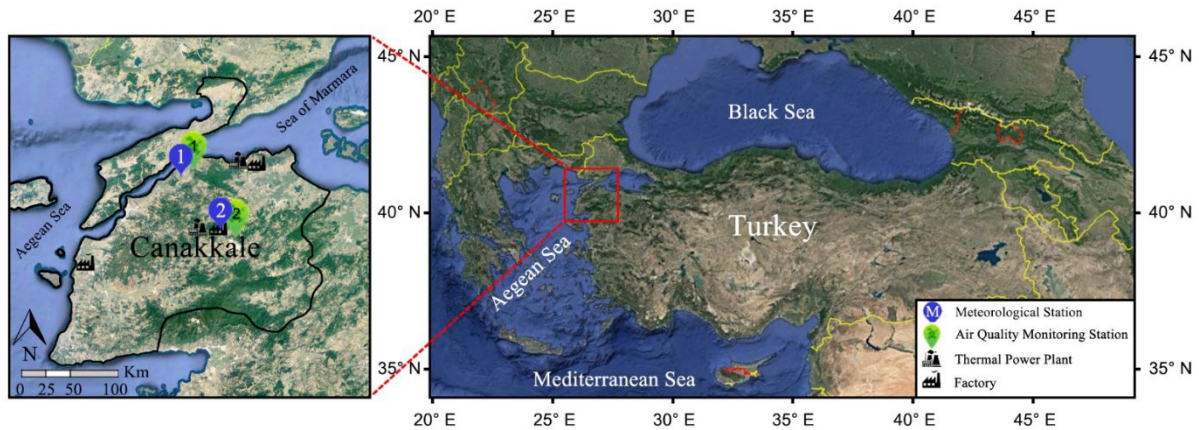


Figure 1. Locations of air quality monitoring stations (green) and meteorological stations (blue) in Çanakkale (NAQMS, 2022)

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Daily and Seasonal Variations of Air Pollutants

Daily variation of O_3 concentrations from two air quality stations were obtained by using the long-term data for Çanakkale. Figure 2 presents daily average ozone concentrations of 2014-2018 for Çan and Lapseki stations. Ozone is present on almost all days of the year. Particularly, during summer, ozone levels are seen to exceed $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ozone values are commonly higher in spring and summer than they are in autumn and winter. Peak summertime levels are higher in Çan and Lapseki. Examining Lapseki Station data with respect to WHO O_3 limit value ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) showed that 35% of summer data exceeded the limit value. Çanakkale province attracts a lot of tourists, especially in the summer months.

As Lapseki District is located at the junction between İstanbul and İzmir, there is an increase in traffic in the summer months. This situation causes an increase in ferry services and the number of vehicles which eventually lead to an increase in ozone concentration. As a result, the highest ozone concentrations occur during periods of sunny weather.

O_3 is known as a reactive air pollutant. Traffic and industrial activities together with meteorological factors, topography and chemical reactions increase its concentration levels [31-32]. Seasonal variation of O_3 concentrations is more apparent in summer months than in winter due to it is particularly dependent on effective solar radiation, high humidity and high temperature [33]. In Çanakkale, average measurement values are highest in summer with $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and lowest in winter with $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 3). Similar results have been reported in previous research by Yuska et al., 2003; Gong et al., 2018 [34-35].

Ozone concentrations in the study area found to be typically at their highest during summer and at their lowest during winter (Fig. 3c and 3a). When the measured ozone levels were examined spatially, high ozone concentrations in the province were generally found in Lapseki and Çan districts. In the summer season, the highest value for O_3 concentrations was found as $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Lapseki, and this was measured as $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Çan. Çan has lower elevation than its surroundings. This geographical situation leads to suspension of air pollutants and inversion. Low wind speed, especially during summer season, causes increase in air pollutant concentrations.

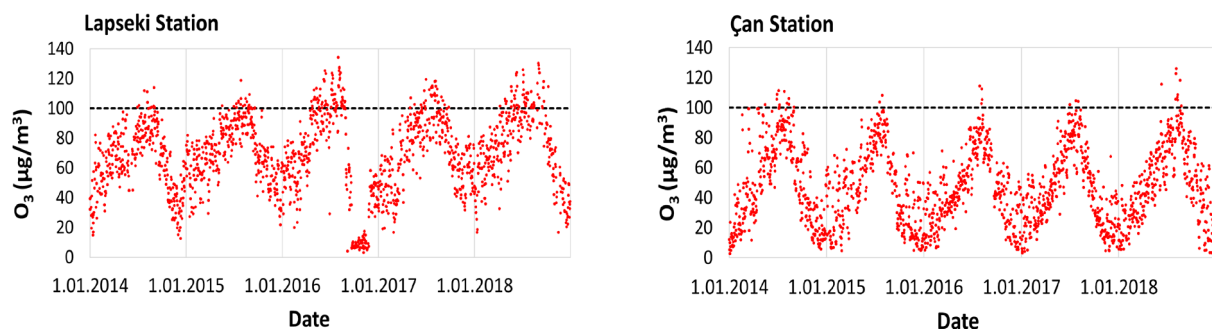


Figure 2. Daily variations of and O_3 concentrations for 2014-2018 (The limit values of O_3 is shown by the black dashed straight line).

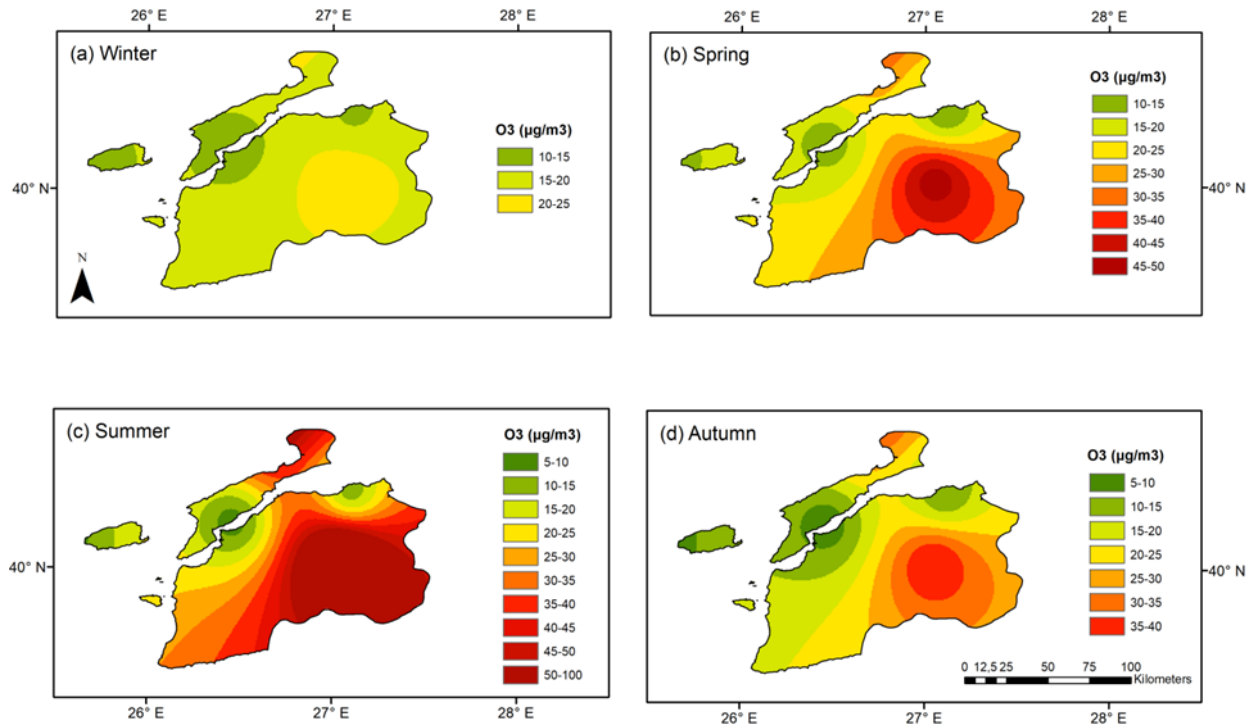


Figure 3. Interpolation results of O₃ concentrations (µg/m³) in 2014-2018.

In this study, emission sources were examined during cold (November to April) and warm (May to October) periods of the district. In general, cold season in the city begins in November and ends in April, similar to Arslan et al., 2022 [22]. The relationship between ozone and other pollutants varies depending on the season and location. Particularly, higher ozone levels are observed in the warm season than cold season in Çanakkale. Changing patterns of traffic emissions have the greatest impact on urban ozone levels. As a result of intensive ship crossing in Lapseki district, higher O₃ concentrations were observed in warm season (Fig. 4). On the other side, it could still reach high levels during colder months due to long-range transport by wind. Higher O₃ concentrations recorded in Çan and Lapseki during southerly and southwesterly winds, respectively in cold season. Similarly, increases are observed by southerly winds in warm season as well in Çan district (Fig. 4).

In addition to the vehicle emissions, sea traffic, domestic heating, and long-range transport, industrial facilities are crucial for high amount of pollutant values in Çanakkale. Particularly, coal-fired power plants pose threat to city. Çan Lignite Plant, Çan Thermal Power Station, Çanakkale Ceramic Factory, Akçansa, ICDAS are examples of important industrial factories in the mining and energy sectors. Furthermore, low grade heating fuels and a great amount of motor vehicles lead to low air quality.

The formation and transport of tropospheric ozone are influenced by meteorological parameters. Especially, high temperature and light wind are effective in the formation and accumulation of ozone concentration. In this study, in order to determine the effect of meteorological factors and NO_x on ozone concentration, the relationship between temperature, relative humidity, wind speed, solar radiation, NO_x and ozone concentration was investigated. The values obtained as a result of the correlation between ozone concentration and meteorological factors are shown in Figure 5 and Figure 6. Wind speed is the most important mechanism that determines the movement of pollutants in the atmosphere. The horizontal and vertical components of wind speed play a role in the distribution of pollutants. A positive correlation was found between wind speed and ozone in winter months. A positive correlation ($r=0.53$) was found between temperature and ozone concentration in summer and autumn seasons. In the spring season, it was calculated as 0.38. Similarly, at Lapseki station, a positive correlation was calculated in autumn ($r=0.48$), spring ($r=0.41$), and summer ($r=0.40$). Also, positive correlation was found between solar radiation and ozone in autumn ($r=0.32$) and spring ($r=0.47$) seasons. However, it was determined that there was a negative correlation between NO_x concentration and ozone. Decrease in NO_x concentration would lead to increase in O₃ levels. In spring and winter season, they were calculated as -0.52 and -0.46, respectively. In addition, negative correlation was observed between ozone concentration and relative humidity. There is a

negative correlation between relative humidity and temperature. As the temperature increases, the relative humidity decreases. For this reason, ozone concentration is observed at high temperatures and low relative humidity values.

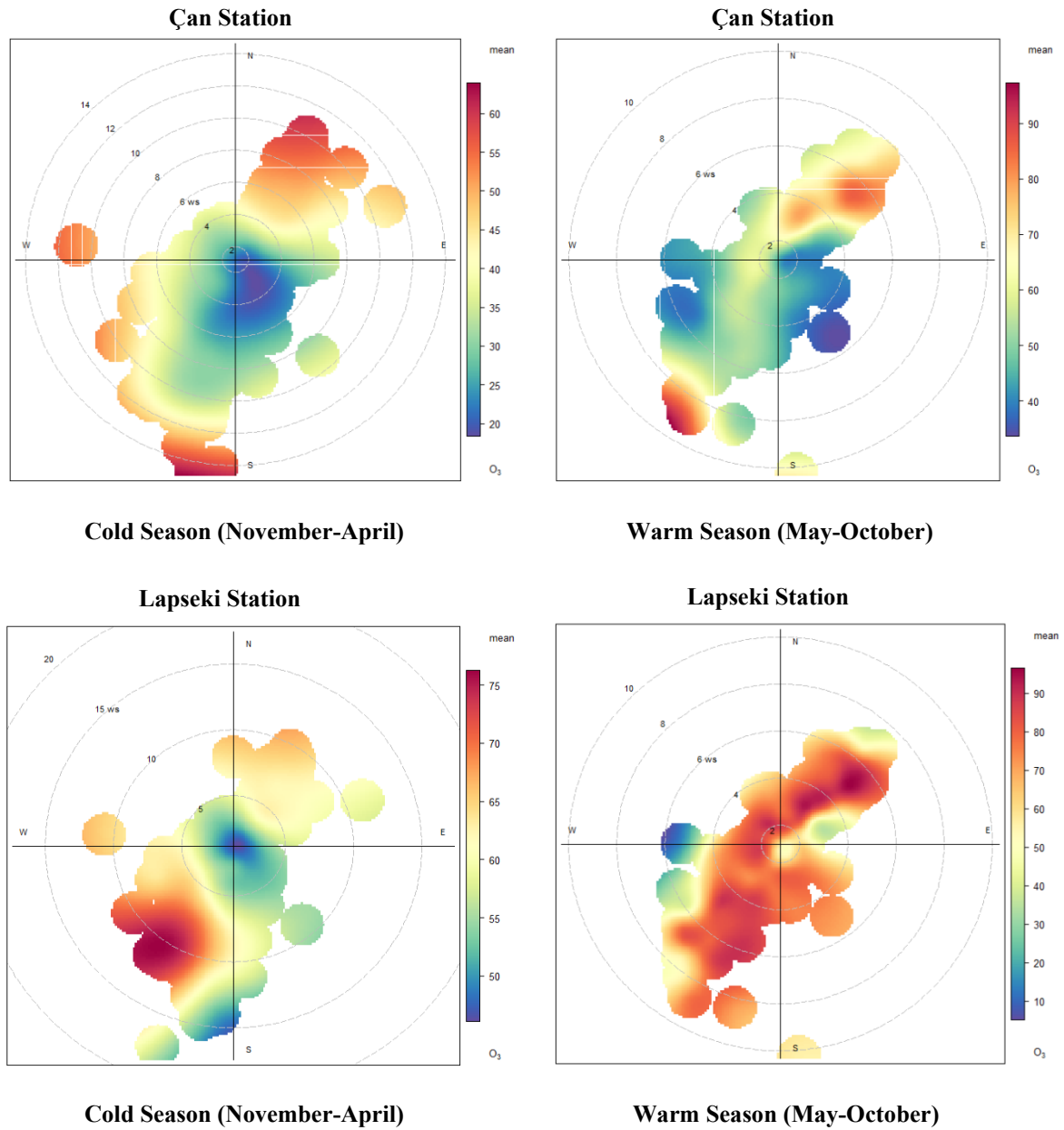


Figure 4. Polar plot of O₃ concentrations during the period of January 2014 to December 2018.

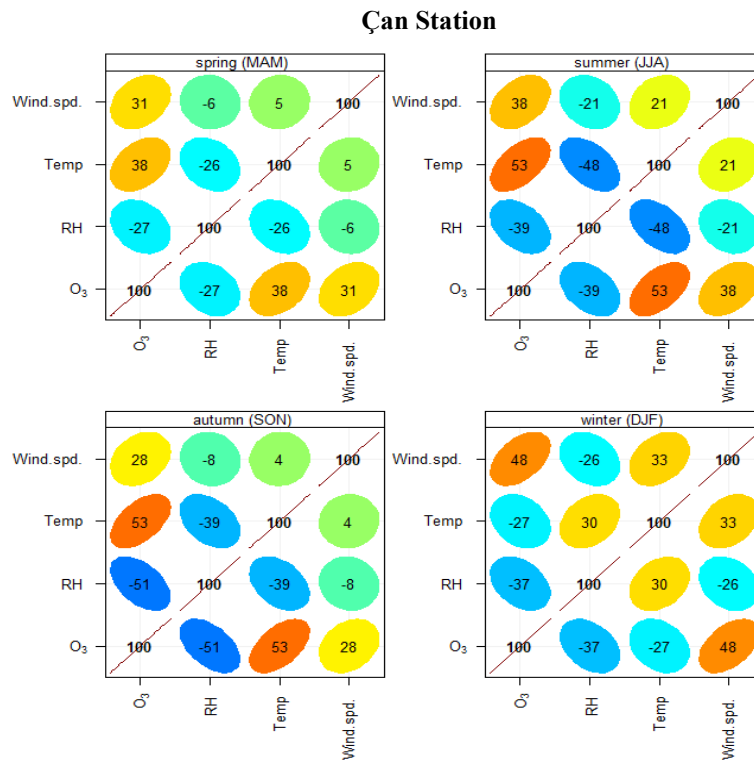


Figure 5. Correlation plots of O₃, relative humidity, temperature and wind speed using hourly data from 2014 to 2018 in Çan Station

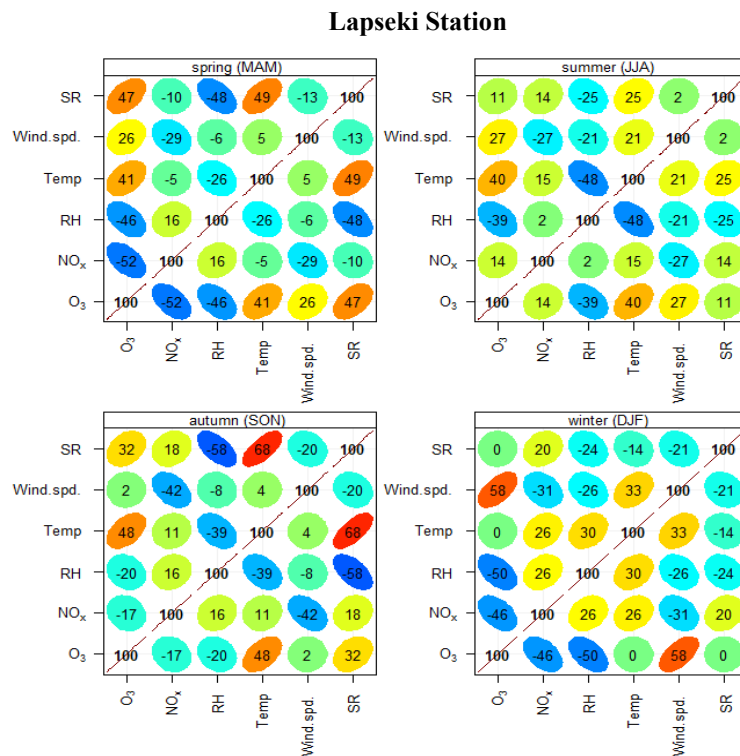


Figure 6. Correlation plots of O₃, solar radiation, relative humidity, temperature, wind speed and NO_x using hourly data from 2014 to 2018 in Lapseki Station

IV. CONCLUSION

In this study, temporal and spatial variations of ozone concentration measured between 2014-2018 in Çan and Lapseki districts were investigated. In addition, the relationship between ozone concentrations and meteorological parameters such as average daily temperature, wind speed and relative humidity was analyzed using regression analysis. Ozone levels reach higher levels in summer months compared to winter periods, as ozone levels are especially dependent on solar radiation and high temperature. The results indicated that O₃ has a positive correlation with temperature and solar radiation and a negative correlation with RH. As a result of anthropogenic emissions (e.g. cars, industrial boilers, refineries, chemical plants, thermal power plants and other sources that photochemically reactant) in Çanakkale, tropospheric ozone has strong seasonal variations, with higher concentrations in the summer. Ozone is created locally in polluted areas and increases concentration levels on a local scale by being carried by long-range transportation. Urban ozone concentrations are greatly influenced by traffic emissions. Decrease in traffic density causes a decrease in nitrogen oxides and thus the ozone concentration decreases. Ozone emissions are caused by population growth, technology advancements, economic development, changing land use, climate and other environmental changes. In order to reduce ozone emissions, energy production from fossil fuels should be reduced, transportation methods that do not use motor vehicles should be emphasized, and the emissions of industrial facilities should be strictly controlled. The measurement of ozone in the air should be done regularly at all measurement stations, and the results should be announced instantly. The public should be informed about ozone pollution and health problems caused by extreme temperatures, and warnings should be made in cases of excessive pollution. As a result of these actions other air pollutants and greenhouse gases will also be reduced. Less ozone in the troposphere means less damage to vegetation.

REFERENCES

- [1] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2022). <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- [2] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2022). <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>
- [3] Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- [4] World Health Organization (WHO). (2021). [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [5] Amann, M., Derwent, D., Forsberg, B., Hanninen, O., Hurley, F., Krzyanowski, M., Leeuw, F., Liu, S.J.L., Mandin, C., Schneider, J., Schwarze, P., Simpson, D. (2008). Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution, World Health Organization, Europe.
- [6] Fu, T.M., Tian, H. (2019). Climate Change Penalty to Ozone Air Quality: Review of Current Understandings and Knowledge Gaps. *Curr Pollution Rep* 5, 159–171. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00115-6>.
- [7] Song, S.K., Shon, Z.H., Kim, Y.-K., Kang, Y.H., Oh, I.-B., & Jung, C.H. (2010). Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season. *Atmospheric Environment*, 44(5), 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.010>.
- [8] Amann, M., Derwent, D., Forsberg, B., Hanninen, O., Hurley, F., Krzyanowski, M., Leeuw, F., Liu, S.J.L., Mandin, C., Schneider, J., Schwarze, P., Simpson, D. (2008). Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution, World Health Organization, Europe.
- [9] Chen, Z., Li, R., Chen, D., Zhuang, Y., Gao, B., Yang, L., Li, M. (2020). Understanding the causal influence of major meteorological factors on ground ozone concentrations across China. *Journal of Cleaner Production*. 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118498>.
- [10] Li, K., Chen, L., Ying, F., White, S.J., Jang, C., Wu, X. (2017). Meteorological and chemical impacts on ozone formation: a case study in Hangzhou, China. *Atmos. Res.* 196, 40e52.
- [11] Pu, X., Wang, T.J., Huang, X., Melas, D., Zanis, P., Papanastasiou, D.K. (2017). Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China. *Sci. Total Environ.* 603, 807e816.
- [12] Otero, N., Sillmann, J., Schnell, J. L., Rust, H. W., Butler, T. (2016). Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. *Environmental Research Letters*, 11(2), 024005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/024005>.
- [13] Turner, M. C., Jerrett, M., Pope, C. A., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Beckerman, B.S., Marshall, J.D., Su, J., Crouse, D.L., Burnett, R. T. (2016). Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134–1142. <https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1633oc>.
- [14] Malley, C. S., Henze, D. K., Kuylenstierna, J. C. I., Vallack, H. W., Davila, Y., Anenberg, S. C., Turner, M.C., Ashmore, M. R. (2017). Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥30 Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure. *Environmental Health*

- Perspectives*, 125(8), 087021. <https://doi:10.1289/ehp1390>.
- [15] Lefohn, A.S., Malley, C.S.M., Smith, L., Wells, B., Hazucha, M., Simon, H., Naik, V., Mills, G., Schultz, M.G., Paoletti, E., Marco, A.D., Xu, X., Zhang, L., Wang, Y., Neufeld, H.S., Musselman, R.C., Tarasick, D., Brauer, M., Feng, Z., Tang, H., Kobayashi, K., Sicard, P., Solberg, S., Gerosa, G. (2018). Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6: 27. <https://doi.org/10.1525/elementa.279>
- [16] Díaz, J., Ortiz, C., Falcón, I., Salvador, C., Linares, C. (2018). Short-term effect of tropospheric ozone on daily mortality in Spain. *Atmospheric Environment*, 187, 107–116. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2018.05.05>.
- [17] Baltacı H., Alemdar C.S.O., Akkoyunlu B.O. (2020). Background atmospheric conditions of high PM₁₀ concentrations in Istanbul, Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11, 1524-1534.
- [18] Baltacı H. (2021). Meteorological characteristics of dust storm events in Turkey. *Aeolian Research*, 50, 100673.
- [19] Baltacı H., Ezber Y. (2021). Characterization of atmospheric mechanisms that cause the transport of Arabian dust particles to the southeastern region of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*.
- [20] Baltacı H., Akkoyunlu B.O., Arslan H., Yetemen O., Ozdemir E.T. (2019). The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM₁₀ levels in western Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191,466.
- [21] Baltacı H., Arslan H., Akkoyunlu B.O. (2022). High PM₁₀ source regions and their influence on respiratory diseases in Canakkale, Turkey. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19,797-806.
- [22] Arslan H., Baltacı H., Sahin U.A., Onat B. (2022). The relationship between air pollutants and respiratory diseases for the western Turkey. *Atmospheric Pollution Research*,13,101322.
- [23] İm, U., Tayanç, M., Yenigün, O. (2006). Analysis of major photochemical pollutants with meteorological factors for high ozone days in Istanbul, Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, 175(1-4), 335–359. <https://doi:10.1007/s11270-006-9142-x>.
- [24] Can, A. (2017). Time Series Analysis of Air Pollutants for Karabük Province. ITM Web of Conferences, 9, 02002. <https://doi:10.1051/itmconf/20170902002>.
- [25] Unal, E., Ozdemir, A., Khanjani, N., Dastoorpoor, G.O. (2021). Air pollution and pediatric respiratory hospital admissions in Bursa, Turkey: A time series study. *International Journal of Environmental Health Research*, <https://doi:10.1080/09603123.2021.1991282>.
- [26] National Air Quality and Monitoring Network database (2022). <http://www.havaizleme.gov.tr/Services/AirQuality>
- [27] Sahin, U.A., Onat, B., Akin, O., Ayvaz, C., Uzun, B., Mangır, N., Dogan, M. and Harrison, R.M. (2020). Temporal variations of atmospheric black carbon and its relation to other pollutants and meteorological factors at an urban traffic site in Istanbul. *Atmospheric Pollution Research*. 11: 1051–1062. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.03.009>.
- [28] R Core Team, (2015). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org/>.
- [29] Zeng, Y.-R., Chang, Y.S., Fang, Y.H. (2019). Data visualization for air quality analysis on bigdata platform. In: *International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. <https://doi.org/10.1109/icsse.2019.8823437>.
- [30] Gu, K., Zhou, Y., Sun, H., Dong, F., Zhao, L. (2020). Spatial distribution and determinants of PM_{2.5} in China's cities: fresh evidence from IDW and GWR. *Environ. Monit. Assess.* 193, 15. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08749-6>.
- [31] Ribas, À., Peñuelas, J. (2004). Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin. *Atmospheric Environment*, 38(7), 985-992.
- [32] Ulutas, K., Abujayyab, S.K.M., AMR, S.S.A. (2021). Evaluation of the Major Air Pollutants Levels and Its Interactions with Meteorological Parameters in Ankara. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9(4), 1284-1295. <https://doi.org/10.21923/jesd.939724>
- [33] Botlaguduru, V. S., Kommalapati, R. R., Huque, Z. (2018). Long-term meteorologically independent trend analysis of ozone air quality at an urban site in the greater Houston area. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(10), 1051-1064.
- [34] Yuska, D. E., Skelly, J. M., Ferdinand, J. A., Stevenson, R. E., Savage, J. E., Mulik, J. D., Hines, A. (2003). Use of bioindicators and passive sampling devices to evaluate ambient ozone concentrations in North Central Pennsylvania. *Environmental Pollution*, 125(1), 71-80.
- [35] Gong, X., Hong, S., Jaffe, D. A. (2018). Ozone in China: Spatial distribution and leading meteorological factors controlling O₃ in 16 Chinese cities. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2287-2300.

The Effect of Pressure on Anisotropic Elastic Properties of SbSeI: DFT Calculation

Tahsin Özer 1 

¹ *Osmaniye Korkut Ata University Bahce Vocational High School, Osmaniye, Turkiye.*

Abstract

The mechanical and elastic properties of SbSeI compound under hydrostatic pressure of 0–40 kBar were investigated for the first time. Quantum Espresso software (QE) was used for all calculations. Elastic constants (C_{ij}) were calculated using the ElaStic package distributed with the QE software and using the energy calculation method in this package. According to the elastic constants obtained, the SbSeI compound was found to be mechanically stable. The results obtained at ambient pressure were found to be in perfect agreement with the literature data. Mechanical properties (bulk modulus, shear modulus, Young's modulus, and Poisson's ratio), anisotropy, linear compressibility, Debye temperatures, Vickers hardness, and minimum thermal conductivity of the SbSeI compound were calculated using these constants. As a result of the calculations, it was seen that the SbSeI compound is a soft (Vickers hardness < 10 GPa) and anisotropic material.

Keyword: SbSeI, Pressure effect, Mechanical properties, Quantum Espresso.

1. INTRODUCTION

Bulk V-VI-VII semiconductors are reported to be abundant on earth [1]. The Antimony seleniodide (SbSeI) compound is a member of the family of semiconductor solids of the V-VI-VII type. Here V-VI-VII shows the group numbers on the periodic table. It symbolizes the atoms V (As, Sb, Bi), VI (S, Se, Te) and VII (Cl, Br, I). SbSeI, which is a Chalcogen, has a stoichiometry of 1: 1: 1 and crystallizes in a crystal structure known as the SbSI type [2]. Triple chalcogen materials based on the group V-VI-VII elements form a class with useful and interesting properties that exhibit a wide application potential [3]. It has a wide range of application such as microelectronics, optoelectronics, thermoelectric. These facts caused intense investigation.

SbSeI belongs to the chalcogen materials group. SbSeI is produced from mixtures of the elements antimony (Sb), selenium (Se) and iodine (I) or from mixtures of Sb_2Se_3 and SbI_3 [3]. SbSeI is a semiconductor material, it has pyroelectric, thermoelectric, ferroelectric, piezoelectric, electromechanical, and electrocaloric properties. It is also an excellent candidate for SbSeI photovoltaic devices and radiation detectors [4]. These compounds are influenced by light causing other nonlinear optical effects such as photoferroelectrics, pyro-optic, and electro-optical [5] and a good photoconductor [6]. A few chalcogenides such as SbSI and SbSeI were considered promising photoferroic materials due to their favorable band gap and ferroelectric properties [7].

It has been reported that the lattice parameters of SbSeI are $a = 8.698$ (2) Å, $b = 4.127$ (1) Å, $c = 10.412$ (2) Å [8]. SbSeI crystal has two phases as antiferroelectric ($T < 410$ K) and paraelectric phase (PE) ($T > 410$ K) [9], all atoms are in the 4c Wyckoff position [10]. Structure of SbSeI compound at ambient pressure [8], [11] electronic structure [12]–[14] linear optical and electronic structure [15], mechanical, dynamic, thermodynamic properties [2], [16], [17] and electrical conductivity [3] were investigated. As potential optoelectronic materials, Ran et al. (2018) studied antimony-based oxyhalides and chalcogenides [18].

Theory and calculations have played a crucial role in improving our understanding of material properties and have provided guidelines for searching and designing new materials [19]. Chalcogenide alloys have been an important research topic due to their wide variety of properties. As materials mature and commercial applications come closer, the mechanical properties of materials become an important factor for both their processing and end use [20]. Due to this importance, the subject of investigating the mechanical properties of SbSeI was preferred.

2. MATERIAL METHOD

First principal calculations were performed to reveal the mechanical properties of SbSeI under pressure up to 40 kBar. The calculations were carried out by adopting ab initio density functional theory (DFT) [21], [22] within the Quantum Espresso (QE) software package [23]. Total energy calculations were done with QE software. $5s^2 p^3$ for Sb atom, $4s^2 p^3$ for Se atom and $5s^2 p^5$ electrons for I atom were taken as real

Corresponding Author: TAHŞİN ÖZER, Tel: 0328 827 10 00-dahili 5221, e-posta: tahsinozer@osmaniye.edu.tr

Submitted: 06.07.2022, **Revised:** 25.12.2022, **Accepted:** 08.01.2023

valence electrons. In this study, PAW type pseudopotential files and Local Density Approximation (LDA) were preferred. The electronic wave functions were enlarged in plane wave basis to initiate a kinetic energy cut off (E_{cut}) 130 Ry, and electronic charge density (E_{cutrho}) was taken as 520 Ry. For k-space summation the 4x4x10 Monkhorst and Pack [24] gamma centered grid of k-points have been used for SbSeI. Optimized values of E_{cut} , E_{cutrho} , k-point were used in all operations. The input files used in the energy calculation were produced with the Elastic software using the energy calculation method and the results were analyzed with this software [25].

3. FINDINGS AND DISCUSSION

As the first step in the calculations, structural optimization of SbSeI compound at ambient pressure (zero pressure) was performed. The molecular structure of SbSeI compound was visualized with VESTA software [26] using the data obtained as a result of structural optimization for ambient conditions (Figure 1). As shown in Figure 1, the unit cell of the SbSeI compound contains four molecules and 12 atoms and is in the space group $Pnma-D_{2h}^{16}$ (no: 62) in orthorhombic structure. Using these values, 4, 8, 12, 16 and 40 kBar hydrostatic pressure was applied to the system. The analyzes showed that the structure did not undergo a phase transition at the pressures studied. Geometric optimization was made for each pressure value. The results obtained were used in elastic constant calculations.

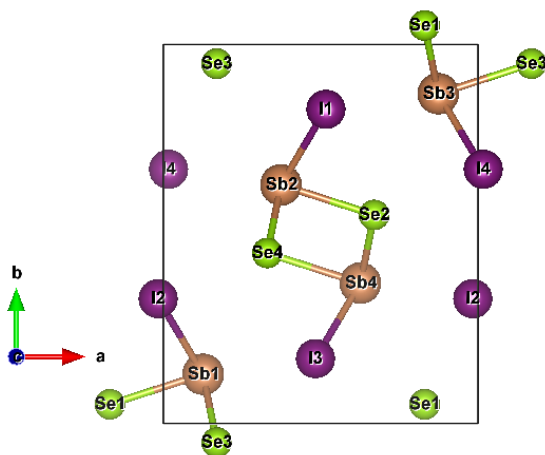


Figure 1. Crystal structure of SbSeI compound.

3.1 The Elastic Constants

Elastic constants can be calculated for many properties of material such as the mechanical stability, anisotropic behavior, ductility, brittleness, specific heat, thermal expansion, Debye temperature and Gruneisen parameters [27]. These properties are very important in design of material. For example, it is desirable that the material designed as piercing and cutting tool is hard.

For an orthorhombic system, there are nine independent elastic constants exist: C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} ,

C_{55} , C_{66} , C_{12} , C_{13} , and C_{23} which are presented in Table 1. As shown in Table 1, the values obtained in this work are consistent with the literature data given for 0 kBar.

Table 1. Elastic constants of SbSeI compound calculated at different hydrostatic pressure (P in kBar, C_{ij} in GPa).

P	C_{11}	C_{22}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}	C_{12}	C_{13}	C_{23}
0 *	38.20	61.10	34.70	8.30	21.00	10.70	16.30	17.20	20.50
0 **	39.23	62.45	33.53	9.11	21.26	10.73	16.03	16.59	19.44
4 *	43.30	63.50	39.10	10.30	23.00	11.70	18.20	19.20	21.70
8 *	48.40	66.90	43.90	12.00	25.90	13.60	21.00	20.40	24.80
12 *	53.40	69.80	50.60	14.00	28.80	14.90	21.70	22.40	27.00
16 *	57.90	72.50	55.50	16.60	31.40	16.30	23.60	23.80	29.20
40 *	82.70	87.60	81.20	26.90	44.10	24.30	35.00	30.20	41.00

* This work, ** [16]

Conventional mechanical stability conditions on elastic constants in orthorhombic systems [28],

$$\begin{aligned}
 & (C_{22} + C_{33} - 2C_{23}) > 0, \\
 & (C_{11} + C_{22} + C_{33} + 2C_{12} + 2C_{13} + 2C_{23}) > 0 \\
 & (C_{11} + C_{22} - 2C_{12}) > 0, \quad (C_{11} + C_{33} - 2C_{13}) > 0 \\
 & C_{11} > 0, \quad C_{22} > 0, \quad C_{33} > 0, \quad C_{44} > 0, \quad C_{55} > 0, \quad C_{66} > 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

The elastic constants of orthorhombic SbSeI shown in Table 1 meet the Born stability criteria (mechanical stability conditions) given in equation 1. In this regard, it can be said that the SbSeI compound is mechanically stable. As known, from the elastic constants C_{11} , C_{22} and C_{33} are responsible for linear compression along the x -axis, y -axis and z -axis, respectively. If these values are large, it means the compressibility will be small. It can be said that the SbSeI compound can be compressed more along the x and z axes than the y axis. As a result of the calculations, it was seen that C_{22} among the elastic constants had the largest value. Thus, it can be said that C_{11} and C_{33} are more sensitive to pressure. Also, the value of all elastic constants increased with pressure. Again, it can be said from Table 1 that orthorhombic SbSeI is elastically anisotropic.

The elastic constant C_{44} (In orthorhombic structures) is an important parameter that governs the hardness of the material [16]. As can be seen from Table 1, this compound has small value of C_{44} indicating relatively poor shear strength. Furthermore, Bulk modulus (B) and shear module (G) are the most important parameters determining the hardness of the materials. Magnitude of the values indicates hardness of material. As known, bulk modulus is the measure of resistance against compression. The smaller size of the bulk module indicates the higher compressibility of the material, and the large size indicates the incompressibility. Usually, shear modulus is characterized as the ratio of stress to strain under shear deformation. A large shear modulus value indicates

that there is a great resistance to shear deformation, a small one indicates that this resistance is small. Bulk and shear modulus can be calculated from elastic constants with the following equations [27], [29], which are widely used in the literature.

$$B_V = \frac{1}{9}[C_{11} + C_{22} + C_{33} + 2C_{12} + 2C_{13} + 2C_{23}] \quad (2)$$

$$\frac{1}{B_R} = S_{11} + S_{22} + S_{33} + 2[S_{12} + S_{13} + S_{23}] \quad (3)$$

$$G_V = \frac{1}{15}(C_{11} + C_{22} + C_{33} - C_{12} - C_{13} - C_{23}) + \frac{1}{5}(C_{44} + C_{55} + C_{66}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{G_R} = \frac{1}{15}[4(S_{11} + S_{22} + S_{33}) + 3(S_{44} + S_{55} + S_{66}) - 4(S_{12} + S_{13} + S_{23})] \quad (5)$$

Hill approximation is the average of Reuss (the lower limit) and Voight (the upper limit) and the result is closer to the experimental result. Mathematical expression of Hill approximation,

$$G_H = \frac{G_R + G_V}{2} \quad B_H = \frac{B_R + B_V}{2} \quad (6)$$

Calculating the Young's modulus, the size of which indicates the hardness of the material, is another way of estimating the hardness of the material. Large value indicates that the material is hard. Young's modulus is (E) [27], [29],

$$E_X = \frac{9B_X G_X}{G_X + 3B_X} \quad (7)$$

The subscales V , R and H in the equations correspond to the Voight, Reuss and Hill approximation, respectively. X shows the V - R - H approach. Additionally, by looking at B / G ratio can be estimate

ductile or brittle nature of a material. If the B / G ratio is less than 1.75, it can be classified as brittle, if it is higher than 1.75, it can be classified as ductile material [30]. The B , G and E values calculated from the elastic constants using the above equations (2-7) are given in Table 2 with available literature data. It was calculated as the B (26.15), G (12.47), B / G (2.097), and E (32.28) at ambient pressure. As can be seen in Table 2, the values obtained are consistent with the literature. By looking at the B / G ratio, it can be said that the SbSeI compound is in a ductile nature. Therefore, the SbSeI compound can be used in portable devices.

By calculating the Poisson's ratio, the nature of the bond forces can be studied. The Poisson's ratio is 0.1 for pure covalent crystals and 0.25 for pure ionic crystals [31]. The lower and upper bounds of the Poisson's ratio for central forces are 0.25 and 0.50, respectively. Poisson's ratio (ϑ) can be calculated from B and G values [32].

$$\vartheta_X = \frac{1}{2} \left[\frac{B_X - (2/3)G_X}{B_X + (1/3)G_X} \right] \quad (8)$$

Poisson's ratio calculated with Equation 8 were compared with the data available from the literature (Table 2). According to the Poisson's ratio given in Table 2, it can be said that ionic bonding is dominant in SbSeI compound. Also, as can be seen from the Poisson's ratio in Table 2, the SbSeI compound is under the influence of central forces. Again, while B , G and E values increased with increasing pressure, ϑ and B / G were decreased.

Table 2: Calculated elastic modules (in GPa) and Poisson's ratio.

P (kBar)	R	B_V	B_R	B_H	G_V	G_R	G_H	B_H/G_H	ϑ_H	E_V	E_R	E_H
0	*	26.89	25.42	26.15	13.33	11.61	12.47	2.097	0.294	34.33	30.23	32.28
0	**	26.59	25.00	25.78	13.76	12.07	12.92	2.00	0.29	-	-	33.20
4	*	29.34	28.22	28.78	14.79	13.26	14.02	2.052	0.290	37.98	34.40	36.20
8	*	32.40	31.27	31.84	16.50	15.05	15.78	2.018	0.287	42.32	38.92	40.62
12	*	35.11	34.37	34.74	18.39	16.95	17.67	1.966	0.283	46.96	43.67	45.32
16	*	37.68	37.05	37.36	20.15	18.77	19.46	1.920	0.278	51.30	48.17	49.74
40	*	51.54	51.24	51.39	28.75	27.06	27.90	1.842	0.270	72.72	69.03	70.88

* This work, ** [16]

The hardness of the material is important in terms of materials science and material engineering. So Vickers hardness was defined to express the hardness of the material. There are several models for describing Vickers hardness. Chen's model is ($k = G / B$) [33],

$$H_v = 2(k^2 G)^{0.585} - 3 \quad (9)$$

Experimental correlation suggested by Yousef is [34],

$$H = \frac{(1 - 2\theta)E}{6(1 + \theta)} \tag{10}$$

Tian's model is [35]

$$H_v = 0,92 k^{1,137} G^{0,708} \tag{11}$$

Table 3: Linear compressibility (TPa⁻¹) and hardness (GPa) of the material.

P (kBar)	β_x	β_y	β_z	Tian	Yousef	Chen
0	15.67	6.39	17.28	2.37	1.71	0.68
0 ^a	14.98	6.34	18.74	2.57	1.85	0.98
4	13.54	6.67	15.23	2.63	1.96	1.04
8	12.29	6.03	13.67	2.92	2.24	1.42
12	11.38	6.42	11.31	3.26	2.56	1.87
16	10.52	6.252	10.22	3.58	2.88	2.29
40	7.34	5.232	6.94	4.85	4.28	3.86

^a Calculated from elastic constants reported in Reference 16.

The Vickers hardness calculated for different pressure values with different models are given in Table 3. Vickers hardness was calculated as 0.68 (Chen), 1.71 (Yousef) and 2.37 GPa (Tian) for SbSeI compound using the equations 9-11 given above. Li et al. (2020) stated that materials with H_v values less than 10 GPa can be classified as soft materials [36]. According to this result, it can be said that the SbSeI compound is not hard. Therefore, it is not expected to be used in drilling and cutting applications that require hardness. Looking at the data obtained as a result of the calculations (Table 3), it was observed that the hardness was increased corresponding to the increasing pressure value, as expected.

Linear compressibility,

$$\beta_x = S_{11} + S_{12} + S_{13} \quad \beta_y = S_{12} + S_{22} + S_{23} \quad \beta_z = S_{13} + S_{23} + S_{33} \tag{12}$$

Considering the elastic compressibility coefficients given in Table 3, calculated with Equation 12, can be said that SbSeI compound is least compressible along the y-axis.

3.2 Anisotropy of the Material

Elastic anisotropy, unusual phonon modes, dislocation dynamics, precipitation, anisotropic plastic deformation, etc. It has an important function in determining the technological use of the material, which has effects on the mechanical / physical properties of the material, such as in addition, understanding the formation of microcracks caused by anisotropy is important in terms of increasing the

mechanical stability of the material. Because of this importance, anisotropy calculations are necessary[37]. Several equations are used in anisotropy calculations. These are: Universal elastic anisotropic index A^U , percent compressible anisotropy A_B , percent shear anisotropy A_G , and shear anisotropic factors A_1 , A_2 and A_3 , and these expressions are [27], [38], [39],

$$A_1 = \frac{4C_{44}}{C_{11} + C_{33} - 2C_{13}} \quad \text{For the } \{100\} \text{ plane} \tag{13}$$

$$A_2 = \frac{4C_{55}}{C_{22} + C_{33} - 2C_{23}} \quad \text{For the } \{010\} \text{ plane} \tag{14}$$

$$A_3 = \frac{4C_{66}}{C_{11} + C_{22} - 2C_{12}} \quad \text{For the } \{001\} \text{ plane} \tag{15}$$

$$A_B = \frac{B_V - B_R}{B_V + B_R} \times 100 \quad A_G = \frac{G_V - G_R}{G_V + G_R} \times 100 \tag{16}$$

$$A^U = 5 \frac{G_V}{G_R} + \frac{B_V}{B_R} \geq 0 \tag{17}$$

If the material is elastically isotropic, the value of the A_1, A_2, A_3 are 1, otherwise it different from 1. A^U, A_B and A_G values are zero in isotropic materials. It different from zero in anisotropies. The amount of deviation from one or zero indicates the degree of anisotropy. The elastic anisotropy values calculated by Equation 13-17 are given in Table 4 together with the available literature values. According to all anisotropy expressions (From Table 4), SbSeI compound exhibits anisotropic behavior. Again, from Table 4, it is seen that {010} plane is more anisotropic than the other {100} and {001} plane.

Table 4: Anisotropy factors of the material.

P(kBar)	$A^U \geq 0$	A_1	A_2	A_3	A_B	A_G
0	0.79	0.86	1.53	0.64	2.81	6.91
0 ^a	0.77	0.92	1.49	0.62	3.15	6.55
4	0.61	0.94	1.55	0.67	1.95	5.43
8	0.52	0.93	1.69	0.74	1.77	4.58
12	0.45	0.95	1.74	0.75	1.07	4.06
16	0.39	1.01	1.81	0.79	0.84	3.55
40	0.32	1.04	2.03	0.97	0.29	3.02

^a Calculated from elastic constants reported in Reference 16.

Anisotropy was visualized in 3D and 2D with ELATE software [40] and was given in Figure 2 so that the anisotropy of the studied material can be seen more easily. In three-dimensional (two-dimensional) representation, the shape of an anisotropic material is represented by the deviation from the spherical (circle) shape. The amount of deviation from sphericity (circularity) is a measure of anisotropy. Deviations from the spherical (circle) shape are clearly visible when the 3D (2D) plots of Young, shear modulus, Poisson's ratio, and linear compressibility (Figure 2) are examined. Anisotropy is clearly visible from these 3D (2D) graphics.

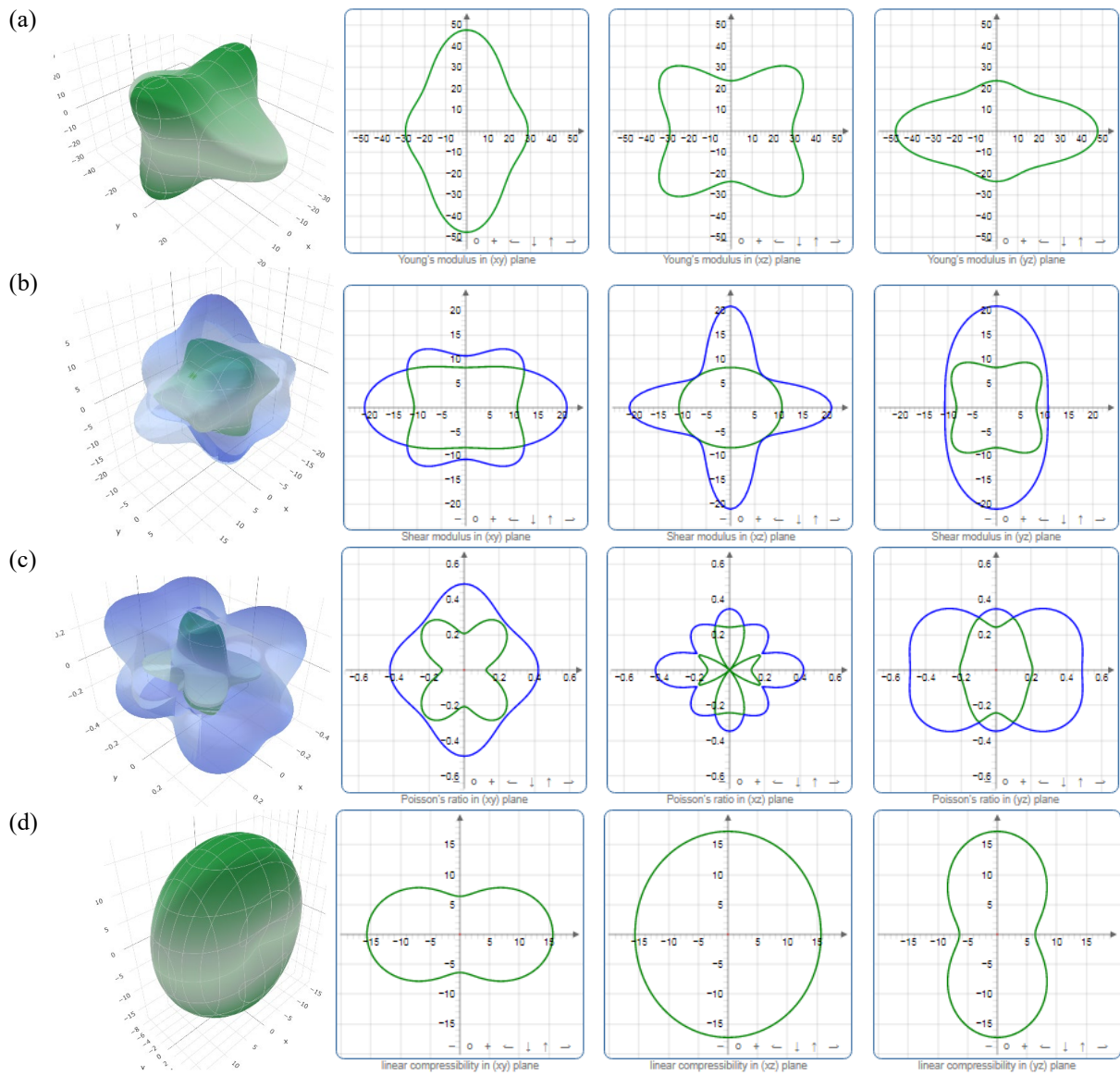


Figure 2. Two- and three-dimensional representation of Young's modulus (a), Shear modulus (b), Poisson's ratio (c), Linear compressibility (d) of SbSeI compound at ambient pressure. In the figure, the blue lines represent the maximum values, and the green lines represent the minimum values.

3.3 Thermal Properties

It is known that Debye temperature is an important basic parameter that is closely related to many physical properties such as melting temperature, cohesion energy, specific heat, thermal conductivity, thermal expansion, lattice vibration and hardness [31], [41]–[44]. Vibration warning at low temperatures is only caused by acoustic vibrations. Therefore, the Debye temperature calculated from the elastic constants at low temperatures is the same as that determined from the specific heat measurements. From the equations below, the Debye temperature can be calculated in Kelvin units [29].

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} \left(\frac{3}{4\pi V_a} \right)^{1/3} v_m \tag{18}$$

$$v_m = \left[\left(\frac{2}{v_s^3} + \frac{1}{v_l^3} \right) / 3 \right]^{-1/3} \tag{19}$$

$$v_l = \sqrt{(B_x + 4G_x/3)/\rho} \quad v_s = \sqrt{G_x/\rho} \tag{20}$$

In the equations, Planck (h), Boltzmann constant (k_B), atomic volume (V_a), average sound velocity (v_m) in polycrystalline system. Debye temperature, v_m , v_l and v_s calculated by Equation 18-20 are given in Table 5 together with the available literature values by calculating information. It is seen that the Debye temperature calculated from Table 5 is compatible with the literature value. It is seen that θ_D , v_m , v_l , v_s values increase with increasing pressure value.

Table 5: Density ρ (kg/m^3), Debye temperature θ_D (K), longitudinal v_l (m/s), transverse v_s (m/s) and sound velocity v_m (m/s) of the material.

P (kBar)	ρ	Voigt θ_D	Reuss θ_D	Hill			
				v_s	v_l	v_m	θ_D
0	6191.7	158.1	147.8	1419.3	2628.7	1584.2	153.0
0 ^a	6161.6	160.6	150.6	1446.05	2641.9	1614.5	155.6
4	6333.8	165.8	157.2	1488.0	2738.0	1660.1	161.6
8	6497.3	174.3	166.7	1558.3	2852.6	1737.8	170.6
12	6632.0	183.3	176.2	1632.2	2964.8	1819.2	179.8
16	6761.6	191.1	184.7	1696.3	3059.8	1889.6	187.9
40	7451.1	224.4	218.0	1935.2	3448.2	2153.5	221.2

^a Calculated from elastic constants reported in Reference 16.

The Grüneisen parameter, γ_a , is an important quantity in condensed matter physics and geophysics, especially in investigating the thermodynamic behavior of materials at high pressures and temperatures [45]. The value of the Grüneisen constant range is between one and two. The acoustic Grüneisen constant defined in Eq. (21) [46]–[48] is calculated:

$$\gamma_a = \frac{3}{2} \left(\frac{3v_l^2 - 4v_s^2}{v_l^2 + 2v_s^2} \right) \quad (21)$$

The estimated γ_a values are given in Table 6. Since the Grüneisen constant is close to two and is inversely proportional to the thermal conductivity, its thermal conductivity is expected to be small. As can be clearly seen from Table 6, with the increase of hydrostatic pressure, the γ_a constant decreased, and the thermal conductivity increased.

The higher the Debye temperature, the stronger the chemical bonds in the crystal, while the smaller indicates the weaker the chemical bonds. Higher Debye temperature always means higher hardness [41], [42]. Higher Debye temperature corresponds to better thermal conductivity of the compound [31]. The high heat dissipation capacity of the material indicates that its thermal conductivity is high. Therefore, thermal conductivity is very important for high temperature materials [42]. The minimum thermal conductivity determines the theoretical lower limit of the intrinsic thermal conductivity of a material [49]. The minimum thermal conductivity (k_{min}) can be calculated from Equation 22-23 [31], [50].

$$k_{min} = 0.87 k_B M_a^{-2/3} E^{1/2} \rho^{1/6} \quad (22)$$

$$M_a = [M/(m.N_A)] \quad (23)$$

The calculated M_a (mean atomic mass) and k_{min} values are given in Table 6. The minimum thermal conductivity at ambient pressure was calculated as 0.289 [50], 0.320 [51], and 0.230 $Wm^{-1}K^{-1}$ [52]. The minimum thermal conductivity of the SbSeI compound was not found in the literature.

However, in terms of giving an idea to the reader, it has been compared with the results of the study of Wang et al., (2020) and Long et al., (2015). The minimum thermal conductivity of BiSeI, which is a member of the same family as SbSeI, has been reported as 0.27 $Wm^{-1}K^{-1}$ [53]. Long et al. (2015) reported that the value of k_{min} increased with increasing pressure [52]. As can be clearly seen from the data obtained with this study (Table 6), the k_{min} value of the SbSeI compound increased with increasing pressure. It can be said that this situation is compatible with the literature data. The thermal conductivities calculated for the SbSeI compound are small. The small value of the calculated minimum thermal conductivity is consistent with the Grüneisen constant.

Table 6: Calculated acoustic Grüneisen constant (γ_a), thermal conductivity ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

P (kBar)	γ_a	M_a (10^{-25})	k_{min} (Clarke)	k_{min} (Cahil)	k_{min} (Long)
0	1.738	1.87	0.289	0.320	0.230
0 ^a	1.685	1.81	0.293	0.339	0.245
4	1.715	1.81	0.307	0.340	0.245
8	1.697	1.81	0.326	0.361	0.261
12	1.670	1.81	0.346	0.382	0.277
16	1.645	1.81	0.364	0.401	0.291
40	1.602	1.81	0.441	0.485	0.354

^a Calculated from elastic constants reported in Reference 16.

4. CONCLUSION

Elastic constants of SbSeI compound under 0-40 kBar hydro static pressure were calculated with QE and ElaStic software. It was seen that the value found in the ambient pressure was compatible with the literature data. It can be said that it is mechanically stable from the calculated elastic constants Anisotropy was calculated with different approaches and visualized with ELATE software. As a result of detailed examination of the anisotropy of the compound, it was shown that it was anisotropic. Several properties such as Vickers hardness (2.37 GPa), Debye temperature (153 K) and minimum thermal conductivity (0.289 $W.m^{-1}.K^{-1}$), which are important for materials science and engineering, were calculated. It is not a hard material as the calculated

Vickers hardness is less than 10 GPa. Based on this result, it can be categorized as soft material. Many physical properties of the material are closely related to the Debye temperature. Therefore, the pressure dependence of the sound velocity, the Grüneisen constant, the thermal conductivity and the Debye temperature were studied. Due to the low thermal conductivity of the SbSeI compound, it can be used as a thermal insulator in applications.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no conflict of interest.

FUNDING

This study was supported by Osmaniye Korkut Ata University BAP Coordination Unit with the project numbered "OKÜBAP2018-PT2-001" named "Investigation of Structural and Mechanical Properties of SbXI (X=S, Se) Compounds Under High Pressure by Ab Initio Method".

REFERENCES

- [1] B. Peng *et al.*, "Atomically sharp 1D SbSeI, SbSI and SbSBr with high stability and novel properties for microelectronic, optoelectronic, and thermoelectric applications," Mar. 2017, Accessed: Feb. 10, 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1703.05732>
- [2] Z. S. Aliev, S. S. Musaeva, D. M. Babanly, A. V. Shevelkov, and M. B. Babanly, "Phase diagram of the Sb-Se-I system and thermodynamic properties of SbSeI," *J. Alloys Compd.*, vol. 505, no. 2, pp. 450–455, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jallcom.2010.06.103.
- [3] W. Khan, S. Hussain, J. Minar, and S. Azam, "Electronic and Thermoelectric Properties of Ternary Chalcogenide Semiconductors: First Principles Study," *J. Electron. Mater.*, vol. 47, no. 2, pp. 1131–1139, Feb. 2018, doi: 10.1007/s11664-017-5884-z.
- [4] K. Mistewicz *et al.*, "Nanogenerator for determination of acoustic power in ultrasonic reactors," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 78, p. 105718, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105718.
- [5] A. Starczewska, "New Approach to Well-Known Compounds — Fabrication and Characterization of A V B VI C VII Nanomaterials," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 139, no. 4, pp. 394–400, Apr. 2021, doi: 10.12693/APhysPolA.139.394.
- [6] R. Nie, M. Hu, A. M. Risqi, Z. Li, and S. Il Seok, "Efficient and Stable Antimony Selenoiodide Solar Cells," *Adv. Sci.*, vol. 8, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.1002/ADVS.202003172.
- [7] S. K. Balakrishnan, P. C. Parambil, and E. Edri, "Mechanistic Insight into the Topotactic Transformation of Trichalcogenides to Chalcogenides," *Chem. Mater.*, vol. 34, no. 7, pp. 3468–3478, Apr. 2022, doi: 10.1021/ACS.CHEMMATER.2C00306/SUPPL_FILE/CM2C00306_SI_001.PDF.
- [8] A. Ibanez, J. C. Jumas, J. Olivier-Fourcade, E. Philippot, and M. Maurin, "Sur les chalcogenoiodures d'antimoine SbXI (X = S, Se, Te): Structures et spectroscopie Mössbauer de ¹²¹Sb," *J. Solid State Chem.*, vol. 48, no. 2, pp. 272–283, Jul. 1983, doi: 10.1016/0022-4596(83)90082-8.
- [9] A. Audzjonis, R. Sereika, and R. Žaltauskas, "Antiferroelectric phase transition in SbSI and SbSeI crystals," *Solid State Commun.*, vol. 147, no. 3–4, pp. 88–89, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.ssc.2008.05.008.
- [10] Y. Shiozaki, E. Nakamura, and T. Mitsu, Eds., *Ferroelectrics and related substances, Inorganic substances other the oxides. Part 1 : SbSI family*. Londalt-Börnstein- Group III condensed matter, 2002.
- [11] G. P. Voutsas and P. J. Rentzeperis, "The crystal structure of antimony selenoiodide, SbSeI," *Zeitschrift fur Krist. - New Cryst. Struct.*, vol. 161, no. 1–2, pp. 111–118, 1982, doi: 10.1524/zkri.1982.161.1-2.111.
- [12] D. V. Chepur, D. M. Bercha, I. D. Turyanitsa, and V. Y. Slivka, "Peculiarities of the Energy Spectrum and Edge Absorption in the Chain Compounds A^VB^{VI}C^{VII}," *Phys. Status Solidi*, vol. 30, no. 2, pp. 461–468, Jan. 1968, doi: 10.1002/pssb.19680300206.
- [13] V. V. Sobolev, E. V. Pesterev, and V. V. Sobolev, "Absorption spectra of SbSeI and BiSeI crystals," *Inorg. Mater.*, vol. 40, no. 1, pp. 16–19, Jan. 2004, doi: 10.1023/B:INMA.0000012172.80204.9d.
- [14] K. Zickus and A. Audzjonis, "The Absorption Edge of SbSeI and BiSeI," *Phys. Status Solidi B*, vol. 121, no. 1, pp. 51–53, 1984.
- [15] H. Akkus, A. Kazempour, H. Akbarzadeh, and A. M. Mamedov, "Band structure and optical properties of SbSeI: density-functional calculation," *Phys. status solidi*, vol. 244, no. 10, pp. 3673–3683, Oct. 2007, doi: 10.1002/pssb.200642615.
- [16] T. Ozer and S. Cabuk, "First-principles study of the structural, elastic and electronic properties of SbXI (X=S, Se, Te) crystals," *J. Mol. Model.*, vol. 24, no. 3, p. 66, Mar. 2018, doi: 10.1007/s00894-018-3608-9.
- [17] T. Ozer and S. Cabuk, "Ab initio study of the lattice dynamical and thermodynamic properties of SbXI (X= S, Se, Te) compounds," *Comput. Condens. Matter*, vol. 16, 2018, doi: 10.1016/j.cocom.2018.e00320.
- [18] Z. Ran *et al.*, "Bismuth and antimony-based oxyhalides and chalcogenides as potential optoelectronic materials," *npj Comput. Mater.*, vol. 4, no. 1, p. 14, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41524-018-0071-1.
- [19] J. W. Choi, B. Shin, P. Gorai, R. L. Z. Hoye, and

- R. Palgrave, "Emerging Earth-Abundant Solar Absorbers," *ACS Energy Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 1553–1557, Apr. 2022, doi: 10.1021/acsenergylett.2c00516.
- [20] W. Everhart and J. Newkirk, "Mechanical properties of Heusler alloys," *Heliyon*, vol. 5, no. 5, p. e01578, May 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01578.
- [21] P. Hohenberg and W. Kohn, "Inhomogeneous electron gas," *Phys. Rev.*, vol. 136, no. 3B, 1964, doi: 10.1103/PhysRev.136.B864.
- [22] W. Kohn and L. J. Sham, "Self-consistent equations including exchange and correlation effects," *Phys. Rev.*, vol. 140, no. 4A, 1965, doi: 10.1103/PhysRev.140.A1133.
- [23] P. Giannozzi *et al.*, "QUANTUM ESPRESSO: A modular and open-source software project for quantum simulations of materials," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 21, no. 39, 2009, doi: 10.1088/0953-8984/21/39/395502.
- [24] H. J. Monkhorst and J. D. Pack, "Special points for Brillouin-zone integrations," *Phys. Rev. B*, vol. 13, no. 12, pp. 5188–5192, 1976, doi: 10.1103/PHYSREVB.13.5188.
- [25] R. Golezorkhtabar, P. Pavone, J. Spitaler, P. Puschnig, and C. Draxl, "ElaStic: A tool for calculating second-order elastic constants from first principles," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 184, no. 8, pp. 1861–1873, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.cpc.2013.03.010.
- [26] K. Momma and F. Izumi, "VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 44, no. 6, pp. 1272–1276, Dec. 2011, doi: 10.1107/S0021889811038970.
- [27] P. Ravindran, L. Fast, P. A. Korzhavyi, B. Johansson, J. Wills, and O. Eriksson, "Density functional theory for calculation of elastic properties of orthorhombic crystals: Application to TiSi₂," *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no. 9, pp. 4891–4904, Nov. 1998, doi: 10.1063/1.368733.
- [28] O. Beckstein, J. E. Klepeis, G. L. W. Hart, and O. Pankratov, "First-principles elastic constants and electronic structure of α -Pt₂Si and PtSi," *Phys. Rev. B*, vol. 63, no. 13, p. 134112, Mar. 2001, doi: 10.1103/PhysRevB.63.134112.
- [29] D. Connétable and O. Thomas, "First-principles study of the structural, electronic, vibrational, and elastic properties of orthorhombic NiSi," *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 9, p. 094101, Mar. 2009, doi: 10.1103/PhysRevB.79.094101.
- [30] S. F. Pugh, "XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 45, no. 367, pp. 823–843, Aug. 1954, doi: 10.1080/14786440808520496.
- [31] G. K. Arusei, M. Chepkoech, G. O. Amolo, and N. Wambua, "The elastic properties and lattice dynamics for selected 211 MAX phases: A DFT study," Nov. 2020, Accessed: Jan. 23, 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2011.07102>
- [32] U. Koroglu, S. Cabuk, and E. Deligoz, "First-principles study of structural, elastic, electronic and vibrational properties of BiCoO₃," *Solid State Sci.*, vol. 34, pp. 1–7, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2014.04.015.
- [33] X.-Q. Chen, H. Niu, D. Li, and Y. Li, "Modeling hardness of polycrystalline materials and bulk metallic glasses," *Intermetallics*, vol. 19, no. 9, pp. 1275–1281, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.intermet.2011.03.026.
- [34] E. S. Yousef, A. El-Adawy, and N. El-KheshKhany, "Effect of rare earth (Pr₂O₃, Nd₂O₃, Sm₂O₃, Eu₂O₃, Gd₂O₃ and Er₂O₃) on the acoustic properties of glass belonging to bismuth–borate system," *Solid State Commun.*, vol. 139, no. 3, pp. 108–113, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.SSC.2006.05.022.
- [35] Y. Tian, B. Xu, and Z. Zhao, "Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 33, pp. 93–106, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2012.02.021.
- [36] W. Liu, Y. Niu, and W. Li, "Theoretical prediction of the physical characteristic of Na₃MO₄ (M=Np and Pu): The first-principles calculations," *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 16, pp. 25359–25365, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.07.003.
- [37] G. Surucu, "Investigation of structural, electronic, anisotropic elastic, and lattice dynamical properties of MAX phases borides: An Ab-initio study on hypothetical M₂AB (M = Ti, Zr, Hf; A = Al, Ga, In) compounds," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 203, pp. 106–117, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2017.09.050.
- [38] S. I. Ranganathan and M. Ostoja-Starzewski, "Universal Elastic Anisotropy Index," *APS*, vol. 101, no. 5, Aug. 2008, doi: 10.1103/PhysRevLett.101.055504.
- [39] D. H. Buessem and W. R. Chung, *Anisotropy in Single-Crystal Refractory Compounds*, 1st editio. Boston, MA: Springer US, 1968. doi: 10.1007/978-1-4899-5307-0.
- [40] R. Gaillac, P. Pullumbi, and F.-X. Coudert, "ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 28, no. 27, p. 275201, Jul. 2016, doi: 10.1088/0953-8984/28/27/275201.
- [41] Y. Duan, Y. Wang, M. Peng, and K. Wang, "Insight into anisotropies in mechanical and thermal properties of AGdS₂ (A = alkali metals) ternary gadolinium sulfides," *Mater. Today Commun.*, vol. 26, p. 101991, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101991.
- [42] Y. Wang, Y. Wu, X. Wang, Y. Duan, and M.

- Peng, "Insights into structural stability, electronic structure, and elastic and thermodynamic properties of A15-type Mo₃X (X = Si, Ge, and Sn) compounds based on first-principles predictions," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 151, p. 109925, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jpcs.2020.109925.
- [43] W. Zuo, V. Pelenovich, D. Neena, X. Zeng, C. Liu, and D. Fu, "Determination of Debye temperatures in SmFe_{1-x}CoxAsO superconductors by Mössbauer spectroscopy and effect of cobalt doping," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 146, p. 109621, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jpcs.2020.109621.
- [44] D. N. Blaschke, "Velocity dependent dislocation drag from phonon wind and crystal geometry," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 124, pp. 24–35, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jpcs.2018.08.032.
- [45] N. Korozlu, K. Colakoglu, E. Deligoz, and G. Surucu, "First-principles study of structural, elastic, lattice dynamical and thermodynamical properties of GdX (X = Bi, Sb)," *Philos. Mag.*, vol. 90, no. 14, pp. 1833–1852, May 2010, doi: 10.1080/14786430903489607.
- [46] J. Kou, Y. Zhou, K.-L. Li, and L.-H. Gan, "The stability, electronic, mechanical and thermal properties of three novel superhard carbon crystals," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 182, p. 109758, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.commatsci.2020.109758.
- [47] C. M. I. Okoye, "Structural, elastic and electronic structure of LiCu₂Si, LiCu₂Ge and LiAg₂Sn intermetallic compounds," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 141–148, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.commatsci.2014.05.016.
- [48] F. Arab, F. A. Sahraoui, K. Haddadi, A. Bouhemadou, and L. Louail, "Phase stability, mechanical and thermodynamic properties of orthorhombic and trigonal MgSiN₂: an ab initio study," *Phase Transitions*, vol. 89, no. 5, pp. 480–513, May 2016, doi: 10.1080/01411594.2015.1089574.
- [49] G. Surucu and A. Erkisi, "The First Principles Investigation of Structural, Electronic, Mechanical and Lattice Dynamical Properties of the B and N Doped M₂AX Type MAX Phases Ti₂AlB_{0.5}C_{0.5} and Ti₂AlN_{0.5}C_{0.5} Compounds," *J. Boron*, Mar. 2018, doi: 10.30728/boron.333855.
- [50] D. R. Clarke, "Materials selections guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 163–164, pp. 67–74, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0257-8972(02)00593-5.
- [51] D. G. Cahill, S. K. Watson, and R. O. Pohl, "Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 10, p. 6131, Sep. 1992, doi: 10.1103/PhysRevB.46.6131.
- [52] J. Long, C. Shu, L. Yang, and M. Yang, "Predicting crystal structures and physical properties of novel superhard p-BN under pressure via first-principles investigation," *J. Alloys Compd.*, vol. 644, pp. 638–644, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2015.04.229.
- [53] D. Wang *et al.*, "Extremely low thermal conductivity from bismuth selenohalides with 1D soft crystal structure," *Sci. China Mater.*, vol. 63, no. 9, pp. 1759–1768, Sep. 2020, doi: 10.1007/S40843-020-1407-X.

Web Tarayıcıları için Etkili Tohum URL Seçimi ve Kapsam Genişletme Algoritması

Effective Seed URL Selection and Scope Extension Algorithm for Web Crawler

Zülfü ALNAOĞLU¹ , M.Ali AKCAYOL² 

¹ Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya MYO, Bilişim Teknolojileri Bölümü, Hatay, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Ankara, Türkiye

Öz

Web, hızla büyüyen ve her türden verilerin bulunduğu devasa bir veri kaynağıdır. Kullanıcılar bu veri kaynağından istedikleri verileri almak için arama motorlarını kullanırlar. Arama motorları bu verileri web tarayıcıları ile elde ederler. Web tarayıcıları web sayfalarındaki tek düzen kaynak bulucuları (URL-Uniform Resource Locator) izleyerek ulaştıkları tüm sayfalardaki verileri alır, ayrıştırır ve indekslerler. Web tarama sürecindeki en önemli konular hangi URL'lerden başlanacağı ve taramanın kapsamıdır. Bu yazıda kapsamı tüm web olan genel bir tarayıcının tohum URL seçim ve kapsam genişletme yöntemleri sunulmuştur. Tohum URL seçiminde 102 farklı ülkede ziyaretçinin günlük harcadığı saat, ziyaretçi başına günlük sayfa görüntüleme sayısı, aramadan gelen trafiğin yüzdesi ve toplam bağlı site sayısı temel alınarak oluşturulmuş üç farklı tohum URL seti oluşturulup detaylı bir şekilde performansları analiz edilmiştir. Ayrıca kapsamı hızlı bir şekilde genişletmek için link skoruna dayalı yeni bir tarama algoritması önerilmiş, tohum URL setleri kullanılarak taramalar yapılmış, karşılaştırılmış ve detaylı analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Web Tarayıcıları, Tohum URL Seçimi, Kapsam Genişletme, Link Skoru Hesaplama

Abstract

The web is a huge data source which is rapidly growing and which keeps all kinds of data. Users use search engines to get the data they want from this data source. Search engines obtain these data through web crawlers. Web crawlers retrieve, parse, and index data on all pages they reach by tracking uniform resource locators (URL) on web pages. The most important issues in the web crawling process are which URLs to start from, and the scope of the crawl. In this study, seed URL selection and scope expansion methods of a general web crawler were presented. In the selection of seed URLs, three different seed URL sets were created based on the daily hours spent by the visitors in 102 different countries, the number of daily page views per visitor, the percentage of traffic from the search, and the total number of affiliate sites, and their performance was analyzed thoroughly. Furthermore, a new search algorithm based on link score was proposed to expand the scope quickly, searches were made, compared, and detailed analyzes were performed using seed URL sets.

Keywords: Web Crawler, Seed URL Selection, Scope extension, Link score calculation

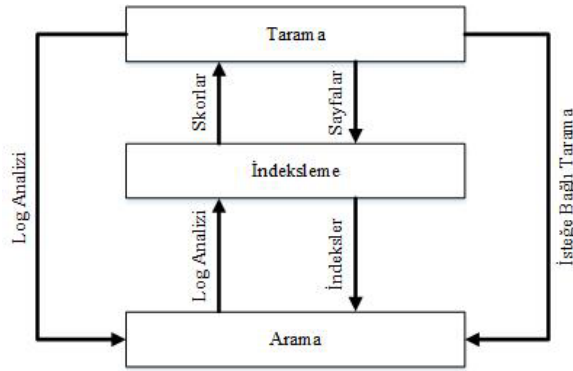
I. GİRİŞ

Günümüzde interneti kullanarak Web üzerindeki verilere erişmek hayatımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Şuanda mevcut dünya nüfusu 7.9 milyar olup 5.2 milyar (%66.2) internet kullanıcısı mevcuttur [1]. Bu sayı 2012'de 2.4 milyar [2] iken 2022'de 5.2 milyara yükselmiş, yani yaklaşık %116 artmıştır.

İnternet kullanıcı sayısının artması Web' deki veri miktarının artması anlamına gelmektedir. Web her geçen gün hızla büyüyen ve her türden verilerin bulunduğu devasa bir veri deposudur. Bu veri deposu içinde istenilen verilere doğru bir şekilde ve zamanında ulaşmak, günümüz koşullarında hayati öneme sahip olup her geçen gün zorlaşmaktadır [3]. Bu zorlukları aşabilmek, Web' deki verileri aramak ve istenilen veriye ulaşmak için arama motorları kullanılmaktadır. Arama motorlarını kullanmadan web üzerindeki bilgileri elde etmek için, milyarlarca web sayfasını tek tek ziyaret etmek gerekir. Bu durumda veriye ulaşmak neredeyse imkânsız hale gelmektedir.

Birçok tarayıcı türü olmasına rağmen temelde genel ve odaklı olmak üzere iki ana tarayıcı türü vardır. Odaklı tarayıcılar belirli bir konu ya da alan ile ilgili sayfaları tarama eğilimindedirler. Önceden belirlenmiş bazı verileri kullanarak erişim sayısını sınırlarlar [4]. Genel tarayıcılarda ise böyle bir sınırlama yoktur. Arasu ve arkadaşları [5], yaptıkları çalışmada, odaklı taramanın değişen ön bilgilere göre kullanıcılar arasında değişiklik gösterdiğini vurgulanmış ve gerçek hayatta genel tarayıcıların kullanımının daha önemli olduğunu özellikle belirtmişlerdir.

Arama motorları temel olarak 3 bölümden oluşurlar. Bu bölümler sırası ile web sayfalarını tarama, verileri indeksleme ve bu veriler içerisinde aramadır[6]. Web sayfalarını tarama işlemi web tarayıcıları (örümcek, tarama botları vb.) gerçekleştirir. Web tarayıcıları tarama işlemine tohum (başlangıç) URL'ler ile başlar. Ziyaret edilen web sayfası içindeki veriler alınıp indekslenir ve sayfa içindeki diğer URL'ler çıkarılarak öncelikli kuyruğa eklenir. Sırası gelen URL taranır ve veriler indekslenir. Taranan URL'ler belirli politikalara göre tekrar taranarak güncellik sağlanır. Şekil 1' de döngüsel yapı kullanarak veri tabanını güncel tutan bir tarayıcı mimarisi gösterilmiştir [6].



Şekil 1. Tarayıcı Mimarisi

Web' in tamamının taranması devasa hacmi nedeniyle uzun bir süreçtir ve neredeyse imkânsızdır. Mevcut arama motorları (Google, Baidu, Yahoo vd.) tüm Web' in sadece yaklaşık olarak %5 ini tarayabilmektedir [7]. Bu nedenle arama motorlarının en büyük yetersizliklerinin başında kapsam genişliği gelmektedir. Kapsamı genişletmek için özellikle ticari arama motorları birçok algoritma ve özellik (çoğu gizli) kullanmaktadır. Kapsamı genişletmenin ilk adımı tohum URL seçimi ve ikinci adımı da iyi bir tarama algoritmasıdır.

II. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde yapılan çalışmaları tohum URL seçimi ile ilgili çalışmalar ve kapsam genişletme metotları ile ilgili çalışmalar olmak üzere iki gruba ayırıyoruz.

1.1 Tohum URL Seçimi

Bir web tarayıcısının en önemli sorunlarından biri en uygun sayfaları elde etmek için hangi URL'lerden başlaması gerektiğidir [8]. Bu başlangıç URL seti, tarayıcıların arama işlemlerini başlattığı giriş noktasıdır. Tohum URL'lerin kalitesi tarayıcının performansını ve kapsamını etkileyen en temel özelliklerden biridir. Web' in dinamik yapısı gereğince en iyi tohum URL'lerin de zaman ile değişim göstermeleri kaçınılmazdır.

Daneshpajouh ve arkadaşları [9], farklı topluluklardan tohum URL'leri tanımlayan ve çıkaran ilk tohum çıkarma algoritmasını önermişlerdir. Algoritma, tohum

URL'lerin farklı topluluklardan düğümler içermesini garanti etmek için seçilen tohum URL'ler arasındaki mesafeyi ölçmektedir. Kleinberg [10], web sayfalarını merkez ve otorite adını verdiği iki ana grupta toplayan HITS algoritmasını önermiştir. HIST algoritması yalnızca web sayfaları arasından köprüleri dikkate almaktadır. Bundan dolayı en iyi merkez web sayfalarının en iyi tohum URL olduğu söylenebilir. Zheng ve arkadaşları [11], tohum URL seçimi için rastgele, en yüksek PageRank değeri ve en çok alan dış bağlantıya sahip k sayfaya dayalı tohum seçim stratejilerini kullanan grafik tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için her biri en az 100 sayfa içeren ve en az bir harici bağlantıya sahip olan 2000 web sitesinden rastgele örnekler seçerek tohum URL setini oluşturmuşlardır.

Nwala ve arkadaşları [12], web arşivi koleksiyonları için sosyal medya gönderilerinden tohum URL elde etmişlerdir. Bu URL'lere 10 ana boyutta (popülerlik, coğrafik, konu uzmanı, güvenilirlik, itibar vs.) bir kalite puanı atamışlardır. Toplamda referans koleksiyonlarından 1552 ve Twitter Mikro koleksiyonlarından 4.209 tweet' den 2.027 tohum URL elde etmişlerdir.

Tohum URL seçiminde, uzman tarafından manuel seçim, yarı otomatik seçim ve otomatik seçim olmak üzere üç temel seçim metodu vardır. Tarayıcılar için tohum URL çıkarma genellikle manuel yapılır. Manuel seçimde [13-15] bir veya birkaç konu hakkında yapılan taramalarda konunun uzmanları tarafından tohum URL'ler seçilmekte, önceliklendirilmekte ve tarama kuyruğuna eklenmektedir. Yarı otomatik seçimde DMOZ ve curlie.org gibi açık kaynak dizinlerden, belirli özelliklere göre tohum URL'ler seçilmektedir. Chan ve Yamana [16], DMOZ üzerinde bulunan URL'leri belirli alan adları (.com, .net, cn, .tw, .jp, .kr) ve dillere göre (Çince, Japonca ve Korece) ayıklandıktan sonra tohum URL olarak almışlardır. Mencer ve Monge [17], InfoSpider adını verdikleri bir tarayıcı geliştirmişlerdir. InfoSpider, kullanıcı sorgularını genel bir arama motoruna göndermekte ve sonuç olarak dönen URL'leri tohum URL olarak kullanmaktadır. Son olarak otomatik seçimde Twitter gibi sosyal medyadaki kullanıcıların paylaştıkları URL'ler tohum URL olarak alınmaktadır. Priyatam ve arkadaşları [18], Twitter' da paylaşılan URL'lerin her biri köşe noktası olan bir grafik oluşturmuş ve benzer köşeleri birbirine bağlamışlardır. Önerilen tarayıcı taramaya köşe noktalarını oluşturan ve benzersiz olan URL'ler ile başlamıştır. Sanagavarapu ve arkadaşları [19], Wikipedia ve Twitter' ı kullanarak tohum URL'lerin otomatik olarak çıkarılması için puanlama (SeedRel) metriği ve URL'lerin alaka düzeyini belirlemek için çeşitlilik indeksi kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Buna ek olarak Sanagavarapu ve ark. [20], tohum ve alt URL'lerin tanımlanması ve puanlanması için yapay arı

kolonisi (Artificial Bee Colony - ABC) algoritmasını önermişlerdir. Önerilen algoritmayı güvenlik alanına uygulamış ve Wikipedia üzerinden 34.007 tohum URL' i çıkarmışlardır.

1.2 Kapsam Genişletme

Bir arama motorunun performans ölçütlerinden biri de taradığı ve indekslediği web sayfalarının miktarıdır. Arama motorunun, web tarayıcısı ve tarayıcının kullandığı tarama tekniklerine bağlı olarak kapsamı ve etkinliği artar [21]. Web' in grafik yapısı karmaşıktır ve içerik ile köprülere erişmek için verimli bir algoritma gerekir. Kapsam, öncelikle seçilen tohum URL' lere ve ardından taramanın genişleyebilmesi için URL' lerin öncelik durumuna göre sıralanmasına bağlıdır. Web tarayıcıları için web sayfalarının önemleri farklıdır ve hangi sayfaların önce taranması gerektiği ile ilgili çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir [22].

Page ve arkadaşları [23], Google arama motorunun temel algoritmalarından biri olan PageRank algoritmasını önermişlerdir. Hangi web sayfalarının öncelikli taranması gerektiğini belirlemek için farklı metrikler mışlardır. Bu metrikler genişlik öncelikli, geri bağlantı sayısı ve PageRank olup tarayıcıyı önemli sayfalara yönlendirme açısından bu üç metrik karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak PageRank' in diğerlerine göre önemli sayfaları daha erken taradığı görülmüştür. Prakash ve Kumar [24], çalışmalarında PageRank ve köpekbalığı aramasının (Shark-Search) geliştirilmiş bir versiyonu olan PageRank algoritmasını kullanan köpekbalığı algoritmasını önermişlerdir. Yapılan ön deneylerde orijinal sayfa sıralaması algoritmasına göre önemli gelişmelerin gösterildiği belirtilmiştir. Cao ve arkadaşları [25], çalışmalarında aynı ağda rastgele yürüyüşe izin veren RankCompede adını verdikleri yeni bir model önermişlerdir. Rastgele yürüyüş ile rekabet kavramlarını birleştirerek kümeleme ve sıralama işlemlerini aynı anda yerine getiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Geleneksel grafik kümeleme yaklaşımları ile karşılaştırılmış ve yöntemin ağ düğümlerini gruplamada daha hızlı ve sezgisel olduğu belirtilmiştir. Najork ve Wiener [26] önerdikleri yöntemde 328 milyon benzersiz sayfa içeren bir tarama sırasında, taranan sayfaların zaman içerisindeki ortalama sayfa kalitesini incelemişlerdir. Taramaya başladığında yüksek kalitedeki web sayfalarını seçme eğiliminde olan genişlikte ilk arama yöntemini seçmişlerdir. Sayfaların kalitesini ölçmek ve sıralamak için PageRank algoritmasını kullanmışlardır.

Nisreen ve Elsheh çalışmalarında [22], web sayfalarında benzerliği ve dinamikliği kullanarak web sayfalarına öncelik veren bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada dinamik ve statik URL' ler için ayrı iki öncelikli kuyruk kullanılmıştır. Dinamik sayfalar yüksek önceliğe sahip olduğundan dolayı öncelikli taranmaktadır. Elde edilen bulgulara göre web sayfalarının dinamikliğini kullanmanın, URL' lerin

taranma sırasının belirlenmesinde etkili bir yol olduğu belirtilmiştir.

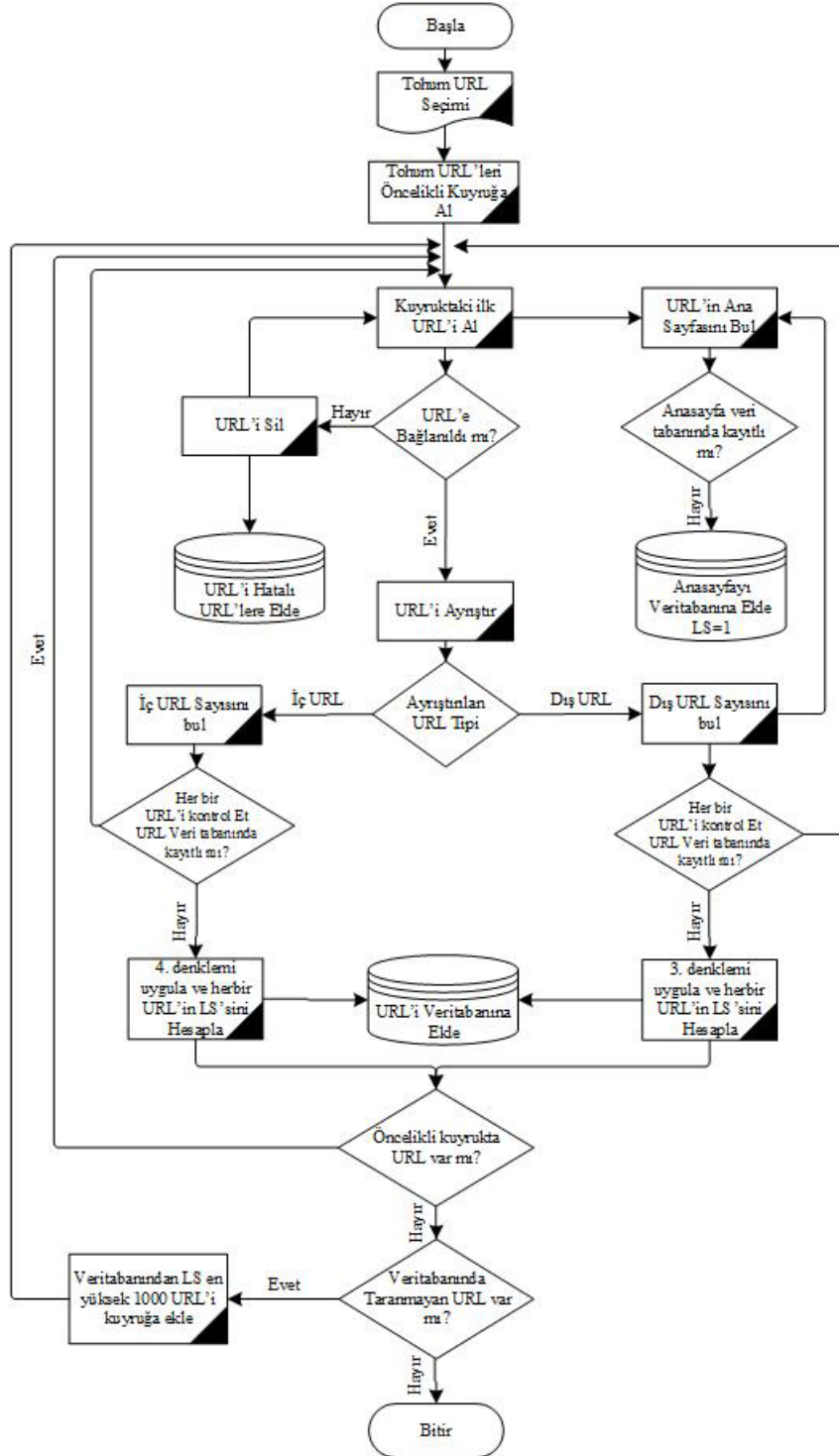
Gupta ve Singh [27] yaptıkları çalışmada kullanıcı tercihi tabanlı sayfa sıralaması adını verdikleri yeni bir sayfa sıralama algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritmanın sayfa içerik alaka düzeyini belirlemek için araçlar kullandığı ve sıralamada kullanıcı davranışlarının da dikkate alındığı vurgulanmıştır. Yine kullanıcı davranışı ile ilgili olarak Alhaidari ve arkadaşları [28], kullanıcı davranışı ve tercihin odaklanan sayfa sıralama algoritmaları, PageRank, Ağırlıklı PageRank ve köprü kaynaklı konu arama algoritmalarını tartışmışlardır. Bunlara ek olarak algoritmaların birleşiminden oluşan kullanıcı tercihi tabanlı ağırlıklı sayfa sıralama algoritmasını (User Preference Based Weighted Page Ranking Algorithm - UPWPR) önermişlerdir. UPWPR algoritması, web içerik madenciliği ve web kullanım madenciliğini kullanarak kullanıcı tercihlerine göre arama sonuçlarını sıralamaktadır.

Baker ve Akcayol [29], URL' leri alan içi ve alan dışı olarak sınıflandıran ve bir öncelik sırası kullanan tarayıcı algoritmasını sunmuşlardır. Önerilen algoritma alan dışı bağlantılar için 2/3 ve alan içi bağlantılar için 1/3 değerini vererek alan dışı bağlantılara öncelik vermektedir. Bunun sebebi kapsamı genişletmek ve aynı etki alanı içindeki bağlantı döngülerinden kaçınmaktır. Öncelikli kuyruğa eklenen URL' ler için bir zamanlama mekanizması kullanılmış ve belirli bir süre boyunca taranmayan URL' ler kuyruktan çıkartılmıştır.

III. ÖNERİLEN WEB TARAYICISI

Bu çalışmada önerdiğimiz web tarayıcısı genel bir tarayıcı olduğu için kapsamı tüm webdir. Genel tarayıcı sırası gelen URL' leri ayrıştırarak web üzerindeki tüm URL' lere ulaşmaya çalışır. Belirli dil ve bölgelere bağlı kalmamak için tüm dünya ülkelerinden en popüler ve en çok ziyaret edilen web sayfalarından tohum URL seti oluşturulmuştur. Önerilen algoritmaya göre tohum URL seti öncelikli kuyruğa alınarak her bir URL sırasıyla taranmıştır. Taranan URL' e herhangi bir sebepten dolayı ulaşılmadığında hata kodu, hata mesajı ve hatalı URL veri tabanında ilgili tabloya kaydedilerek URL' lere silinmiştir. URL' e bağlantı sağlandığında iki işlem gerçekleştirilir. (1) URL' in ana sayfası bulunarak ilgili tabloya kaydedilir ve link skoruna (LS) en yüksek değer olan 1 değeri verilir. (2) Sayfa içerisinde ayrıştırılan URL' ler alan içi (IntraDomain) ve alan dışı (InterDomain) olmak üzere iki gruba ayrılır ve sayıları bulunur. Daha sonra veri tabanından kontrol edilerek daha önce kaydedilmeyen URL' lerin denklem (3) ve (4) ' e göre link skoru hesaplanır. Bu işlemin sonunda URL' ler, link skorları ve tarama zaman damgası veri tabanına kaydedilir. Bu işlemler kuyruқта URL olduğu sürece tekrarlanır. Kuyruқтаki son URL tarandıktan sonra veri tabanındaki en yüksek link skoruna sahip bin URL öncelikli

kuyruğa alınarak keşfedilen tüm URL'ler bitene kadar bu işlemler tekrarlanır. Geliştirilen web tarayıcısının akış şeması Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Geliştirilen Web Tarayıcı Algoritmasının Akış Şeması

3.1. Tohum URL Seçim Metodu

Geliştirilen tarayıcıda tohum URL'ler Alexa [30] üzerinden alınmıştır. Alexa bir Amazon şirkettir ve içerik araştırması, rekabet analizi, anahtar kelime araştırması için başvuru kaynağı olarak kullanılmaktadır. Alexa web sitelerini; ziyaretçinin

günlük harcadığı saat, ziyaretçi başına günlük sayfa görüntüleme sayısı, aramadan gelen trafiğin yüzdesi ve toplam bağlı site sayısı temel olarak sıralamıştır. Bu çalışmada 102 farklı ülkenin her birinde sıralamaya giren 50 web sayfası alınmıştır. Sayfa üzerinden veri çekme işlemi için Python programlama dili

kütüphanesi olan BeautifulSoup kullanılmıştır. Alexa’ dan toplam 5079 web sitesi alınmış ve kayıt edilmiştir. Google, Youtube, Facebook vb. gibi web siteleri neredeyse tüm ülkelerde ilk sıralarda yer almakta ve veri tabanında tekrar etmektedir. Bu web sayfalarından benzersiz olan 2502 web sayfası tespit edilmiştir. Sadece 1 ülkede listeye giren 1920 web sayfası tohum URL olarak kullanılmıştır.

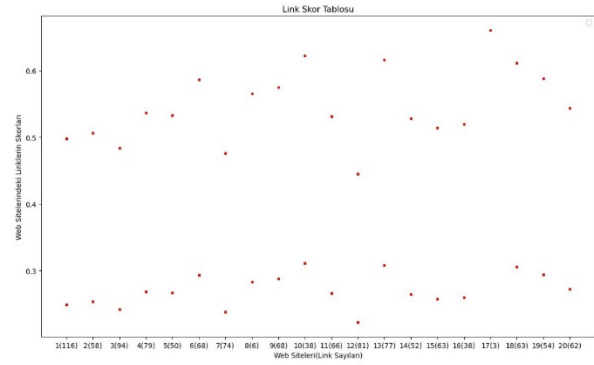
3.2. Geliştirilen Kapsam Genişletme Modülü

Tüm webin taranması olası olmadığından, temel amacımız hem lokasyon olarak hem de taranamış web sayfalarına öncelik vererek kapsamı genişletmektir. Kapsamı genişletmek için tohum URL seçimi ile birlikte tarama yöntemi hayati derecede önemlidir. Bir web sitesinin ana omurgasının ve zengin URL içeriğinin bulunduğu sayfa ana sayfa (domain adresleri) olduğu görülmüştür. Web sayfası içerisindeki URL ağaç yapısının en üstünde ana sayfa bulunmaktadır. Bunun için ana sayfaların öncelikli olarak taranması gerekmektedir. Bir URL kuyruktan alındığında ve URL’ e bağlantı sağlandığında sayfadaki her bir InterDomain için ayrıştırma işlemi gerçekleştirilerek URL’ in ana sayfasının veri tabanında olup olmadığı sorgulanır. Eğer ana sayfa veri tabanında kayıtlı değil ise öncelikli taranması için link skoruna (LS) en büyük değer olan 1 değeri verilir. Diğer URL’ ler için link skoru hesaplanacaktır. Baker ve Akcayol’ un [29] geliştirdikleri öncelikli kuyruk yapısında InterDomain linkin skoru (LS_{max}) ve IntraDomain linkin skorunun (LS_{min}) hesaplanması sırasıyla denklem (1) ve (2)’ deki gibidir.

$$LS_{max} = \frac{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) - \beta_{intra}}{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) * 0.66} \quad (1)$$

$$LS_{min} = \frac{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) - \beta_{intra}}{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) * 0.33} \quad (2)$$

Denklemlerde kullanılan α_{inter} InterDomain linklerin toplamını, α_{intra} IntraDomain linklerin toplamını ve β_{intra} InterDomain ve IntraDomain arasındaki minimum değeri gösteren değerdir. Bu hesaplama ile bir web sayfasındaki tüm IntraDomainler ile InterDomainler kendi içerisinde aynı değerleri alır. Bunun sonucunda öncelikli taramada artarda tarandıkları için iki temel sorun ile karşılaşmaktadır. İlk sorun nezaket politikasına aykırı olarak bant genişliği sık kullanmış olmasıdır. İkinci sorun ise LS aynı olduğundan kapsamın hızlı bir şekilde genişlememesidir. Tohum URL’ ler arasından InterDomain ve IntraDomain sayıları 20 ile 80 arasında olan rastgele seçilmiş 20 web sitesinin denklem (1) ve (2)’ ye göre dağılımı Şekil 3’ de gösterilmiştir.



Şekil 3. Baker ve Akcayol'a göre LS dağılımı

Bu sorunları çözmek için hesaplanan değeri sabit bir sayı ile çarpmak yerine her bir URL için rastgele bir sayı ile çarpmanın kapsamı ve dallanmayı artırdığını söyleyebiliriz. Bunun için geliştirilen denklemlerimiz sırasıyla denklem (3) ve (4) ‘deki gibidir

$$LS_{min} = \frac{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) - \beta_{intra}}{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) * rand(x_{min}, x_{max})} \quad (3)$$

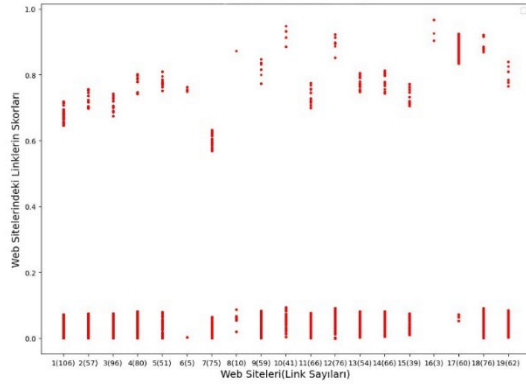
$$LS_{max} = \frac{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) - \beta_{intra}}{\sum(\alpha_{inter} + \alpha_{intra}) * rand(y_{min}, y_{max})} \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4)’ de görüldüğü üzere her bir URL için LS hesaplanırken, denklem sabit bir sayı yerine LS_{min} x_{min} , x_{max} aralığındaki rastgele bir sayı ile LS_{max} ’ da y_{min} ve y_{max} aralığındaki rastgele bir sayı ile çarpılmıştır. En uygun x_{min} , x_{max} ve y_{min} , y_{max} değerlerini tespit etmek için Tablo 1’ deki 5 farklı değer kullanılarak link skorları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

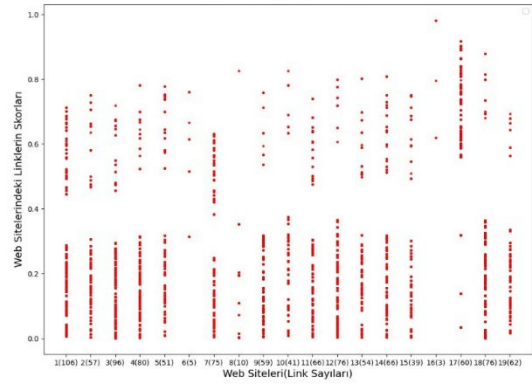
Tablo 1. Kullanılan x_{min} , x_{max} ve y_{min} , y_{max} değerleri

Aralık Setleri	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
1	0	0.1	0.9	1
2	0	0.2	0.8	1
3	0	0.3	0.7	1
4	0	0.4	0.6	1
5	0	0.5	0.5	1

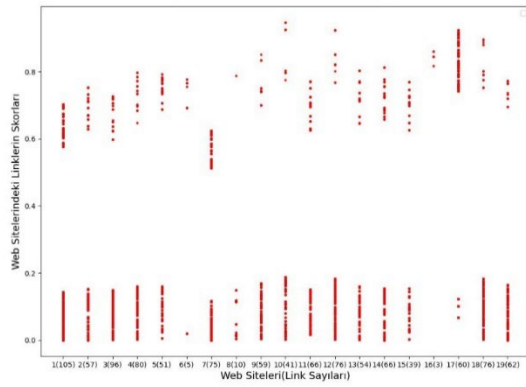
Şekil 3’ de kullanılan 20 web sitesi üzerinde Tablo 1’ deki 5 farklı değer aralık seti kullanılarak LS_{min} ve LS_{max} dağılımı test edilmiştir. Hesaplanan LS dağılımları Şekil 4,5,6,7 ve 8’ de gösterilmiştir.



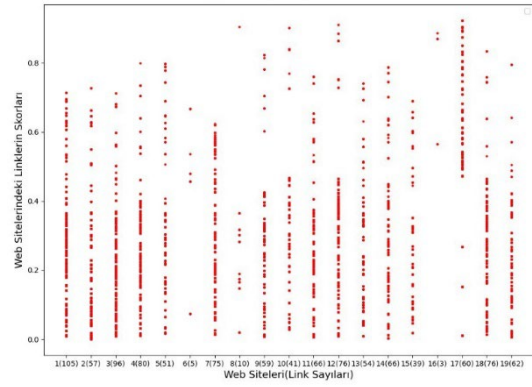
Şekil 4. 1 Numaralı Aralık Seti için LS Dağılımı



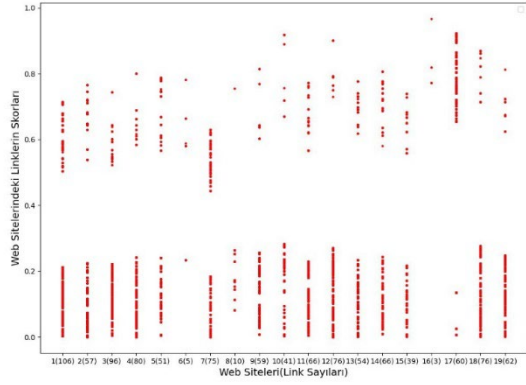
Şekil 7. 4 Numaralı Aralık Seti için LS Dağılımı



Şekil 5. 2 Numaralı Aralık Seti için LS Dağılımı

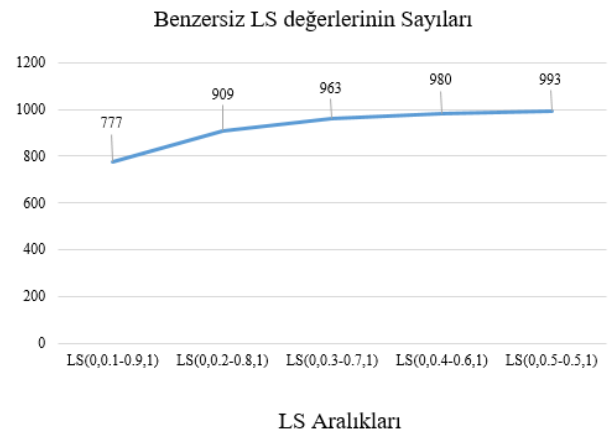


Şekil 8. 5 Numaralı Aralık Seti için LS Dağılımı



Şekil 6. 3 Numaralı Aralık Seti için LS Dağılımı

Şekil 4, 5, 6, 7 ve 8' de görüldüğü gibi LS değeri IntraDomainler ile InterDomainler hesaplandığında sadece 2 farklı değer değil, 0 ile 1 arasında dağılmış değerlerden oluşacaktır. Sistemin test edildiği 5 farklı aralık incelendiğinde aralık değeri arttırıldıkça link skorları da buna paralel olarak artmaktadır. 20 web sayfasından alınan 1082 farklı URL' in ayrı ayrı link skorları hesaplanmıştır. Alınan 5 farklı aralıkta URL' lerin link skorlarının benzersiz olanlarının sayısı Şekil 9' da gösterilmiştir.



Şekil 9. LS aralıklarına göre URL' lerin benzersiz LS

dağılımları.

Grafikte görüldüğü üzere LS hesaplanırken aralık değeri artırıldığında URL'lerin LS değerlerinin dağılımı homojen olmaktadır. LS_{min} hesaplanırken aralık 0 ile 0.5, LS_{max} hesaplanırken de aralığın 0.5 ile 1 arasında alınması en uygun sonucu vermektedir. LS'ye göre öncelikli kuyruk oluşturulduğunda aynı domainde tarama olasılığı azalırken farklı domain tarama olasılığı artmaktadır. Bunun sonucunda hem farklı sayfalarda işlem yapıp bant genişliğini ihlal etmeyecek hem de hızlı bir şekilde keşfedilmemiş yeni web sayfalarını keşfedecektir.

IV. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmada 3 farklı tohum URL seti kullanılmıştır. Bunlar ; (1) farklı ülkeler ile kesişimi olmayan tüm URL'ler, (2) her bir ülkede toplam bağlı site sayısı en fazla olan URL'ler ve (3) her bir ülkede InterDomain sayısı en fazla olan 5 URL. Burada (1) numaralı tohum URL seti oluşturulurken neredeyse bütün ülkelerde popüler olan web sitelerine (Google, Twitter, Instagram vs.) diğer çoğu URL'lerden köprü bulunduğu için, bu siteler tohum setine eklenmemiştir. Benzersiz olan 2502 URL'den tüm ülkelerde popüler olan sayfalar çıkartıldığında 1920 tohum URL (1) numaralı tohum URL setine eklenmiştir. (2) numaralı tohum seti oluşturulurken hem sayı fazla tutulmamış

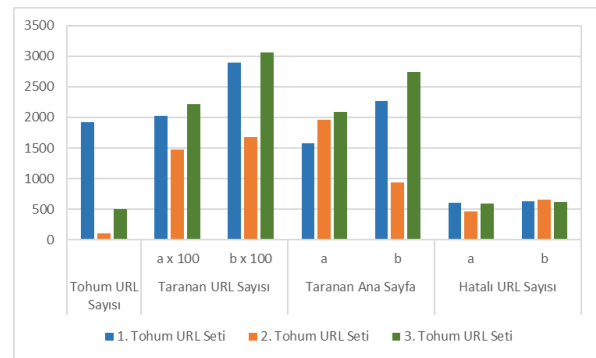
hem de her bir ülkede HITS [10] algoritmasına göre merkez sayılan web siteleri alınmıştır. Bu özelliklere sahip 102 farklı ülkeden 102 farklı URL alınarak (2) numaralı tohum URL seti oluşturulmuştur. Son olarak, (3) numaralı tohum URL setinde ise diğer web sayfalarına bağlantı URL'ini sayısına göre sıralama yapılmış ve her bir ülkede eşit sayı olacak şekilde en çok bağlantıya sahip olan 5 URL alınmıştır. Diğer web sitelerine bağlantı URL sayıları fazla olan URL'leri almadaki temel amaç kapsam genişliğini arttırmak ve mümkün olduğu kadar az tohum URL kullanarak elde edilebilecek en iyi kapsama ulaşmaktır. Bu nedenle 101 farklı ülkeden bu özelliklere sahip 5 URL alınarak 505 URL'e sahip (3) numaralı tohum URL seti oluşturulmuştur.

Tablo 2' de 3 farklı tohum URL setinde 3 saatlik zaman periyoduna göre yapılan taramalarda elde edilen sonuçlar listelenmiştir. Burada (a) [29]' da ki çalışmada Baker ve Akcayol' un önerdiği yöntem ile yapılan tarama sonuçlarını, (b) ise çalışmamızda önerdiğimiz yöntem ile yapılan tarama sonuçlarını göstermektedir. Deneyler Intel Xeon CPU E5-2650 2.00 GHz işlemci, 8 GB RAM ve Windows Server 2019 işletim sistemine sahip bilgisayar üzerinde yapılmıştır. Geliştirilen tarayıcı Python programlama dili ve kütüphaneleri kullanılarak MySQL veri tabanı üzerinde uygulanmıştır.

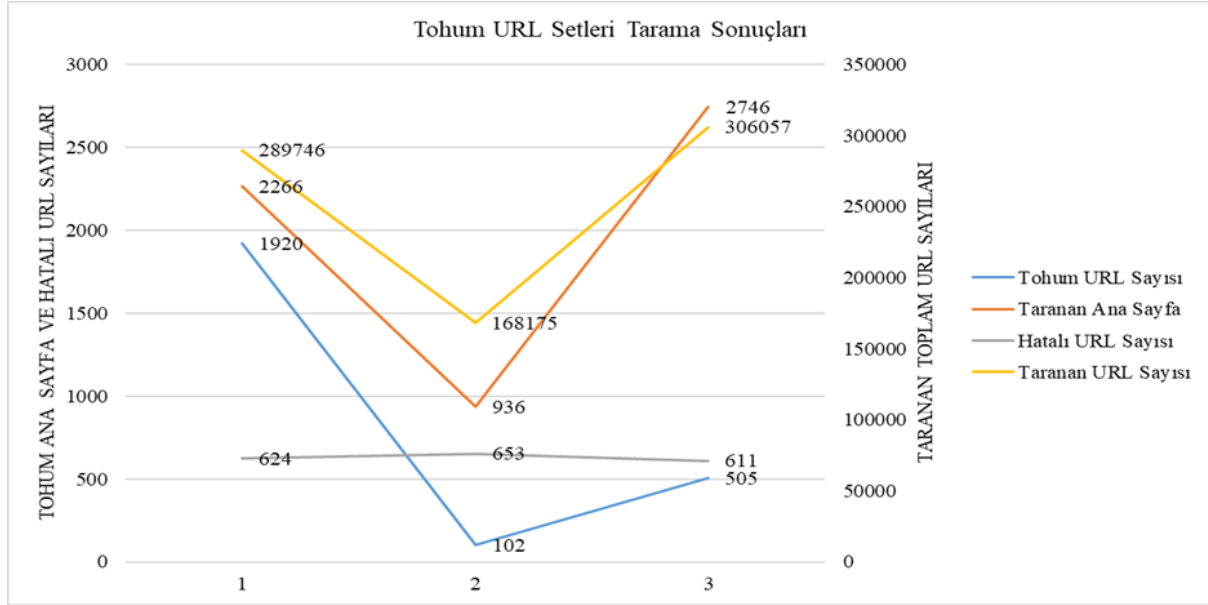
Tablo 2. 3 farklı tohum URL setinde 3 saatlik zaman periyoduna göre yapılan tarama sonuçları

Tohum URL Seti	Tohum URL Sayısı	Taranan URL Sayısı		Taranan Ana Sayfa		Hatalı URL Sayısı		Hatalı URL Oranı (%)	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1	1920	202588	289746	1579	2266	601	624	0,30	0,22
2	102	147380	168175	1956	936	452	653	0,31	0,39
3	505	221071	306057	2089	2746	589	611	0,27	0,20

Tablo 2' de görüldüğü gibi önerilen yöntemde, taranan URL sayıları ve taranan ana sayfa sayıları daha başarılı sonuç vermektedir. Hatalı URL oranı, hatalı URL sayısının taranan toplam URL sayısına oranını göstermektedir. Hatalı URL oranları incelendiğinde, çalışmamızda önerilen yöntem 1 ve 3 numaralı tohum URL setlerinde daha başarılı sonuç verirken 2 numaralı tohum URL setinde daha kötü sonuç vermiştir. Tablo 2' nin verilerinin görselleştirilmiş hali Şekil 10' da gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile yapılan taramalar sonucunda elde edilen sayısal verilerden tohum URL sayıları, taranan ana sayfa sayıları ile hatalı URL sayıları sol eksen ve taranan URL sayıları sağ eksende olmak üzere Şekil 11' de gösterilmiştir.



Şekil 10. 3 farklı tohum URL setinde 3 saatlik zaman periyoduna göre yapılan tarama sonuçları



Şekil 11. 3 farklı tohum URL setinde 3 saatlik zaman periyoduna göre yapılan tarama sonuçları

Tarama sonucundan da görüldüğü gibi tohum URL sayısının taranan URL, ana sayfa ve hatalı URL sayısı üzerinde etkisi yoktur. Performansı etkileyen en önemli gösterge kullanılan tohum URL setinin kalitesidir. Tarama sonuçlarına göre en çok tohum URL kullanan (1) ve en az tohum URL kullanan (2) numaralı tohum URL setlerine göre (3) numaralı tohum URL setinin tüm sonuçlarda daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Özellikle (3) numaralı tohum URL seti ile tarama başlatıldığında diğer setlere göre hem hatalı sayfa sayısı ve oranı daha düşük, hem de taranan ana sayfa ve toplam URL sayıları daha fazla çıkmıştır.

Şekil 11' de görüldüğü gibi en kötü performansı (2) numaralı tohum URL setinin gösterdiği görülmektedir. Bunun nedenlerinden biri tohum URL setinin az sayıda URL den oluşmasıdır. Bir diğer nedeni ise toplam bağlı site sayısının fazla olması, o sitenin [10]' da tanımlanan otorite web sayfaları kategorisinde olup bilgilendirici bir içeriğe sahip olduğunu ve

InterDomain sayısının az olmasından dolayı kapsamın hızlı bir şekilde genişlememesine sebep olduğunu göstermektedir. Birbirine yakın performans gösteren (1) ve (3) numaralı tohum URL setlerinin incelendiğinde (1) numaralı setin tohum URL sayısının (3) numaralı setten yaklaşık 4 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Buna rağmen (1) numaralı setin (3) numaralı setten daha kötü performans gösterdiği görülmektedir. Bunun temel sebebinin (1) numaralı setin içerisindeki URL'lerin hem merkez hem otorite sayfalarından oluşmasından, (3) numaralı setin ise ağırlıklı olarak merkez sayfalardan oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir.

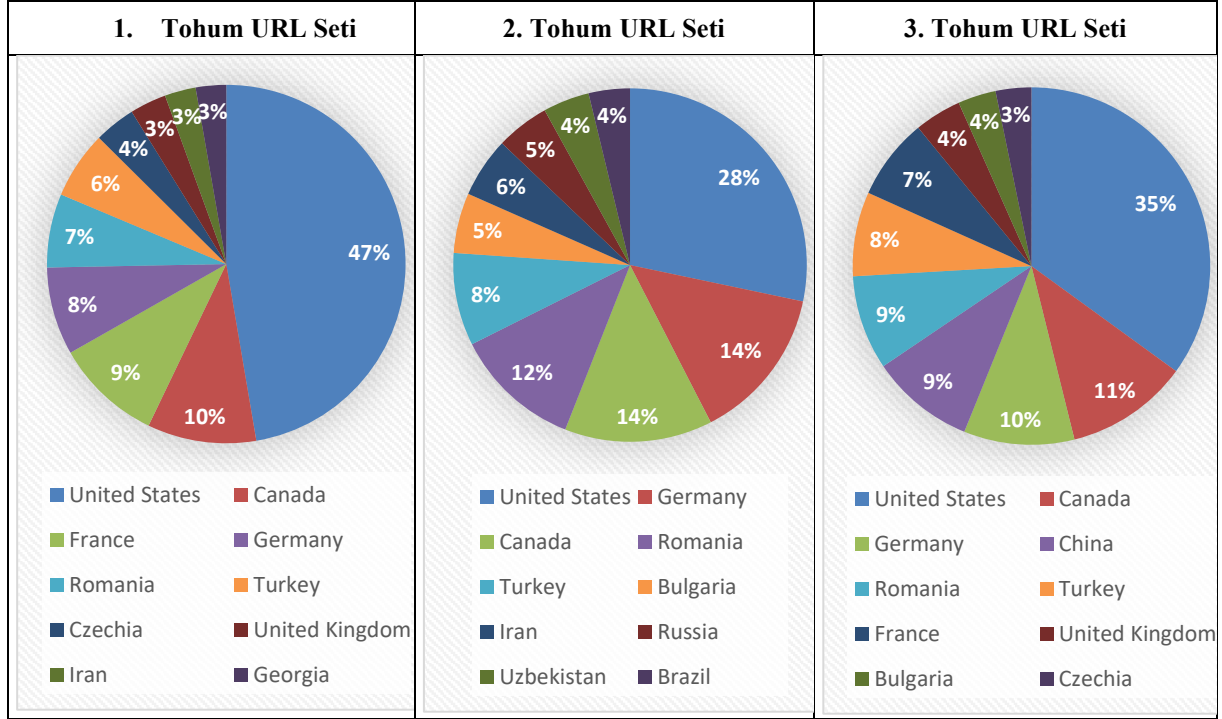
Kapsam genişliği bakımından bir diğer performans ölçütü taranan URL'lerin buldukları ülkeye göre dağılımlarıdır. Tablo 3' de 3 farklı tohum URL seti ile yapılan taramada elde edilen ana sayfaların sayısının ülkelere göre dağılımları gösterilmektedir.

Tablo 3. 3 farklı tohum URL seti ile yapılan taramada elde edilen ana sayfaların sayısının ülkelere göre dağılımları

1. Tohum URL Seti		2. Tohum URL Seti		3. Tohum URL Seti	
Web Sayfası Sayısı	Ülke	Web Sayfası Sayısı	Ülke	Web Sayfası Sayısı	Ülke
776	United States	180	United States	651	United States
161	Canada	90	Germany	207	Canada
158	France	86	Canada	186	Germany
130	Germany	74	Romania	175	China
109	Romania	54	Turkey	159	Romania
100	Turkey	35	Bulgaria	142	Turkey
61	Czechia	35	Iran	137	France
54	U. Kingdom	31	Russia	79	U. Kingdom
46	Iran	27	Uzbekistan	64	Bulgaria
45	Georgia	24	Brazil	60	Czechia
626	Diğer	300	Diğer	886	Diğer

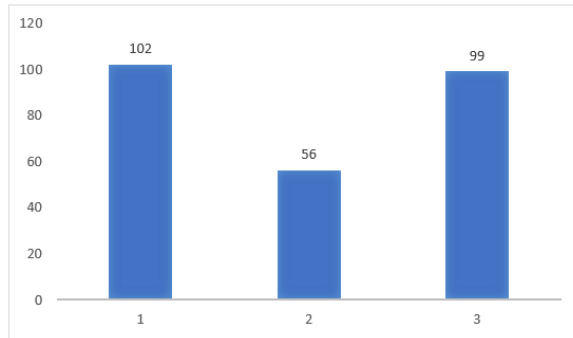
Taranan ana sayfaların ülkelere göre dağılımları incelendiğinde 2 ve 3 numaralı tohum URL setlerinin 1 numaralı tohum URL setine göre daha homojen dağıldığı görülmüştür. Toplam taranan URL sayısı göz önünde bulundurulduğunda 3 numaralı tohum URL

setinin 2 numaralı tohum URL setine göre yüzdesel olarak daha başarılı sonuç verdiği tespit edilmiştir. Şekil 12’ de bu dağılımların yüzdesel olarak grafiği gösterilmiştir.



Şekil 12. Taranan Ana Sayfaların Sayısının İlk 10 Ülkeye Göre Dağılımları

Şekil 13’ de 3 tohum URL seti ile yapılan taramalar sonucunda ulaşılan ülke sayıları gösterilmiştir.



Şekil 11. 3 Tohum URL Seti ile Yapılan Taramalar Sonucunda Ulaşılan Ülke Sayıları

Şekil 13’de özellikle 2 numaralı tohum URL setinin tarama sonucunda daha az ülkeye ulaşma sebebi her ülkeden en çok ziyaret edilen sadece bir URL alınması ve alınan bu URL ‘in de başka bir ülkeye ait anabilgisayarlarda barındırıldığından kaynaklandığı görülmüştür. 1 ve 3 numaralı tohum URL setleri ile yapılan taramada ise yaklaşık olarak ülkelerin tamamı taranmaktadır. Bölgesel olarak taramanın dağılımı, kapsamı ve performansı olumlu etkilediği söylenebilir.

Tablo 2’de görüldüğü gibi her ülkede IntraDomain sayısı en fazla olan 5 web sitesi (toplan 505) tohum URL olarak alındığında hem keşfedilen URL sayısı ve ana sayfa sayısı en fazla hem de oransal olarak hatalı sayfa sayısı daha azdır. 3 tohum URL setinin taranması sonucunda taranan hatalı sayfa sayıları birbirine çok yakındır. Tablo 4’ de bu hatalar ve hataların tespit edildiği URL sayıları gösterilmiştir.

Tablo 4. 3 tohum URL seti ile yapılan taramada elde edilen hatalar ve sayıları

Hata Kodu	Hata	Hatalı URL Sayısı		
		1	2	3
403	İstemci Hatası: Yasaklanmış URL	177	211	188
11001	Bilinmeyen isim ya da servis	84	74	44
10060	Bağlantı zaman aşımı	73	77	101
	SSL: Başarısız Sertifika Doğrulama	53	66	47
	30 Saniyelik zaman aşımı	41	34	26

406	İstemci Hatası: Kabul Edilmeyen URL	34	27	26
	Maksimum yeniden deneme	33	6	19
10054	Bağlantı sıfırlama hatası	24	16	26
404	İstemci Hatası: URL bulunamadı	19	22	11
503	Sunucu Hatası: URL için sunucu bulunamadı	17	34	28
500	Sunucu Hatası: URL için Dahili Sunucu Hatası	10	18	24
405	İstemci Hatası: İzin verilmeyen URL	4	12	21
	Diğerleri	42	56	63

Tablo 4 incelendiğinde, 403 hata kodlu yasaklanmış bağlantı sorununun en çok karşılaşılan hata olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeninin Tablo 5' de görüldüğü gibi sunucu bilgisayarın kullandığı internet bağlantısının üniversite içinde kurumsal bir bağlantı olması söylenebilir. İkinci en yüksek sayıda

karşılaşılan hatanın sebebi de web sitelerinin otomatik tarama yapan tarayıcıları engellemesi ve bu engelin tarayıcı tarafından aşılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer hataların oranlarının ise taranan toplam URL sayısına göre oransal olarak makul seviyede olduğu görülmüştür.

Tablo 5. 3 numaralı tohum URL seti ile üniversite içi ve dışında yapılan taramada elde edilen hatalar ve sayıları

Hata Kodu	Hata	Hatalı URL Sayısı	
		Üniversite Dışı	Üniversite İçi
403	İstemci Hatası: Yasaklanmış URL	151	188
11001	Bilinmeyen isim ya da servis	28	44
10060	Bağlantı zaman aşımı	29	101
	SSL: Başarısız Sertifika Doğrulama	33	47
	30 Saniyelik zaman aşımı	23	26
406	İstemci Hatası: Kabul Edilmeyen URL	7	26
	Maksimum yeniden deneme	7	19
10054	Bağlantı sıfırlama hatası	8	26
404	İstemci Hatası: URL bulunamadı	4	11
503	Sunucu Hatası: URL için sunucu bulunamadı	10	28
500	Sunucu Hatası: URL için dâhili Sunucu Hatası	5	24
405	İstemci Hatası: İzin verilmeyen URL	4	21
	Diğerleri	40	63

Tarama işleminin yapıldığı sunucu bilgisayar üniversite içerisinde barındırılmakta ve bazı web sitelerine (illegal, bahis vb.) giriş izni bulunmamaktadır. Bundan dolayı en başarılı sonucu veren (3) numaralı tohum URL seti üniversite dışında özel bir hat ile bağlantı sağlanarak tarama gerçekleştirilmiştir. Bağlantı özellikleri ve hızının farklılığından dolayı farklı sürelerde aynı sayıda URL elde edilene kadar tarama gerçekleştirilmiştir. Tablo 5' de de görüldüğü gibi tüm hataların üniversite dışında daha az olduğu görülmüştür.

VI. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada web sayfalarını taramak için tohum URL seçim metodu ve tarama algoritması tanıtılmıştır. Tohum URL' ler, 102 farklı ülkede ziyaretçinin günlük harcadığı saat, ziyaretçi başına günlük sayfa görüntüleme sayısı, aramadan gelen trafiğin yüzdesi ve toplam bağlı site sayısı temel olarak sıralanmış toplam 5079 web site URL'lerinden seçilmiştir. Bu URL' ler içerisinde bazı özelliklere göre seçilmiş ve sırası ile 1920, 102, 505 URL' den oluşan 3 tohum URL seti kullanılarak sistem performansı test edilmiştir.

Önerilen algoritma kapsamı hızlı bir şekilde genişletmek için alan içi, alanlar arası ve ilk rastlanan ana sayfalara link skoru belirleyerek önceliklendirmektedir. Ana sayfaların önem derecesi en yüksek olduğu için link skorlarına 1 değeri atanmaktadır. Bunun dışında link skoru hesaplanmasında farklı değer aralıkları ile testler yapılmıştır. En uygun değer aralığının alan içi URL' lerde (LSmin) 0 - 0.5 ve alanlar arası URL' lerde (LSmax) 0.5 - 1 aralığında olduğu görülmüştür. Algoritmanın 3 farklı tohum URL seti kullanılarak 3 saatlik taramalar sonucunda elde ettiği taranan URL sayısı, taranan ana sayfa sayısı ve hatalı URL sayıları incelenmiştir. Önerilen algoritma, daha önce Baker ve Akcayol tarafından yapılan çalışmada kullanılan algoritma ile karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritma hem yeni sayfaları ve bu sayfalardaki URL' leri elde edip link skorları atayarak öncelikli kuyruğa eklemekte, hem de alan içi döngülerden etkili bir şekilde kaçınmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalara göre önerilen algoritma kapsamı genişletme, yinelenen URL' ler ve alan içi döngülerden kaçınma konusunda daha iyi bir performans göstermektedir.

Ayrıca kapsamın dünya genelindeki bölgesel dağılımları incelenmiş ve taramalar sonucunda elde edilen ana sayfaların ülkelere göre dağılımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen URL'lerin ülkelere göre dağılımları incelendiğinde, genellikle gelişmiş ülkelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Bunlara ek olarak 3 tohum URL seti için, taramalar sırasında meydana gelen hatalar, hata sayıları ve hata içerikleri incelenmiş ve analiz edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] "Internet Users Distribution in the World." <https://www.internetworldstats.com/stats.htm> (accessed 30/03/2022).
- [2] M. Abu Kausar, V. Dhaka, and S. Singh, "Web Crawler: A Review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 63, pp. 31-36, 02/01 2013, doi: 10.5120/10440-5125.
- [3] S. M. Pavalam, S. V. K. Raja, F. K. Akorli, and M. Jawahar, "A survey of web crawler algorithms," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 6, p. 309, 2011.
- [4] F. Menczer, G. Pant, P. Srinivasan, and M. E. Ruiz, "Evaluating topic-driven Web crawlers," in *Proceedings of the 24th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, 2001, pp. 241-249.
- [5] A. Arasu, J. Cho, H. Garcia-Molina, A. Paepcke, and S. Raghavan, "Searching the web," *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, vol. 1, no. 1, pp. 2-43, 2001.
- [6] C. Castillo, "Effective web crawling," *SIGIR Forum*, vol. 39, no. 1, pp. 55-56, 2005, doi: 10.1145/1067268.1067287.
- [7] X. Zhang and K. P. Chow, "A Framework for Dark Web Threat Intelligence Analysis," *International Journal of Digital Crime and Forensics (IJDCF)*, vol. 10, no. 4, pp. 108-117, 2018, doi: 10.4018/IJDCF.2018100108.
- [8] M. R. Henzinger, "Algorithmic challenges in web search engines," *Internet Mathematics*, vol. 1, no. 1, pp. 115-123, 2004.
- [9] S. Daneshpajouh, M. M. Nasiri, and M. Ghodsi, "A Fast Community Based Algorithm for Generating Web Crawler Seeds Set," in *WEBIST (2)*, 2008, pp. 98-105.
- [10] J. M. Kleinberg, "Authoritative sources in a hyperlinked environment," 1998, vol. 98: Citeseer, pp. 668-677.
- [11] S. Zheng, P. Dmitriev, and C. L. Giles, "Graph-based seed selection for web-scale crawlers," presented at the Proceedings of the 18th ACM conference on Information and knowledge management, Hong Kong, China, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1645953.1646277>.
- [12] A. C. Nwala, M. C. Weigle, and M. L. Nelson, "Garbage, Glitter, or Gold: Assigning Multi-dimensional Quality Scores to Social Media Seeds for Web Archive Collections," ed. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org, 2021.
- [13] B. Ganguly and R. Sheikh, "A review of focused web crawling strategies," *International Journal of Advanced Computer Research*, vol. 2, no. 4, p. 261, 2012.
- [14] F. J. M. Shamrat, Z. Tasnim, A. S. Rahman, N. I. Nobel, and S. A. Hossain, "An effective implementation of web crawling technology to retrieve data from the world wide web (www)," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 01, pp. 1252-1256, 2020.
- [15] L. Jiang and H. Zhang, "Multi-agent based individual web spider system," in *2010 World Automation Congress*, 2010: IEEE, pp. 177-181.
- [16] S.-B. Chan and H. Yamana, "The method of improving the specific language focused crawler," in *CIPS-SIGHAN Joint Conference on Chinese Language Processing*, 2010.
- [17] F. Menczer and A. E. Monge, "Scalable web search by adaptive online agents: An infospiders case study," in *Intelligent Information Agents*: Springer, 1999, pp. 323-347.
- [18] P. N. Priyatam, A. Dubey, K. Perumal, S. Praneeth, D. Kakadia, and V. Varma, "Seed selection for domain-specific search," presented at the Proceedings of the 23rd International Conference on World Wide Web, Seoul, Korea, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2567948.2579216>.
- [19] L. Sanagavarapu, S. Sarangi, R. Reddy, and V. Varma, *Fine Grained Approach for Domain Specific Seed URL Extraction*. 2018.
- [20] L. M. Sanagavarapu, S. Sarangi, and Y. R. Reddy, "ABC Algorithm for URL Extraction," in *ICWE Workshops*, 2017.
- [21] S. Pavalam, S. K. Raja, F. K. Akorli, and M. Jawahar, "A survey of web crawler algorithms," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 6, p. 309, 2011.
- [22] N. Alderratia and M. Elsheh, "Using Web Pages Dynamicity to Prioritise Web Crawling," in *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Machine Learning and Machine Intelligence*, 2019, pp. 40-44.
- [23] J. Cho, H. Garcia-Molina, and L. Page, "Efficient crawling through URL ordering," *Computer networks and ISDN systems*, vol. 30, no. 1-7, pp. 161-172, 1998.
- [24] J. Prakash and R. Kumar, "Web Crawling through Shark-Search using PageRank," *Procedia Computer Science*, vol. 48, pp. 210-216, 2015/01/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.172>.
- [25] L. Cao *et al.*, "Rankcompete: Simultaneous ranking and clustering of information networks," *Neurocomputing*, vol. 95, pp. 98-104, 2012.
- [26] M. Najork and J. L. Wiener, "Breadth-first crawling yields high-quality pages," presented at the Proceedings of the 10th international

- conference on World Wide Web, Hong Kong, Hong Kong, 2001. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/371920.371965>.
- [27] D. Gupta and D. Singh, "User preference based page ranking algorithm," in *2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, 29-30 April 2016 2016, pp. 166-171, doi: 10.1109/CCAA.2016.7813711.
- [28] F. Alhaidari, S. Alwarthan, and A. Alamoudi, "User Preference Based Weighted Page Ranking Algorithm," in *2020 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, 19-21 March 2020 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCAIS48893.2020.9096823.
- [29] M. Baker and M. Akcayol, "Priority Queue Based Estimation of Importance of Web Pages for Web Crawlers," *International Journal of Computer Electrical Engineering*, vol. 9, pp. 330-342, 07/27 2017, doi: 10.17706/ijcee.2017.9.1.330-342.
- [30] Alexa. "The top 500 sites on the web." Amazon. <https://www.alexa.com/topsites/countries> (accessed 9:12:2021, 2021).

Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Şehirlerin Hava Kalitesi Tahmini

Air Quality Prediction of Cities with Machine Learning Techniques

Mehtap ÖKLÜ¹, Pelin CANBAY¹

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi (KSÜ), Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Öz

Hava Kalite İndeksi (HKİ), Avrupa standartları çerçevesinde yer alan beş temel kirlenici unsur (CO, SO₂, NO₂, O₃ ve PM₁₀) göz önünde bulundurularak değerlendirilen bir endekstir. Bu endeks ile şehirlerdeki kirlilik miktarları hakkında bilgi elde edilebilmekte ve şehirlerin daha temiz şehirlere dönüşmesi için çalışmalar yapılabilmektedir. Günümüzde bu ölçümlere gerekli önem verilmemekte, yeterli miktarda ve doğrulukta bu ölçümler yapılamamaktadır. Çalışmamızda, şehirlerin kirlilik oranına göre sınıflandırılabilmesi ve böylece kirlilik durumu kritik seviyede olan şehirlerin kısa sürede belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda City-Data platformundaki 6000 üzeri nüfusa sahip Amerika Birleşik Devletleri (ABD) şehirlerinin hava kalitesi belirleyicileri olarak değerlendirilebilecek, şehirlerin hava kalitesine etkisi olan farklı parametreleri toplanarak bir araya getirilmiş, HKİ verileri ile birlikte veri seti olarak kullanılmıştır. Şehrin nüfusu, betonarme yapı sayısı, yeşil alan ve kullanılan ulaşım araç oranlarının da belirleyici olarak kullanıldığı çalışmamızda hava kalitesi 3 ve 5 sınıflı sınıflandırma problemi olarak ayrı ayrı ele alınmıştır. Çalışmamızda, HKİ değerinin insan sağlığına etki oranları hesaplanarak sınıf atamaları yapılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak sunduğumuz çözümlerde hava kalitesi tahmini 3 sınıflı modellerde %87 oranında, 5 sınıflı modellerde ise %82 oranında başarılı sonuçlar üretmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava Kalitesi, Hava Kalite İndeksi (HKİ), Makine Öğrenmesi, Sınıflandırma

Abstract

The Air Quality Index (AQI) is evaluated by considering the five main pollutants (CO, SO₂, NO₂, O₃ and PM₁₀) within the framework of European standards. With this index, information about the amount of pollution in cities can be obtained and studies can be carried out to transform cities into cleaner cities. Today, these measurements are not given the necessary importance, and sufficient and accurate measurements cannot be made. Our study, it is aimed to classify the cities according to the pollution rate, and thus to determine the cities with critical pollution status in a short time. For this purpose, different parameters that can be considered as air quality determinants of the United States (USA) cities with a population of over 6000 from the City-Data platform, which have an impact on the air quality of the cities, were collected and used as a data set together with the AQI data. In our study, in which the population of the city, the number of reinforced concrete structures, the green area and the ratio of the transportation vehicles used are used as determinants, the air quality is handled as a classification problem separately with 3 and 5 classes. In our study, class assignments were made by calculating the effects of AQI value on human health. In the solutions we offer using machine learning methods, air quality prediction has produced 87% successful results in 3-class models and 82% in 5-class models.

Keywords: Air Quality, Air Quality Index (AQI), Machine Learning, Classification

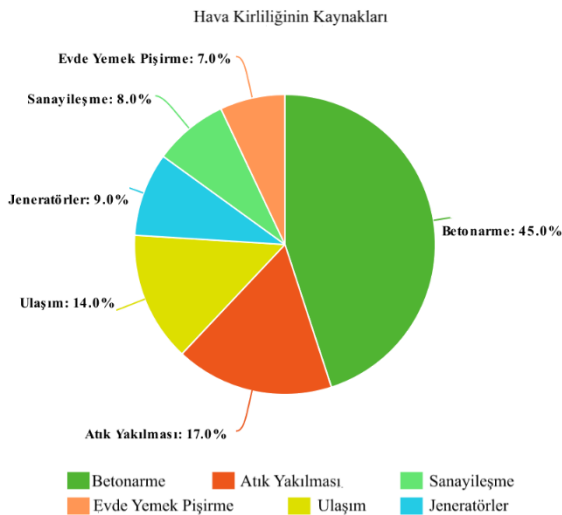
I. GİRİŞ

Hava kirliliği, canlıların sağlığını ve yaşam kalitesini büyük oranda tehdit eden bir unsurdur [1] ve birçok zararlı etkiye neden olduğu için sürekli olarak izlenmelidir. İzlemenin en etkili yolu kirliliğin kaynağını, kökenini iyi bilmektir. Hava kirliliğinin seviyesi ölçülürken havayı kirleten bazı hava kirlenici gazlar göz önünde bulundurulur. Başlıca hava kirlenicileri; PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, CO, SO₂'dir. Hava kalitesini etkileyen daha birçok verinin bulunduğu City-Data [2] platformu, HKİ değerini takip etmek için önemli kaynaklardan biridir. 18. yüzyılın sonlarından itibaren, sanayi devriminin de yaygınlaşmasıyla beraber yakıt ihtiyacı yüksek oranda artmıştır. Dönemin şartlarından dolayı en çok tercih edilen yakıt türü fosil yakıtlar olmuştur. Yüksek oranda fosil yakıtların (kömür, petrol ve doğal gaz) kullanımı sera gazlarının artmasına [3] ve dolayısıyla hava kirliliği, buzulların erimesi, kuraklık, aşırı hava olayları, ekosistemde tahribat, vektörel hastalıklarda artış ve bazı canlıların neslinin tükenmesi gibi daha birçok soruna yol açmıştır [4]. Sera gazları dünyayı çevreleyerek dünyadan dışarı gitmesi gereken kızılötesi radyasyonu tutup, bu radyasyonun dışarı çıkmasını engelleyerek, dünyanın gitgide daha fazla ısınmasına da yol açmaktadır [5]. Bu sorunlar gibi birçok unsur günümüze kadar artış göstermeye devam etmiştir. Bu durumun en büyük sebepleri ise; fosil yakıtların

kontROLSÜZ kullanımı, sanayileşmenin artması ve betonarme yapıların devamlı olarak artmasıdır [6]. Hava kirliliği sorunu küresel iklim sorununun temelidir. Küresel iklim sorunu 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren artarak ivmeli bir şekilde dünya gündeminde yer almaya başlamıştır [3]. Bu tehlikeyi önlemek için dünya çapında bir araya gelinip acil durum planları geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Aksi takdirde küresel iklim krizi daha tehlikeli bir hal almaya devam edecektir [5].

Yukarıda belirtilen etmenler her ne kadar insanların yaşam standardını yükselten etmenler olsa da çevreye ve insanlara çok büyük oranda zarar vermiştir, vermeye de devam etmektedir. Hava kirliliğindeki artış sonucunda insanlarda; karaciğer, böbrek ve beyinde uzun süreli hasar, akciğer kanseri ve doğum kusurları gibi yan etkiler yüksek oranda meydana gelmektedir [7]. Bu durum dünya, halk ve hükümetler için büyük bir problem olmaya devam etmektedir. Bu yüzden hava kirliliği daha da tehlikeli bir hal almadan etkisinin en aza indirilmesi acil bir ihtiyaçtır [8].

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre [9], hava kirliliği sebebiyle yılda yaklaşık 7 milyon prematüre ölümü gerçekleşmektedir. Bu oran geçmiş yıllara göre daha yüksek olup her geçen yıl daha da artmaktadır. Hava kirliliğinin azaltılması hayati önem taşımakla birlikte toplumun tüm kesiminin bu amaç doğrultusunda bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Hava kirliliğini en aza indirmek için öncelikle hava kalitesinin belirlenebilmesi gerekir. Şekil 1'de hava kalitesini en çok olumsuz etkileyen kaynakların dağılımı [9], [10] sunulmuştur.



Şekil 1. Hava kalitesini etkileyen faktörler

Özellikle büyük şehirlerdeki betonarme yapıların, sanayileşmenin, taşıt kullanımının ve atık yakılmasının sürekli artışı bu şehirlerin kontrol edilemez bir kirlilik artışına ortam sağladığı anlamına

gelmektedir. Bu sürece müdahale edebilmek ve mevcut durum genelinde farkındalık oluşturabilmek adına bu çalışmada, şehirlerin hava kalitesinin tespit edilebileceği uygun belirleyicilerin seçimi ve bu belirleyicilerin yapay zekâ modelleri ile kullanımı önerilmiştir. Çalışmamızda, hava kalitesinin hangi öz nitelikler ile belirlenebileceği ve hangi makine öğrenmesi yönteminin belirleyiciler üzerinde daha başarılı sonuçlar verdiği deneysel uygulamalar ile belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında bir şehrin hava kalitesi belirleyicileri olarak; şehrin nüfusu, mil başına düşen insan sayısı, mil başına düşen betonarme yapı (ev) sayısı, evlerin kullanım oranı, şehir yüz ölçümünde yer alan verimli (yeşil) toprak alanı, insanların işe giderken tercih ettiği ulaşım şekli (yürümek, bisiklete binmek, özel araç kullanmak, toplu taşıma kullanmak) ve bahsi geçen kirletici unsurların (CO, SO₂, NO₂, O₃ ve PM₁₀) ölçüm değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmamızda veri kümesi olarak nüfusu 6000 üzeri olan bazı ABD şehirlerinin HKİ değerleri ve bu şehirlerin hava kalitesini etkileyebilecek, yukarıda bahsedilen diğer bazı toplumsal verileri seçilerek kullanılmıştır. Veri kümesinde bulunan HKİ değerinin sürekli veri olması sebebiyle öncelikle bu değerlerin kategorileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Veri kümesindeki değerlerin dağılımı ve insan sağlığına etkisi göz önüne alınarak gerçekleştirilen kategorileştirme işlemi ile veriler 3 sınıflı (iyi, sağlıksız ve tehlikeli) ve 5 sınıflı (iyi, orta, sağlıksız, çok sağlıksız ve tehlikeli) olmak üzere 2 farklı yapıda ele alınmıştır.

Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak veri kümelerine sınıflandırma uygulanmıştır. K-En Yakın Komşuluk, Destek Vektör Makineleri, Lojistik Regresyon, Naive Bayes, Karar Ağaçları, Torbalama, Rastgele Orman ve Yapay Sinir Ağları algoritmaları sınıflandırıcı modeller oluşturmak için kullanılmıştır.

Çalışmanın bir sonraki alt bölümünde küresel iklim krizi ve hava kirliliği üzerine yapılan önemli çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir. İkinci bölümde çalışmada kullanılan materyal ve metodların tanımı ve açıklamasına yer verilmiş, üçüncü bölümde ise deneysel uygulamalardan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmanın sonucu, tartışma ve ileriki çalışmalar ele alınmıştır.

1.1. İlgili Çalışmalar

Küresel iklim krizi ve beraberinde karşılaşılan sorunların çözülmesine yönelik birçok bilimsel çalışma yürütülmüştür. Yürütülen çalışmaların büyük bir kısmı hava kirliliği ile alakalıdır. Çalışmamız kapsamında ele aldığımız, hava kirliliği kaynaklı

küresel iklim krizinin etkilerinin azaltılmasını hedefleyen, ön plana çıkmış bazı çalışmaların içeriği ve çıktıları aşağıda özetlenmiştir.

Janarathanan, R ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [11], Hindistan'ın Chennai şehrinde devreye alınan Ulusal Hava İzleme Programı kapsamında 240 şehirde bulunan 342 ölçüm noktası ile gerekli veriler toplanmış, toplanan veriler Destek Vektör Makineleri ve LSTM (Uzun-Kısa Süreli Bellek) modelleri ile eğitilmiştir. Çalışmada elde edilen değerler; güvenli, orta, hassas, sağlıklı, çok sağlıklı ve tehlikeli olarak derecelendirilmiştir. Yapılan çalışmadan çıkan sonuçlar neticesinde, şehrin olumsuz hava kalitesine sahip olması durumu; insanları toplu taşıma kullanmaya, ağaçlandırma çalışmaları yapmaya ve sanayi atık filtrelerini düzenli olarak değiştirmeye teşvik etmiştir.

Hindistan'daki bir diğer çalışma [8] ise Mahalingam, U. ve arkadaşları tarafından Delhi şehri baz alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılması istenen veriler Merkezi Kirlilik Kontrolü Kurulu, Çevre Bakanlığı, Orman ve İklim Değişikliği ve Hindistan Hükümeti tarafından sağlanmıştır. Veri setindeki öznitelikler kullanılarak optimize edilen Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Orta Gauss Destek Vektör Makineleri (Medium Gaussian Support Vector Machines) modelleri, diğer şehirler için de kullanılmaya hazır hale getirilmiş, modeller optimize edildikten sonra elde edilen en yüksek doğruluk oranları YSA için %91,62, Orta Gauss Destek Vektör Makineleri için %97,3 olarak elde edilmiştir.

Bir diğer Hindistan konumlu proje ise Bhalgat, P. ve arkadaşları tarafından geliştirilen, ortamdaki SO₂ konsantrasyonu, makine öğrenmesi algoritmaları ile tahmin edilmeye yönelik çalışmadır [12]. Çalışmada ayrıca zaman serisi algoritmaları ile yıllık ve aylık SO₂ değerleri de tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan AR (AutoRegressive) modelinin MSE (Ortalama Hata Karesi) değeri 166,358 olarak elde edilmiştir.

Pasupuleti, V. R. ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada [7], şehirlerin HKİ değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada Doğrusal Regresyon, Karar Ağacı ve Rastgele Orman gibi makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak hava kalite endeksi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Tahmin sonucunda en yüksek başarı değerini Rastgele Orman algoritması vermiştir. Nandigala Venkat Anurag, Y. ve arkadaşları ABD ve Moğolistan hükümeti tarafından başlatılan proje dâhilinde HKİ değerini tahmin etmeye yönelik bir çalışma [13] gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada XGBoost Regressor, Karar Ağacı ve Çoklu Lineer Regresyon algoritmaları kullanılmış en başarılı sonucu 15,97 RMSE (Ortalama Hata Karesi Karekökü) değeri

ile XGBoost algoritması vermiştir. Karar Ağacı 16,84, Çoklu Lineer Regresyon algoritması ise 18,72 RMSE değerini üretmiştir.

Tayvan'ın Zhongli, Changhua ve Fengshan bölgelerinden sırası ile 91672, 94453, 94145 adet veri temin edilen çalışmada [14] HKİ değeri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Temin edilen veriler ile 1, 8 ve 24 saat önceden akut hava kirliliği olaylarında HKİ değerini tahmin etmek için Rastgele Orman, Adaboost, Destek Vektör Makineleri (DVM) ve YSA modelleri eğitilmiştir. En yüksek R² doğruluk skorunu ve en düşük RMSE ve MAE (Mean Absolute Error) hata skorlarını Adaboost algoritması vermiştir. Çalışma sonucunda en düşük doğruluk oranlarını çıkartan algoritma ise DVM olmuştur.

Kamal, M. M. ve arkadaşlarının geliştirdiği projede [15], Malezya'nın bazı eyaletlerinde Kasım 2004'ten beri toplanan veriler, YSA modellerinin eğitiminde kullanılmıştır. Bu çalışmada 2~12 arasında gizli katman ve 1000~11000 arasında iterasyon tercih edilmiş olup Jalan Tasek şehrinin Aralık ayı verisinde yüzde 64,23~99,99 arası bir başarı elde edilirken Nilai şehrinin Aralık ayı verisinde yüzde 97,19~99,99 arası bir performans alınmıştır.

ABD özelinde yapılan hava kalitesi tahmini ve değerlendirmesi çalışmaları da çoğunlukla en kalabalık şehirlerden biri olan Chicago şehrinin verileri üzerinden yapılmıştır [16], [17].

Çalışmamız kapsamında yapmış olduğumuz literatür araştırması sonucunda, hava kalitesi tespitine yönelik standart bir veri kümesi ve çözüm yönteminin ele alınmadığı, genellikle çalışmalarda yerel veriler üzerinden farklı algoritmalar ile çözümler sunulduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmamızda, açık kaynak olarak elde edebileceğimiz en büyük hava kirliliği verisinin ve şehirlere özgü başka hava kirliliği belirleyici unsurlarının da erişilebilir olduğu veri tabanlarından faydalanılmış, başka şehirlerde de kullanılacak yapay zekâ modelleri üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmamızda kullanılan verinin özellikleri ve yöntemler takip eden bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Veri Seti

Çalışma kapsamında kullandığımız veri seti City Data [2] web sitesi üzerinden toplanmıştır. Belirtilen kaynak hükümet ve özel kaynaklardan çeşitli verileri toplayıp analiz ederek ABD'deki her şehir için ayrıntılı ve bilgilendirici profiller oluşturmaktadır.

Şehirlerin suç oranlarından hava durumu akışına, iç ve dış göç oranlarından ekonomi politikalarına kadar çok çeşitli bilgiler barındıran kaynaktan, şehirlerdeki hava kirliliğini etkileyebilecek bazı parametrelerin [16] her biri özellikle seçilerek çalışmamız kapsamında bir araya getirilmiştir. Toplanan veriler ABD'nin 6000 ve üzeri nüfusa sahip olan bazı şehirlerini kapsamaktadır. Belirtilen kaynaktaki veriler, hava kalitesi endeksini şehirlere göre değerlendirebilmek için iki farklı belirleyici kümesi ile ele alınmıştır; (1) hava kirliliğine neden olan gazların oranlarına göre ve (2) şehirdeki nüfusun yaşam tercihleri ve özelliklerine göre. Veri kümesinde bulunan şehirlerdeki hava kirliliğine neden olan gazların hava kalitesi endeksine karşın değerlerinin örnek gösterimi Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1'de bulunan, hava kirletici gazlar olarak değerlendirilen PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂, O₃, CO, SO₂ gazlarının karşılık geldiği HKİ değeri kullanılarak çalışmada ele alınacak veri setinin bir kısmı elde edilmiştir. Çalışmamızın özetinde de belirtildiği gibi bu değerlerin şehirler tarafından yeterli miktarda ve doğrulukta ele alınması zordur, bu zorluk veri kümemizdeki eksik değerlerden de görülebilmektedir. Çalışmamız kapsamında ele almak istediğimiz ikinci veri kümesi olan hava kalitesi belirleyici kümesi, şehirdeki nüfusun yaşam tercihleri ve bu tercihlerin özelliklerinin bir örnek gösterimi Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2'de örnek gösterimi bulunan, şehirlerdeki HKİ oranına karşın, nüfusun miktarı, nüfusun yoğunluğu, evleşme yoğunluğu, evleşme oranı, toprak alan, nüfusun ulaşım tercihleri çalışmamızda kullanılacak veri setinin bir parçası olarak ele alınmaktadır. Tablo 1 ve Tablo 2'de yer alan farklı öznitelikler (belirleyiciler) çalışmamızın veri seti olarak birlikte kullanılacağından tek bir tabloda birleştirilmiştir. Şekillerde görüleceği üzere her bir satır bir şehir değerlerini barındırmaktadır, dolayısı ile birleştirme işlemi her iki veri kümesindeki şehirlerin doğru eşleştirilmesi ile yapılmıştır. Sonuç olarak iki farklı veri kümesindeki şehir öznitelikleri tek tabloda şehir ve HKİ değerlerinin eşleşmeleri kontrol edilerek birleştirilmiştir. Elde edilen veri setinin öznitelikleri ve bu özniteliklerin açıklamaları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3'te yer alan özniteliklerden ilki şehir isim bilgisi olup hesaplamalarda kullanılmamıştır. Tabloda yer alan HKİ değeri ise, diğer öznitelikleri kullanarak doğru bir şekilde tahmin etmeyi amaçladığımız hedef özniteliğimizdir. Veri setinin makine öğrenmesi yöntemleri üzerinde uygulanabilmesi için bir takım ön işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bu aşamada yapılan ön işlemler ve gereklilikleri alt başlıklarda ele alınmıştır.

Tablo 1. Hava kirliliğine sebep olan gazların hava kalitesine karşı değerleri

City (Population)	Air Pollution - Carbon (CO) [ppm] level	Air Pollution - Lead (Pb) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] level	Air Pollution - Nitrogen Dioxide (NO ₂) [ppb] level	Air Pollution - Ozone [ppb] level	Air Pollution - Particulate Matter (PM _{2,5}) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] level	Air Pollution - Particulate Matter (PM ₁₀) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] level	Air Pollution - Sulfur Dioxide (SO ₂) [ppb] level	Air Pollution - Air Quality Index (AQI) level
Middle Island, NY (10483)	0,36	-	8,78	27,1	9,22	17	1,03	87,1
Ridge, NY (13336)	0,36	-	8,78	27,1	9,22	17	1,03	87,1
Prichard, AL (22399)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Fairhope, AL (17386)	0,32	0,01	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Tanner-Williams, AL (60211)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Spanish Fort, AL (7629)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Point Clear, AL (2125)	0,32	0,01	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Mobile, AL (194889)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Daphne, AL (23633)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Belle Fontaine, AL (608)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Chickasaw, AL (6010)	0,32	0	-	27,2	8,77	19,7	0,94	68,9
Loxley, AL (1703)	0,32	0,01	-	25,1	8,77	19,7	-	68,6
Mount Pleasant, NC (1740)	0,31	-	8,67	28,1	9,22	15,5	0,28	87,3
Enochville, NC (2925)	0,31	-	8,67	28,1	9,22	15,5	0,28	87,4
Township 6, Rimertown, NC (2747)	0,31	-	8,67	28,1	9,22	15,5	0,28	87,3
Concord, NC (83506)	0,31	-	8,67	28,1	9,22	16,7	0,28	89,8
Mooreville, NC (34887)	0,31	-	8,67	28,1	9,22	15,5	0,28	87,4

Tablo 2. Şehirdeki nüfusun yaşam tercihleri ve özelliklerinin hava kalitesine karşı değerleri

City	Population	Population Density (people per square mile)	Housing Density (houses/condos per square mile)	Houses Occupied (%)	Land Area (square miles)	Means of Transportation to work - Walked (%)	Means of Transportation to work - Bicycle (%)	Means of Transportation to work - Car Alone (%)	Means of Transportation to work - Bus (%)	Air pollution - Air Quality Index (AQI) level
Cornwall, NY (12646)	12646	471	181	95,3%	26,8	2,46%	0%	84,6%	0,75%	81
West Lake Stevens, WA (20049)	20049	2071	665	96,2%	9,68	0,8%	0,29%	80,4%	1,53%	81,3
Arlington, WA (18664)	18664	2467	600	95%	7,57	0,88%	0,22%	85,8%	1,02%	81,3
Fairview, GA (6769)	6769	902	380	93,3%	7,5	0,27%	0%	83,7%	0%	81,3
Boynton Ridge, GA (13326)	13326	425	144	94,4%	31,3	0,74%	0%	87%	0,25%	81,3
Amherst, OH (12112)	12112	1690	643	96,9%	7,17	0,41%	0,11%	84,8%	0,69%	81,3
Nolensville, TN (6213)	6213	655	107	100%	9,49	0,92%	0%	82,9%	0%	81,5
Smyrna, TN (43060)	43060	1886	438	96,1%	22,8	0,21%	0,24%	86,6%	0,03%	81,5
Brentwood, TN (40021)	40021	1155	229	98,2%	34,6	0,33%	0%	84,7%	0,09%	81,5
La Vergne, TN (34077)	34077	1374	282	93,9%	24,8	0,33%	0%	87,8%	0,24%	81,5
AlmaVille, TN (20899)	20899	282	74,3	96,5%	74	0,36%	0%	84%	0%	81,5

2.2. Ön İşleme

Kaynağından topladığımız ve uygun eşleştirmeler ile birleştirdiğimiz veri setinde, Tablo 1'de de görülebileceği üzere bazı eksik değerler bulunmaktadır. Bu eksik değerlerin özniteliklerine göre yönetilmesi aşağıdaki adımlar ile sağlanmıştır:

- Toplanan veri setinde AQI değeri eksik olan 494 örnek veri setinden çıkarılmıştır. Böylece ilk aşamada 6875 olan örnek sayısı 6381 olmuştur.
- Kullanılacak diğer özniteliklerdeki eksik değerler gözlemlenmiştir. Çalışmanın veri toplama aşamasında, eksik değer sayısı toplam örnek

sayısının yarısından fazla olan öznitelikler veri seti oluşturmada kullanılmamıştır.

- Çalışmada kullanılan veri setinde bulunan her öznitelikte eksik değer sayısı toplam örnek sayısının yarısından azdır. Bu aşamada veri setinde bulunan her öznitelik için eksik değerler söz konusu özniteliklerin mevcut olduğu örneklerdeki değerlerinin ortalaması ile doldurulmuştur. Bu öznitelikler hava kirliliği belirleyicilerinden olan gazların değerlerinin bulunduğu özniteliklerdir. Şehirdeki nüfusun yaşam tercihleri ve bu tercihlerin özelliklerinin değerlendirildiği ikinci veri kümesinde eksik veri bulunmamaktadır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan veri setinde bulunan öznitelikler ve açıklamaları

Öznitelik	Açıklama
City	Şehir adı
Population	Şehir nüfusu
Population Density	Şehirdeki mil kare başına düşen birey sayısı
Housing Density	Şehirdeki mil kare başına düşen ev/ apartman sayısı
Houses Occupied(%)	Şehirde bulunan evlerin kullanım oranı
Land Area(square miles)	Şehirde işlenmemiş, ellennemiş topraklar
Means of Transportation to Work	Şehirde işe giderken tercih edilen ulaşım aracı
Means of Transportation to Work	<i>Walked (%)</i> Yürüyerek işe gidenlerin oranı
Means of Transportation to Work	<i>Bicycle (%)</i> Bisiklet sürerek işe gidenlerin oranı
Means of Transportation to Work	<i>Car alone (%)</i> Özel araç kullanarak işe gidenlerin oranı
Means of Transportation to Work	<i>Bus (%)</i> Toplu taşıma kullanarak işe gidenlerin oranı
Air Pollution	Hava kirliliğine neden olan gazlar
Air Pollution	Carbon Monoxide(CO) [ppm]
Air Pollution	Lead(Pb) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Air Pollution	Nitrogen Dioxide(NO_2) [ppb]
Air Pollution	Ozone [ppb]
Air Pollution	Particulate Matter ($\text{PM}_{2.5}$) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Air Pollution	Particulate Matter (PM_{10}) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Air Pollution	Sulfur Dioxide (SO_2) [ppb]
Air Quality Index(AQI)	Hava kirliliğinin düzeyini belirten ölçü birimi (HKİ)

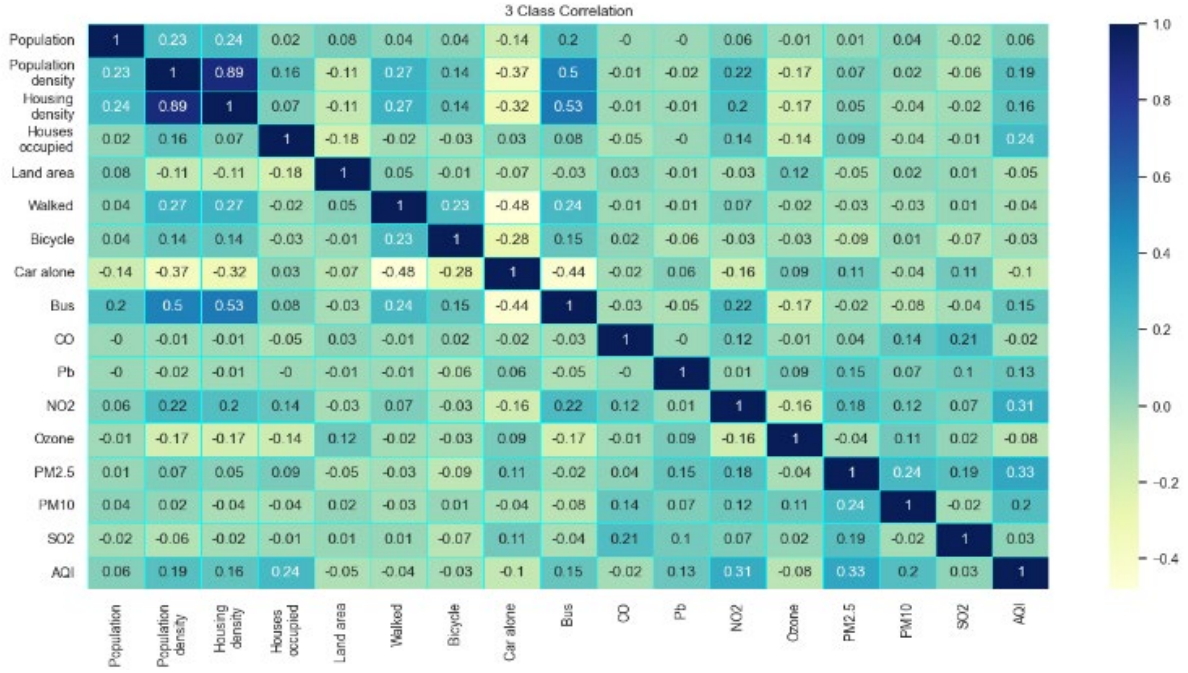
Veri setimizde bulunan özniteliklerin makine öğrenmesi yöntemleri ile kullanılabilir yapıya getirilmesinin ardından hedef özneliğin kategorileştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Kategorileştirme işlemi şehirlerin hava kalite sınıflarını bilme ve karşılaştırma yapabilmesi için önemlidir. Böylece daha temiz bir şehir olmak ve daha kalitesi yüksek sınıflara geçebilmek için ayırt edici bir unsur olarak kategoriler ele alınabilecektir. Hedef özneliğimiz olan AQI değeri sürekli veridir. Çalışmamızın amacı şehirlerin hava kalitesini sınıflandırmak ve hava kalitesi sınıflarını tahminlemek olduğundan, veri setindeki AQI değeri hem veri setindeki dağılımı hem de canlı sağlığına etkileri [19]-[21] göz önüne alınarak kategorileştirilmiştir. AQI değerlerini kategorilere ayırma işleminde 3 sınıflı ve 5 sınıflı olmak üzere iki farklı veri seti elde edilmiştir. Sınıflara ayırma işleminde kullanılan AQI aralığı, her aralığın sınıf etiketi ve her sınıfta bulunan örnek sayıları 3 sınıflı ve 5 sınıflı veri setleri için Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Veri setinin 3 sınıflı ve 5 sınıflı dağılım özellikleri

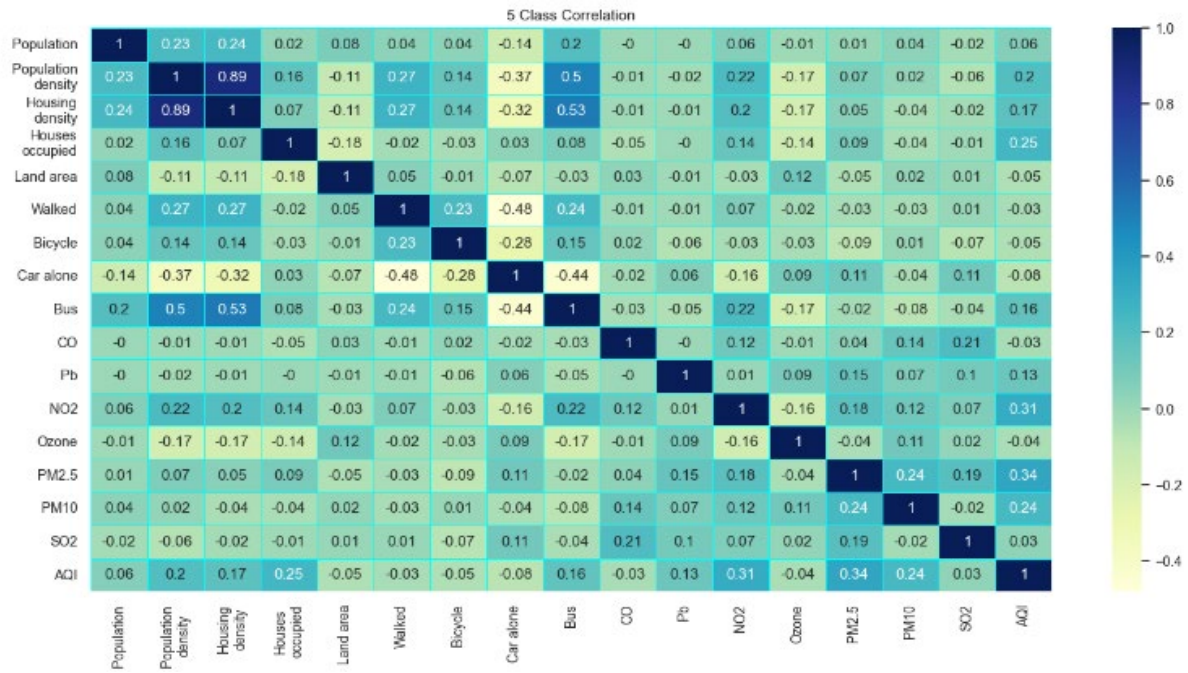
Sınıf Bilgisi	Aralık	Sınıf Etiketi	Örnek Sayısı
3 sınıflı dağılım	AQI < 82	İyi	2193
	83 < AQI < 103	Sağlıksız	2081
	104 < AQI	Tehlikeli	2107
5 sınıflı dağılım	AQI < 69	İyi	1232
	70 < AQI < 86	Orta	1226
	87 < AQI < 100	Sağlıksız	1378
	101 < AQI < 115	Çok Sağlıksız	1320
	116 < AQI	Tehlikeli	1225

Çalışmanın amacına uygun seçilen ve makine öğrenmesi yöntemleri ile veri kümesinin sınıflara ayrılma işleminde kullanılabilir en dengeli aralıklar Tablo 4'teki gibi tercih edilmiştir. Mevcut iki veri setinin sınıflandırma işlemine tabi tutulmadan önce kontrol edilmesi gereken bir diğer özelliği de kullanılan özniteliklerin birbirleri ile ne kadar ilişkili olduğudur. Veri setindeki öznitelikler hava kalitesi tahmininde etkili olabilecek öznitelikler olarak belirlendiğinden beklenti, bu özniteliklerin birbirleri arasında ve hedef değişken arasında belli bir korelasyonun olması gerektiği yönündedir. Bu durumun analiz edilebilmesi için veri setinde bulunan özniteliklerin korelasyon haritası çıkarılmış, Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.

Şekil 2 ve Şekil 3'te görüleceği üzere öznitelikler arası birtakım ilişkiler bulunmaktadır. Korelasyon haritasında her bir özneliğin, veri setindeki diğer özniteliklerle arasındaki lineer ilişki yer alır. Bu ilişki değeri 1'e ne kadar yakınsa, öznitelikler arası o kadar yüksek bir lineer ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Benzer şekilde korelasyon haritasındaki iki öznelik arasındaki ilişki değeri -1'e ne kadar yakınsa, o kadar lineer olmayan bir ilişkisi olduğu anlaşılmış olur. İki öznelik arasındaki ilişki değerinin 0 olması bu iki özneliğin birbirlerinin değişimlerinden etkilenmediğini göstermektedir. Söz konusu haritalarda çalışmamız kapsamında en önemli nokta; belirleyici öznitelikler ile hedef öznelik arasındaki ilişkinin varlığıdır. Hem 3 sınıflı veri seti için hem de 5 sınıflı veri seti için belirleyici öznitelikler ile hedef öznelik arasında belirli oranlarda korelasyon değeri mevcut olup, 0 değerinde öznelik ilişkisi bulunmamaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3'teki korelasyon tabloları incelendiği zaman AQI değerinin; havada bulunan gazlar ve nüfus yerleşimi ile alakalı parametreler ile yüksek korelasyona sahip olduğu, ulaşım sağlamak için kullanılan araçların oranı ile düşük korelasyona sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Veri seti öznitelikler arası korelasyon haritası (3 sınıflı)



Şekil 3. Veri seti öznitelikler arası korelasyon haritası (5 sınıflı)

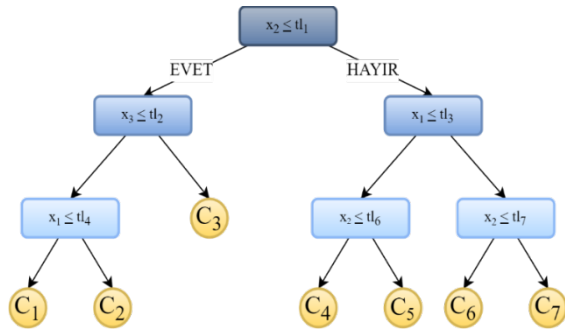
2.3. Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Çalışma kapsamında belirlenen 7 adet geleneksel makine öğrenmesi yöntemi, Python programlama dilinde kullanılan Scikit Learn kütüphanesindeki varsayılan standart parametreleri ile uygulanmıştır. Fakat Yapay Sinir Ağları (YSA) mimari bir tasarım gerektirdiğinden diğer modellerden ayrı olarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılacak YSA modelinin katmanlarını ve yoğunluklarını belirlemek için kaba kuvvet (brute force) yaklaşımı kullanılmıştır.

2.3.1. Karar Ağacı

Karar Ağaçları (Decision Trees), ağacın oluşturulmasında kullanılan veri setini yinelemeli olarak daha küçük alt bölümlere ayıran bir sınıflandırma prosedürü olarak tanımlanır. Ağaç; kök düğüm, dizi dâhili düğüm ve dizi uç düğümden (yaprak) oluşur [22]. Veri setinde bulunan öznitelikleri kullanarak mantıksal sıraya uygun dalları olan bir ağaç yapısı oluşturur. Ağaçtaki

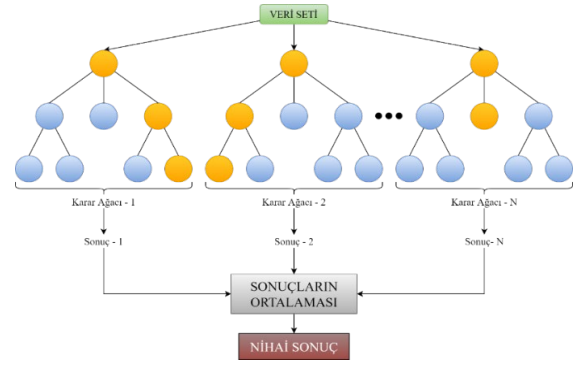
seviyeleri belirlemek için özniteliklerin değerleri ve sınıflandırma başarısındaki ağırlıkları kullanılır. Karar Ağacı'nı diğer sınıflandırıcılardan ayıran en önemli özelliği, ele aldığı problemi böl ve yönet tekniğiyle çözmeye çalışmasıdır. Oluşturulan ağaç yapısında; veri setindeki öznitelikler ağacın düğümlerini, tahmin edilecek olan sonuç sütunundaki değerler ise ağacın yapraklarını oluşturur. Veri setine dahil edilen her yeni örnek, mevcut özniteliklerin değerleri baz alınarak ağaçta uygun olan sınıfa yerleştirilir. Bu yerleştirme işlemini yapmak için, dâhil edilecek olan örnek, ağaç üzerinde hareket ettirilerek sınıfı tespit edilir. Karar Ağaçları sınıflandırma algoritmasının çalışma prensibini açıklayıcı örnek bir görsel Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 4. Karar Ağacı çalışma prensibi

2.3.2. Rastgele Orman

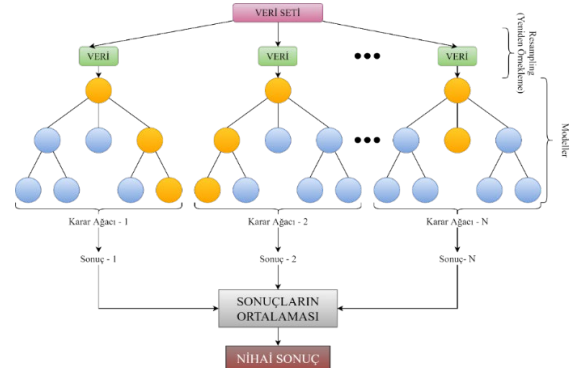
Topluluk (ensemble) öğrenme yöntemini kullanan Rastgele Orman (Random Forest) sınıflandırıcı algoritması, birden fazla modelin oluşturulması ve eğitilmesini üzerinden sınıflandırma gerçekleştirir [23]. Rastgele Orman sınıflandırıcı modeli, eğitim verisini kullanarak rastgele karar ağacı algoritmaları oluşturup sınıflandırma işlemleri yapar. Parametrik olmayan Rastgele Orman sınıflandırıcı modeli, bir model eğitmek yerine birden çok modelin sonucunu göz önünde bulundurarak ortak bir sonuç elde eder. Öznitelikler arasındaki bağlantıları hesaplayabilir. Bu yüzden veri sayısının düşük olduğu durumlarda, çok sayıda öznitelikli veri setleri için, diğer algoritmalara göre daha ideal ve tercih edilebilirdir [24]. Rastgele Orman sınıflandırma algoritmasının çalışma prensibini açıklayıcı örnek bir görsel Şekil 5'te sunulmaktadır.



Şekil 5. Rastgele Orman çalışma prensibi

2.3.3. Torbalama

Torbalama (Bagging) sınıflandırma algoritması, eğitim veri setinin N defa rastgele örneklenmesi sonucunda orijinal eğitim setiyle eşit boyutta N adet eğitim verisi üretilmesini sağlar. Elde edilen veri kümelerini N adet sınıflandırıcı üzerinde eğitim ve tahmin işlemlerine tabi tutar [25], [26]. Eğitilen tüm modellerin sonuçlarını birleştirerek ana sonucu elde eder [27]. Rastgele Orman'dan farklı olarak, veri setini bölerek birden çok Karar Ağacı modeli oluşturur. Rastgele Orman ise tek bir veri seti kullanarak birden çok karar modeli oluşturmaktadır [27]. Şekil 6'da Torbalama algoritmasının örnek bir sınıflandırma prensibi sunulmaktadır.

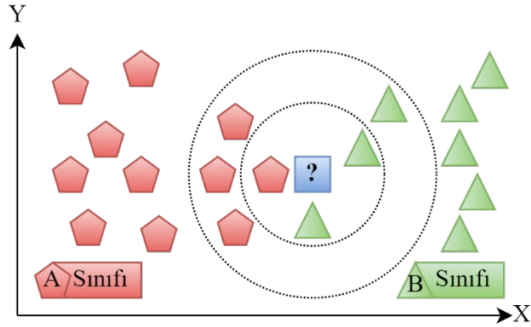


Şekil 6. Torbalama çalışma prensibi

2.3.4. K-En Yakın Komşu

K-En Yakın Komşuluk (K-Nearest Neighbor) sınıflandırma algoritması, örüntü tanıma alanında yaygın olarak kullanılan parametresiz öğrenme algoritmasıdır [28]. Sınıflandırma kuralları, eğitim örnekleri tarafından oluşturulur. Yeni örneklerin sınıflarına karar verirken eğitim kümesindeki örneklerin konumunu göz önünde bulundurur. Yeni gelen örneğin sınıfı tahmin edilirken, kendisine en yakın K adet komşusunun sınıfları dikkate alınır. Dikkate alınan sınıflardan en fazla sayıda bulunan sınıf, yeni örneğin sınıfı olarak tanımlanır. Bu yüzden K değeri olarak tek (3, 5, 7...) sayılar tercih edilir. Çünkü komşular arasında en fazla bulunan

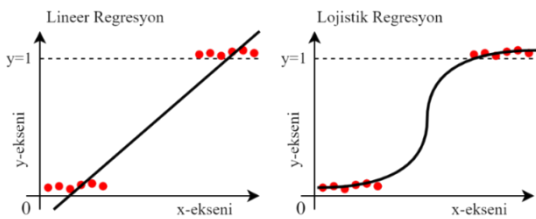
sınıf incelenirken, eşit sayıda çıkması durumu, istenmeyen bir durumdur. Örneklerin birbirlerine olan yakınlıkları; Öklid, Manhattan, Mammig ve Minkowski gibi uzaklık hesabı yapan fonksiyonlarla [29] hesaplanır. K-En Yakın Komşu sınıflandırma algoritmasının çalışma prensibini açıklayıcı, örnek bir görsel Şekil 7’de sunulmaktadır.



Şekil 7. K-En Yakın Komşu çalışma prensibi

2.3.5. Lojistik Regresyon

En temel istatistiksel sınıflandırma yöntemlerinden biri olan Lojistik Regresyon (Logistic Regression), parametrik bir sınıflandırma yöntemidir. En çok kullanılan sınıflandırma yöntemlerinden biri olan Lojistik Regresyon, bir veya daha fazla değişkene bağımlı olan değişkenin modellenmesinde kullanılır [30]. Hedef değişkenin kategorik olmadığı, sürekli değer analizi için benzer çalışma prensibine sahip Lineer Regresyon kullanılabilir. Lojistik Regresyon ile Lineer Regresyon’u birbirinden ayıran en temel özellik Lojistik Regresyon’un çıktısının sürekli değer içermemesidir [31]. Lojistik Regresyon sınıflandırma algoritmasının çalışma prensibini ve Lineer Regresyondan farkını açıklayıcı, örnek bir görsel Şekil 8’de sunulmaktadır.



Şekil 8. Lojistik Regresyon çalışma prensibi ve Lineer Regresyon’dan farkı

2.3.6. Gaussian Naive Bayes

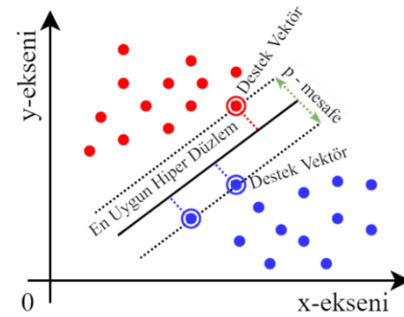
Naive Bayes, Bayes teoreminin uygulanmasına bağlı, olasılık tabanlı istatistiksel bir sınıflandırma algoritmasıdır [32]. Naive Bayes, denetimli öğrenme problemlerinde etkili bir şekilde eğitilebilir ve gerçek dünya durumlarında kullanılabilir [32]. Naive Bayes algoritmasının çalışma prensibi Eşitlik (1)’de sunulmuştur.

$$p(\text{sınıf}|\text{veri}) = \frac{p(\text{veri}|\text{sınıf}) \times p(\text{sınıf})}{p(\text{veri})} \quad (1)$$

Naive Bayes algoritması, probleme yaklaşırken öznitelikler arasında şartlı bağımsız, sınıflar arasında da şartlı bağımlı bir yaklaşım izler [33]. Üretici bir sınıflama algoritması olup sınıfı bilinmeyen bir verinin sorgulanan sınıfta olma olasılığını üretir. Gaussian Naive Bayes, veri kümesinde bulunan her sınıfın bir gauss dağılımını takip ettiğini varsayar. Bu yaklaşımı sergilemesindeki amaç, hatalı tahmin etme oranını olabildiğince düşük tutmaktır [33].

2.3.7. Destek Vektör Makineleri

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines, DVM) sınıflandırmada sıklıkla kullanılan denetimli makine öğrenmesi algoritmalarından birisidir [34], [35]. Destek Vektör Makinelerinin amacı, sınıflar arasındaki en yüksek mesafeli hiper düzlemi bulmaktır [34]. Veri setindeki sınıflara ait olan örneklerin arasındaki mesafelere göre sınıfları ayırt etmeye çalışır. Bunu yaparken hiper düzlem(ler) oluşturur. DVM algoritması, sınıflandırmadaki hata oranının en düşük olduğu senaryoyu elde edebilmek için hiper düzlemler arasındaki uzaklığı olabildiğince uzak tutmaya çalışır. DVM sınıflandırma algoritmasının çalışma prensibini açıklayıcı, örnek bir görsel Şekil 9’da sunulmaktadır.

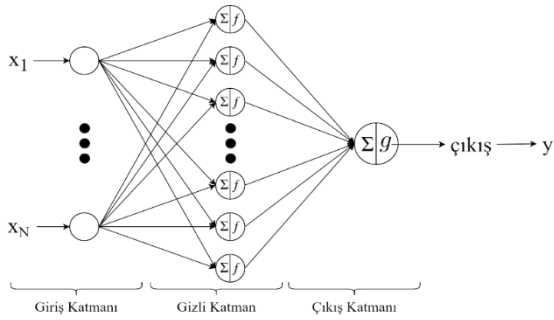


Şekil 9. Destek Vektör Makineleri çalışma prensibi

2.3.8. Yapay Sinir Ağları

Son zamanlarda dünya genelinde, beynin çalışma prensibinin bilgisayar ortamında da taklit edilmesini sağlayacak olan Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks) üzerine yapılan çalışmalar yüksek bir hızla artış göstermiştir. Yapay Sinir Ağları insan beynindeki nöronların işleyiş şekli ve bağlantıları örnek alınarak tasarlanan bir algoritmadır [36]. Veri setindeki özniteliklere ağırlıklar atanır ve sinir ağlarıyla bağlanmış olan katmanlar arasında hesaplamalar gerçekleştirilerek

kategori veya değer tahminleme işlemi yapılır. Yapay sinir ağlarında ilk katman, veri setindeki öznitelikleri girdi olarak alan girdi katmanı; son katman ise çıktısı sınıf veya sürekli değer tahmini olarak veren çıktı katmanıdır. N adet öznitelikten oluşan bir veri seti, yapay sinir ağı kullanılarak sınıflandırma işlemine tâbi tutulacak olursa; girdi katmanında N adet nöron, çıktı katmanında ise sınıf sayısı kadar nöron bulunan bir model geliştirilmelidir. Nöronlar; girdileri ve bu girdilerin ağırlıklarını, model tasarlanırken belirlenmiş olan bir f fonksiyonuna parametre olarak verir ve çıktı değeri hesaplanır. Giriş-çıkış katmanları arasında uygun sayıda ve yoğunlukta gizli katman eklenebilir. Gizli katmanlar, nöronların arasında kalan sinir ağlarının alacağı ağırlık değerinin hesaplanması işlemi daha detaylı hale getirir. Şekil 10'da, yapay sinir ağları yaklaşımıyla görselleştirilmiş; N adet girişe, tek çıkışa, opsiyonel sayıda nörona ve tek gizli katmana sahip, ikili sınıflandırıcı örneği yer almaktadır.



Şekil 10. Yapay Sinir Ağları çalışma prensibi

2.4. Değerlendirme Yöntemleri

Çalışmamızda veri temini, ayrıntılı veri ön işleme adımları ve kullanılacak makine öğrenmesi algoritmalarının belirlenmesinden sonra yapılacak sınıflandırma işleminin sonuçlarının nasıl değerlendirileceği de önemli bir aşamadır. Bu aşamada kullanılacak yöntemler, bu yöntemlerin tanımları ve çalışmamızda kullanılma sebepleri alt başlıklarda ele alınmıştır.

2.4.1. Çapraz Doğrulama

Sınıflandırma çalışmalarında, sınıflandırıcı algoritma ile bir model eğitilirken, veri seti eğitim ve test verisi olarak ikiye (genelde %70-30 oranında) ayrılır. Ancak bu durumda dengesiz bir dağılım gerçekleşirse, modelin gerçek performansının görülmesi mümkün olmayabilir. Bu doğrultuda K-Kat Çapraz Doğrulama (K-Fold Cross Validation) yöntemi kullanılarak daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir. Çapraz doğrulama, veri setini K eşit parçaya böler ve parçalardan birini test için saklar. Verinin geri kalanını ise modeli eğitmek için kullanır. Bu eğitim işlemini, her K parça için gerçekleştirir. Böylece

veri setinin sunabileceği maksimum performans görülmüş olur. Çapraz Doğrulama işleminin örnek bir görüntüsü Şekil 11'de sunulmuştur.

5-Katmanlı Doğrulama (K=5)					
Katman 1	Eğitim verisi			Test verisi	ϵ_1
Katman 2	Eğitim verisi		Test verisi	Eğitim verisi	ϵ_2
Katman 3	Eğitim verisi	Test verisi	Eğitim verisi		ϵ_3
Katman 4	Eğitim verisi	Test verisi	Eğitim verisi		ϵ_4
Katman 5	Test verisi	Eğitim verisi			ϵ_5
	20%	40%	60%	80%	100%

Şekil 11. K=5 için K-Katlı Çapraz Doğrulama Dağılımı

2.4.2. Hata Matrisi

Sınıflandırma problemlerinde, eğitilen modelin performansını ölçmek için modelin tahmin sonuçları Hata Matrisi (Confusion Matrix) şekline getirilerek daha açıklanabilir bir inceleme yapılması sağlanır. Hata matrisinde, True adı altındaki değerler doğru yapılan tahminleme sayısını, False adı altındaki değerler ise yanlış yapılan tahminleme sayısını belirtir. Her bir sütun tahminlenen değeri, her bir satır ise gerçek değeri içerir. Böylece sol üstten sağ alta doğru çapraz bir biçimde devam eden hücreler, tahmin sonucunun doğruluğunu, geri kalan hücreler ise hata oranını verir. Çalışmamızda kullandığımız modellerin performansını ölçmek için kullanılacak hata matrislerinin içerik tanımları 3 sınıflı sınıflandırma modelleri için Şekil 12'de, 5 sınıflı sınıflandırma modelleri için Şekil 13'te sunulmuştur.

	Tahmin edilen etiket (C1)	Tahmin edilen etiket (C2)	Tahmin edilen etiket (C3)
Gerçek etiket (C1)	True (C1-C1)	False (C1-C2)	False (C1-C3)
Gerçek etiket (C2)	False (C2-C1)	True (C2-C2)	False (C2-C3)
Gerçek etiket (C3)	False (C3-C1)	False (C3-C2)	True (C3-C3)

Şekil 12. 3 sınıflı veri setlerinin hata matrisi

	Tahmin edilen etiket (C1)	Tahmin edilen etiket (C2)	Tahmin edilen etiket (C3)	Tahmin edilen etiket (C4)	Tahmin edilen etiket (C5)
Gerçek etiket (C1)	True (C1-C1)	False (C1-C2)	False (C1-C3)	False (C1-C4)	False (C1-C5)
Gerçek etiket (C2)	False (C2-C1)	True (C2-C2)	False (C2-C3)	False (C2-C4)	False (C2-C5)
Gerçek etiket (C3)	False (C3-C1)	False (C3-C2)	True (C3-C3)	False (C3-C4)	False (C3-C5)
Gerçek etiket (C4)	False (C4-C1)	False (C4-C2)	False (C4-C3)	True (C4-C4)	False (C4-C5)
Gerçek etiket (C5)	False (C5-C1)	False (C5-C2)	False (C5-C3)	False (C5-C4)	True (C5-C5)

Şekil 13. 5 sınıflı veri setlerinin hata matrisi

Yukarıda sunulan hata matrislerinde, C1, C2, C3, C4 ve C5 ile belirtilen değerler sınıfları temsil

etmektedir. Matrislerde yer alan her bir satırda, ilgili sınıf belirtilmiş olup her sütunda ise kullanılan sınıflandırma modelinin ilgili sınıfın kaç elemanını hangi sınıfta tahminlediğinin bilgisi sunulur. Örnek olarak; 1. satır 1. sütunda yer alan değer, C1 sınıfına ait olan verilerin, C1 olarak tahmin edilme sayısını içerir. Bu senaryo, doğru tahmin yapılması durumunda gerçekleşir. Ancak 1. satır 2. sütunda yer alan değer, C1 sınıfına ait olan verilerin, C2 sınıf etiketine sahip olarak tahmin edilme sayısını içerir. Bu senaryoda ise yanlış tahminleme yapılmış demektir. Bu durumda doğru tahminleme işlemi yapılan senaryolar sarı, yanlış tahminleme işlemi yapılan senaryolar ise kırmızı ile renklendirilmiştir. Hata matrisleri kullanılarak, eğitilen modellerin doğruluk değeri elde edilebilir.

2.4.3. Performans Değerlendirmesi

Hata matrisi çıkarılarak sınıflandırma algoritmalarının örnekleri hangi sınıflarda tahmin ettiğini ve bu örneklerin gerçekte hangi sınıflarda olduğunu görebilmek bu algoritmaların başarısını kıyaslayabilmek için yeterli değildir. Sınıflandırma işlemlerinde elde edilen başarıyı değerlendirebilmek için genellikle dengesiz dağılıma sahip veri için f-skor hesaplanırken dengeli veri setleri için doğruluk (accuracy) ölçeği kullanılmaktadır. Çalışmamızda kullanılan doğruluk ölçeği Eşitlik (2)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{Doğru Sınıflandırılmış Örnek Sayısı}}{\text{Veri Setinde Bulunan Tüm Örneklerin Sayısı}} \quad (2)$$

Çalışmamızda hazırlamış olduğumuz 3 sınıflı ve 5 sınıflı veri setleri dengeli dağılıma sahip olduğundan her iki veri seti için de kullanılan algoritmaların başarısı Eşitlik (2)'deki doğruluk ölçeği üzerinden karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

III. DENEYSEL SONUÇLAR

Bir önceki bölümde ayrıntıları verilen veri seti, belirtilen ön işleme adımlarından geçirilerek sınıflandırılmaya uygun hale getirilmiştir. Yine aynı bölümde tanımları ve özellikleri verilen, Torbalama, Karar Ağaçları, K-En Yakın Komşuluk, Lojistik Regresyon, Gaussian Naive Bayes, Rastgele Orman, Destek Vektör Makineleri ve Yapay Sinir Ağları olmak üzere 8 farklı sınıflandırma algoritması çalışmamızda uygulanmıştır. Uygulamada kullanılan algoritmaların hepsinde veri setleri 5-katlı çapraz doğrulamayla işleme alınmıştır. Sınıflandırma

algoritmalarının eğitimi sonucunda, sınıflandırıcı modellerden elde edilen test seti başarı sonuçları 3 sınıflı veri seti için Tablo 5'te, 5 sınıflı veri seti için Tablo 6'da sunulmuştur. Kaba kuvvet yöntemi sonucunda elde edilen en başarılı YSA modelinin ayrıntıları Tablo 7'de sunulmuştur. Kullanılan YSA modelinde son Dense katmanının çıktısı 3 sınıflı veri seti için 3, 5 sınıflı veri seti için 5 çıktı verecek şekilde tasarlanmıştır. Modelimizdeki ayarlanabilir parametrelerde; optimizer=Adam, epoch sayısı=200, batch size=16 olarak seçilmiştir.

Tablo 5. Kullanılan sınıflama algoritmalarından elde edilen 3 sınıflı sınıflandırma başarısı

Algoritma	Çapraz Doğrulama Ortalama Doğruluk	Çapraz Doğrulama Standart Sapma
Rastgele Orman	86,69%	1,01%
Torbalama	84,86%	0,54%
Karar Ağaçları	81,93%	0,83%
K-En Yakın Komşuluk	81,69%	0,97%
Destek Vektör Makineleri	76,58%	0,11%
Lojistik Regresyon	57,46%	0,65%
Gaussian Naive Bayes	50,39%	0,67%

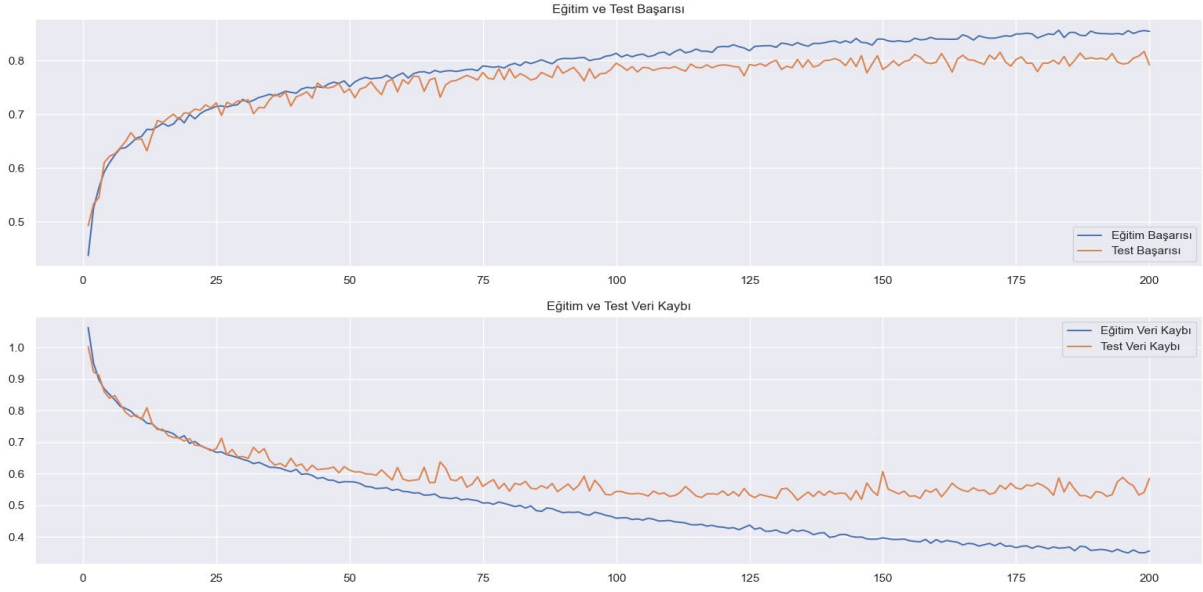
Tablo 6. Kullanılan sınıflama algoritmalarından elde edilen 5 sınıflı sınıflandırma başarısı

Algoritma	Çapraz Doğrulama Ortalama Doğruluk	Çapraz Doğrulama Standart Sapma
Rastgele Orman	81,61%	0,62%
Torbalama	80,11%	1,22%
Karar Ağaçları	74,98%	0,79%
K-En Yakın Komşuluk	72,96%	1,20%
Destek Vektör Makineleri	66,80%	1,13%
Lojistik Regresyon	42,90%	1,43%
Gaussian Naive Bayes	37,78%	2,04%

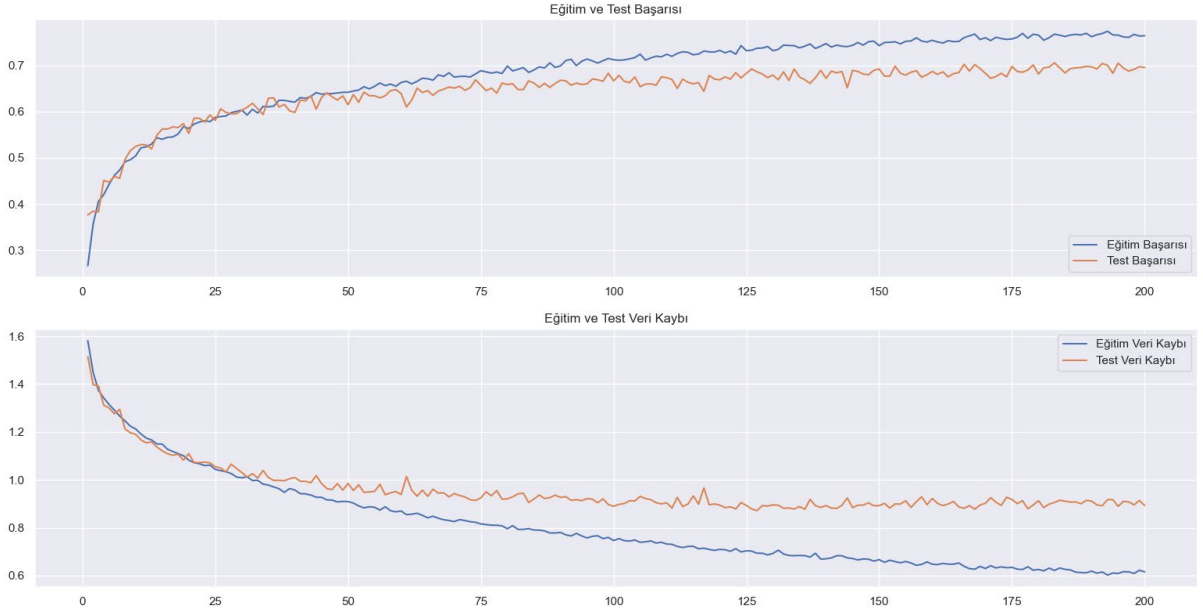
Tablo 7. Kullanılan YSA modelinin özellikleri

Katman	Çıktı	Aktivasyon
Dense	64	Relu
Dense	32	Relu
Dense	16	Relu
Dropout	0.1	
Dense	(3 veya 5)	Softmax

Yapay Sinir Ağları eğitimlerinin 200 epoch'ta kesilmesinin sebebi, 200. epoch'tan sonra meydana gelmeye başlayan aşırı öğrenme (over-fitting) durumudur. Şekil 14 ve Şekil 15'de YSA modelinin eğitim sonuçları (sırasıyla 3 sınıflı ve 5 sınıflı veri seti için) verilmiştir. Bu eğitimler sonucunda; 3 sınıflı veri seti %80,34, 5 sınıflı veri seti ise %70,56 doğruluk oranına ulaşmıştır.



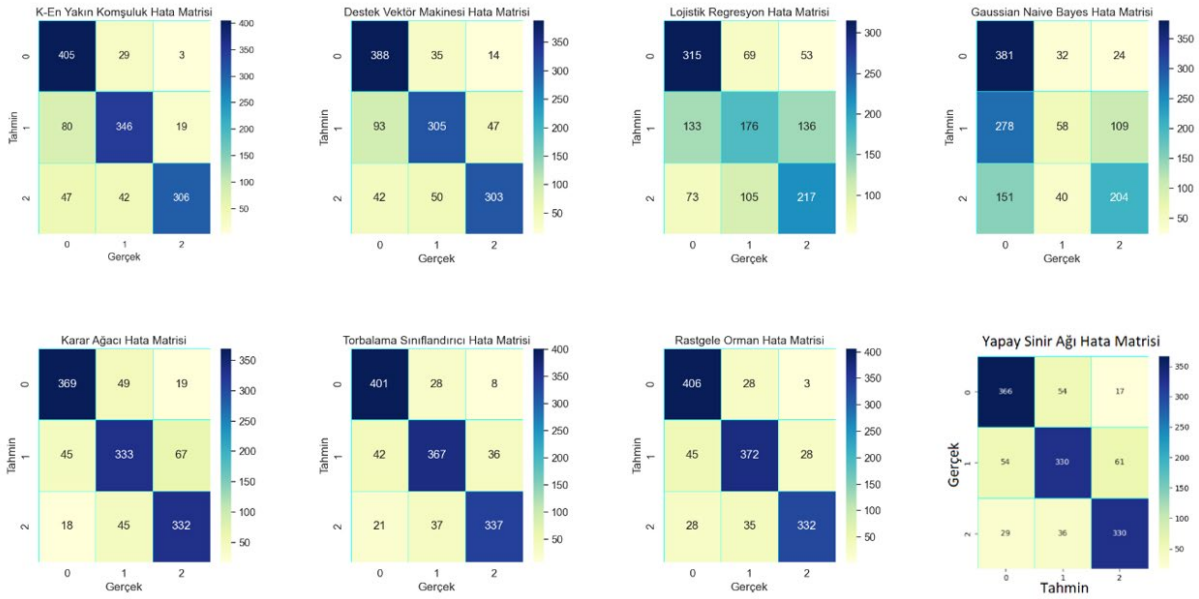
Şekil 14. 3 sınıflı veri setinin sınıflandırılmasından elde edilen YSA modeli sonuç grafikleri



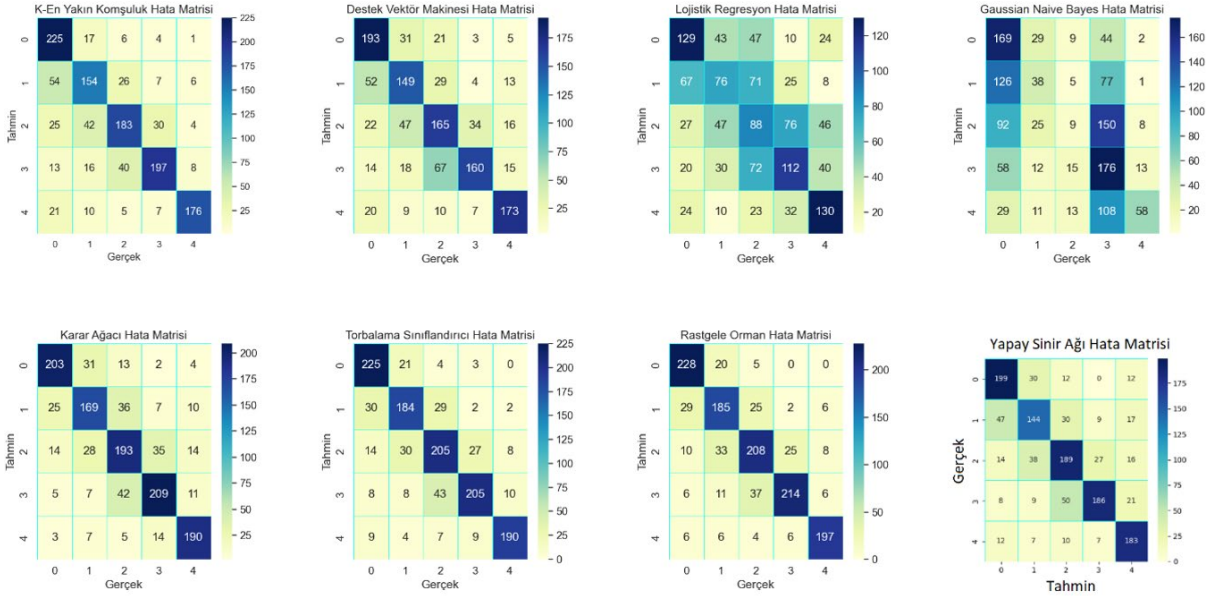
Şekil 15. 5 sınıflı veri setinin sınıflandırılmasından elde edilen YSA modeli sonuç grafikleri

Toplamda 2 veri seti için 8 farklı sınıflandırma işleminin gerçekleştirildiği çalışmamızda, yukarıda bahsedildiği üzere örneklerin sınıflara dağılımlarını inceleyebilmek için hata matrisi kullanılmıştır. Şekil 16'da 3 sınıflı sınıflandırma sonucu sınıflandırıcı modellerden elde edilen hata matrisleri, Şekil 17'de ise 5 sınıflı sınıflandırma

sonucu sınıflandırıcı modellerden elde edilen hata matrisleri sunulmuştur. Şekil 16 ve Şekil 17 incelendiği zaman 3 sınıflı sınıflandırıcıların 5 sınıflı sınıflandırıcılara göre daha başarılı sonuçlar sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi sınıf sayısı azaldıkça doğru tahmin etme olasılığının artmasıdır.



Şekil 16. 3 sınıflı veri setinin sınıflandırılmasından elde edilen hata matrisleri



Şekil 17. 5 sınıflı veri setinin sınıflandırılmasından elde edilen hata matrisleri

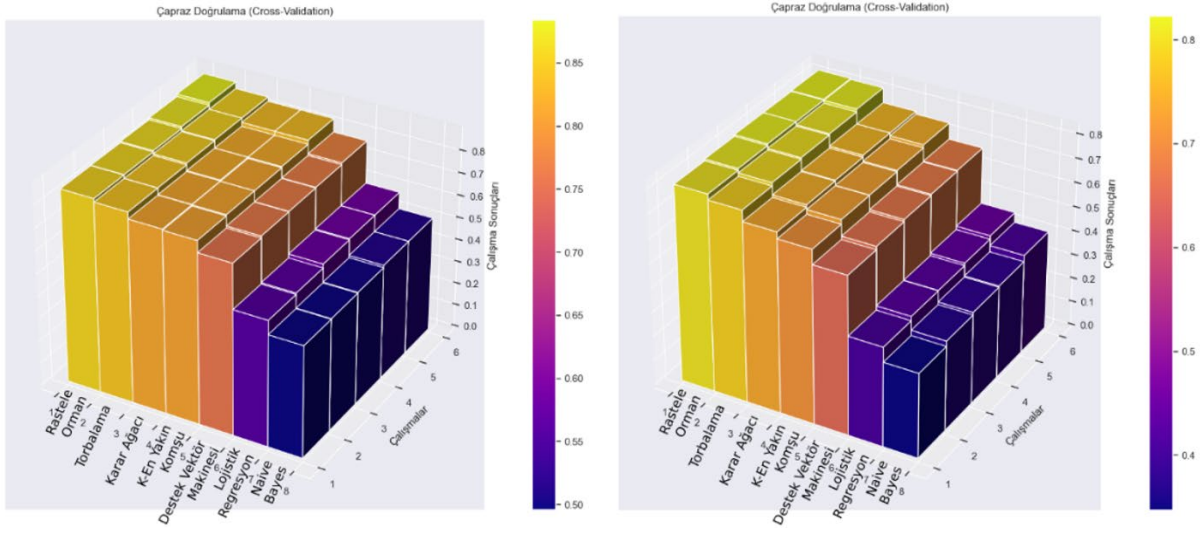
Kullanılan sınıflandırıcı modellerden üretilen sonuçlar 5 Katlı Çapraz Doğrulama ile elde edildiğinden her kattan elde edilen sonuçların her model için tutarlı olması beklenir. Çalışmamızda kullandığımız modellerin tutarlılığı, modellerin her test seti için ürettiği sınıflandırma sonuçlarının karşılaştırması Şekil 18'de sunulmuştur.

Şekil 18'de X-ekseninde algoritmaların isimleri, Y-ekseninde ise bu algoritmaların çalışma sayıları görülmektedir. Eldeki X-Y şeklindeki 2D ortama 3. bir boyut (Z-ekseni) olarak, bu algoritmaların çalışma sonuçları da eklenmiştir. Çalışma sonuçları küçükten büyüğe sıralanarak bir rampa oluşması sağlanmıştır. Bu sayede rampanın yüksek kısmında kalan algoritmaların, yüksek verimliliğe sahip

algoritmalar olduğu rahatlıkla görülebilmektedir. Oluşturulan 3D grafikler ve doğruluk sonuçları incelendiğinde, en yüksek doğruluk ortalamasına, yani en yüksek başarıya sahip modelin Rastgele Orman algoritması ile üretilen sınıflandırıcı model olduğu görülebilmektedir. Çalışmamızda hem 3 sınıflı veri setinde hem de 5 sınıflı veri setinde en iyi performansın Rastgele Orman sınıflandırma algoritmasından elde edilmesinin en belirgin özelliği, kullanılan belirleyicileri farklı dallanmalar ile kullanılabilmesi olarak görülmektedir. Bu durum, çalışmamızda hava kirliliği tahmininde kullanılmasının anlamlı olduğu düşünülen özneliklerin belirlenmesinde başarılı bir aşama gerçekleştirildiğinin göstergesi olmaktadır.

Lojistik Regresyon ve Naive Bayes algoritmalarının, kullanılan diğer algoritmalara göre daha başarısız sonuçlar sağladığı Şekil 18'de görülmektedir. Bu algoritmaların sunulan problem

için yetersiz olması veya veri seti ile uyumsuz olması, düşük başarımın elde edilmesinin olası sebeplerindendir.



Şekil 18. Makine öğrenmesi algoritmalarının 5-katlı çapraz doğrulama sonuçlarının 3 sınıflı ve 5 sınıflı veri setleri için karşılaştırılması

IV. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Gün geçtikçe daha da kirlenen havanın küresel boyutlarda iklim krizine yol açmış olması, bilim insanlarının bu konuda çözümler geliştirmesini gerekli kılmıştır. İleride karşılaşılabilecek olan küresel tehlike ve tehditlerle baş edilebilmesi için öncelikle mevcut durumun bilincinde olunması gerekmektedir. Günümüzde ne yazık ki şehirlerde hava kalitesi ölçümü yeterli miktarda ve doğrulukta yapılamamaktadır. Çalışmamızda, şehirlerdeki hava kalitesinin hangi belirleyiciler gözlenerek değerlendirilebileceği ve bu değerlendirmenin yapay zekâ yöntemleri kullanılarak nasıl sonuçlandırılacağı ele alınmıştır. Hava kalitesi belirleyicilerinin makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırıldığı çalışmamızda, hava kalite endeksi değerinin şehirlerdeki dağılımı ve bu değerlerin insan sağlığına etkisi göz önüne alınarak, şehirler; iyi, sağlıklı ve tehlikeli olmak üzere 3 sınıflı, iyi, orta, sağlıklı, çok sağlıklı ve tehlikeli olmak üzere 5 sınıflı yapılarda ele alınmıştır. Sekiz farklı sınıflandırma algoritmasının kullanıldığı çalışmamızda, en yüksek sınıflandırma başarısı; 3 sınıflı sınıflandırmada %86,69 oranında, 5 sınıflı sınıflandırmada %81,61 oranında Rastgele Orman algoritmasından üretilen modelden elde edilmiştir. Çalışmamızda ele aldığımız belirleyiciler ve geliştirdiğimiz yöntemler ile şehirlerdeki hava kirliliği seviyesi kısa sürede belirlenebilmektedir. Bu sayede şehirlerdeki hava kirliliğine gerekli farkındalığın oluşması, önlem ve tedbirlerin erkenden alınması sağlanabilecektir. Sonraki çalışmalarda, sürekli elde edilecek hava kalitesi değeri ile şehirlerde kritik

durumlar için uyarı verebilen modellerin geliştirilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- [2] Advameg Inc. City Data, Advanced U.S. City Search, <http://www.city-data.com/advanced/search.php> (February 2022).
- [3] AKYÜZ, A. A. (2019). YAŞAMSAL BİLİNMEZLİK: İKLİM KRİZİ VE GIDA.
- [4] TÜBİTAK Bilim ve Teknik, 632's Extra Article, <https://bilimteknik.tubitak.gov.tr/pdf/temmuz-2020>, (February 2022).
- [5] Houghton, J. (2005). Global warming. *Reports on progress in physics*, 68(6), 1343.
- [6] Bayram, H. (2005). Türkiye'de hava kirliliği sorunu: Nedenleri, alınan önlemler ve mevcut durum. *Toraks Dergisi*, 6(2), 159-165.
- [7] Pasupuleti, V. R., Kalyan, P., & Reddy, H. K. (2020, March). Air quality prediction of data log by machine learning. In *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)* (pp. 1395-1399). IEEE.
- [8] Mahalingam, U., Elangovan, K., Dobhal, H., Valliappa, C., Shrestha, S., & Kedam, G. (2019, March). A machine learning model for air quality prediction for smart cities. In *2019 International conference on wireless communications signal processing and networking (WiSPNET)* (pp. 452-457). IEEE.

- [9] Birleşmiş Milletler, Ambient (outdoor) air pollution, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (November 2021).
- [10] Wikimedia Foundation, Sources of Air Pollution, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sources_of_Air_Pollution.png (November 2021).
- [11] Janarthanan, R., Partheeban, P., Somasundaram, K., & Elamparithi, P. N. (2021). A deep learning approach for prediction of air quality index in a metropolitan city. *Sustainable Cities and Society*, 67, 102720.
- [12] Bhalgat, P., Bhoite, S., & Pitare, S. (2019). Air quality prediction using machine learning algorithms. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 8(9), 367-390.
- [13] NandigalaVenkatAnurag, Y., & Sharanya, S. (2019). Air Quality Index Prediction with Meteorological Data Using Feature Based Weighted Xgboost. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(1), 1355-1358.
- [14] Liang, Y. C., Maimury, Y., Chen, A. H. L., & Juarez, J. R. C. (2020). Machine learning-based prediction of air quality. *Applied Sciences*, 10(24), 9151.
- [15] Kamal, M. M., Jailani, R., & Shauri, R. L. A. (2006, June). Prediction of ambient air quality based on neural network technique. In *2006 4th Student Conference on Research and Development* (pp. 115-119). IEEE.
- [16] Holloway, T., Spak, S. N., Barker, D., Bretl, M., Moberg, C., Hayhoe, K. & Wuebbles, D. (2008). Change in ozone air pollution over Chicago associated with global climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D22).
- [17] Zhu, D., Cai, C., Yang, T., & Zhou, X. (2018). A machine learning approach for air quality prediction: Model regularization and optimization. *Big data and cognitive computing*, 2(1), 5.
- [18] Almetwally, A. A., Bin-Jumah, M., & Allam, A. A. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(20), 24815-24830.
- [19] Wong, T. W., San Tam, W. W., Yu, I. T. S., Lau, A. K. H., Pang, S. W., & Wong, A. H. (2013). Developing a risk-based air quality health index. *Atmospheric environment*, 76, 52-58.
- [20] Rovira, J., Domingo, J. L., & Schuhmacher, M. (2020). Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2.5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain). *Science of The Total Environment*, 703, 135538.
- [21] Stripe Payments Europe Ltd., Paris Air Pollution Has Reached A Critical Level <https://www.statista.com/chart/7152/paris-air-pollution-has-reached-a-critical-level/> (June 2021).
- [22] Friedl, M. A., & Brodley, C. E. (1997). Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 61(3), 399-409.
- [23] Deus, D. (2018). Assessment of Supervised Classifiers for Land Cover Categorization Based on Integration of ALOS PALSAR and Landsat Data. *Advances in Remote Sensing*, 7(2), 47-60.
- [24] Chen, X., & Ishwaran, H. (2012). Random forests for genomic data analysis. *Genomics*, 99(6), 323-329.
- [25] Bryll, R., Gutierrez-Osuna, R., & Quek, F. (2003). Attribute bagging: improving accuracy of classifier ensembles by using random feature subsets. *Pattern recognition*, 36(6), 1291-1302.
- [26] Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- [27] Kuhn, M., & Johnson, K. (2013). *Applied predictive modeling* (Vol. 26, p. 13). New York: Springer.
- [28] Suguna, N., & Thanushkodi, K. (2010). An improved k-nearest neighbor classification using genetic algorithm. *International Journal of Computer Science Issues*, 7(2), 18-21.
- [29] Cha, S. H. (2007). Comprehensive survey on distance/similarity measures between probability density functions. *City*, 1(2), 1.
- [30] Hilbe, J. M. (2011). Logistic regression. *International encyclopedia of statistical science*, 1, 15-32.
- [31] Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley & Sons.
- [32] Kamel, H., Abdulah, D., & Al-Tuwaijari, J. M. (2019, June). Cancer classification using gaussian naive bayes algorithm. In *2019 International Engineering Conference (IEC)* (pp. 165-170). IEEE.
- [33] ŞAHİN, A. R., DOĞAN, K., & SİVRİ, S. (Eds.). (2020). *Sağlık Bilimlerinde Yapay Zeka*. Akademisyen Kitabevi.
- [34] Sisodia, D., & Sisodia, D. S. (2018). Prediction of diabetes using classification algorithms. *Procedia computer science*, 132, 1578-1585.
- [35] Noble, W. S. (2006). What is a support vector machine?. *Nature biotechnology*, 24(12), 1565-1567.
- [36] Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Mohamed, N. A., & Arshad, H. (2018). State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. *Heliyon*, 4(11), e00938.

The Disruptive Nature of 3D Printing Technology on Mass Customization and Supply Chain In The Context of Environment and Economy

Gökçen Bayram¹, B.Gültekin ÇETİNER¹

¹Marmara University, Department of Industrial Engineering, 34854, İstanbul, Türkiye

Abstract

Today's production paradigm is shaped by mass production, where production processes and tools are standardized, expertise is not taken much into account, and the same products are produced either in batches or massively in small varieties. Production is carried out in factories in certain centers, and the products produced are often distributed all over the world. There is a need for a multi-agent supply chain network and supply chain management with the stages of delivering the products to the final consumer, starting from the pre-production stage. It has become clear that the need for a complex supply chain network by producing products from a single center is no longer economical and environmentally friendly. In recent years, consumers have started to think about the harmful effects of the products they buy. Changing customer needs and demands have also made companies consider the mass customization production model. Recently, three-dimensional printing technologies, also defined as additive manufacturing technology, have emerged as a new production technology. With this disruptive technology, production models and supply chain networks are subject to change and transformation. In this study, the environmental and economic benefits of 3D printing technology are analyzed in the context of mass customization production model and supply chains. The following comments were made as a result of the study. 3D printing technology enables production at distributed points instead of a central production point. In this way, production costs are reduced as many intermediate production points are eliminated. In addition, logistics costs and logistics-related carbon emissions are also reduced. With decreasing costs, development is provided in local economies.

Key Words: 3D printing, Mass customization, Supply chain management, Environment, Ecology

Öz

Günümüz üretim paradigması, üretim süreçlerinin ve araçlarının standart hale getirildiği, uzmanlığın pek dikkate alınmadığı, aynı ürünlerin partiler halinde ya da kitlesel olarak az çeşitler halinde üretildiği seri üretim ile şekillenmektedir. Belirli merkezlerdeki fabrikalarda üretim yapılmakta ve üretilen ürünler çoğu zaman tüm dünyaya dağıtılmaktadır. Ürünlerin üretim öncesi aşamadan başlayarak nihai tüketiciye ulaştırılması aşamaları ile çok etmenli bir tedarik zinciri ağına ve tedarik zinciri yönetimine ihtiyaç vardır. Tek bir merkezden ürün üreterek karmaşık bir tedarik zinciri ağına duyulan ihtiyacın artık ekonomik ve çevre dostu olmadığı ortaya çıkmıştır. Son yıllarda tüketiciler satın aldıkları ürünlerin zararlı etkilerini düşünmeye başladılar. Değişen müşteri ihtiyaç ve talepleri de firmaları kitlesel bireyselleştirme üretim modelini düşünmeye sevk etmiştir. Son zamanlarda, eklemeli imalat teknolojisi olarak da adlandırılan üç boyutlu baskı teknolojileri, yeni bir üretim teknolojisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu yıkıcı teknoloji ile üretim modelleri ve tedarik zinciri ağları değişime ve dönüşüme tabidir. Bu çalışmada, 3D baskı teknolojisinin çevresel ve ekonomik faydaları, kitlesel bireyselleştirme üretim modeli ve tedarik zincirleri bağlamında analiz edilmektedir. Çalışma sonucunda aşağıdaki yorumlar yapılmıştır. 3D baskı teknolojisi, merkezi bir üretim noktası yerine dağıtık noktalarda üretim yapılmasını sağlar. Bu sayede birçok ara üretim noktası ortadan kalktığı için üretim maliyetleri düşürülür. Ayrıca lojistik maliyetleri ve lojistik kaynaklı karbon emisyonları da azaltılmaktadır. Düşen maliyetler ile yerel ekonomilerde gelişme sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3D Baskı, Kitlesel bireyselleştirme, Tedarik zinciri yönetimi, Çevre, Ekoloji

1. INTRODUCTION

Recently, consumers have started to approach more consciously about climate change and environmental problems. They frequently question whether the products they buy harm nature or their health as a result of mass production processes. This situation led the producers to think about nature and environmental problems and to review their production processes from an ecological point of view. While companies are working on cost, delivery times and quality, they take green performance into account to reduce or eliminate the pollution and negative environmental effects. Purchasing environmentally friendly raw materials used in production, improving fuel efficiency, and reducing emissions from transportation vehicles are important problems encountered in supply chain management. At this stage, it is clear that business models have started to change. The advantage of using 3D printing technologies in the production processes of the enterprises will reduce material-related waste, logistics-related emissions, shortening of production time, energy consumed for production, energy-related emissions, and will also reduce production costs.

Mass production based on fossil fuels as common energy source is getting replaced by mass customization, where customer demand is the main drive. In addition, customers pay special attention to the design of the products they will buy with eco-design thinking.

Once the production rate exceeds a certain threshold value for producing goods and services through especially mass production systems, then majority of people become pure consumers according to analysis made by Ivan Illich (1977). Since mass production requires very costly systems, the population over the threshold value becomes passive in economies. On the other hand, mass production needs large amount of sales to meet Return of Investment (ROI) over time, it is also criticized for causing planned obsolescence (Çetiner and Gündoğan, 2014). The main output of planned obsolescence is oversupply. As a result of this mass consumerism and oversupply produced in the current mass production paradigm, rapid resource consumption, carbon emissions occur due to the production being mostly based on fossil fuels as energy source. While these are the environmental problems of mass production, the production of low quality and low value-added products are also economic problems. A paradigm shift is required for ecological and economic sustainability for supply chain management systems. Existing problems and solutions should be addressed with a holistic paradigm (Çetiner and Gündoğan, 2014). Disruptive technologies, such as 3D printers and other mass customization methods might help change paradigm from a harmful production era into more environment friendly one. Supply chain systems are bound to change due to this paradigm shift.

As a result of the sensitivities that have developed about ecology and the protection of the natural environment in recent years, companies have started to transform themselves. In this transformation phase, they realized that supply chain partners are also important and effective for the management of the natural environment.

The main question that drives this article is to what extent additive manufacturing technology, 3D printing, is transforming mass production to mass customization and supply chain applications, and is linked to environmental management. In order to understand the transformative and destructive power of 3D printers, binary analyzes were made on the topics of mass customization and supply chain. These can be listed as the connection between mass customization and 3D printing technology and the connection between supply chain and 3D printing technology. The benefits of 3D printers to end users, manufacturers, supply chain management, environment and economy have been

compiled and interpreted in the context of 3D printers, mass customization and supply chain. As a result of the study, the benefits of 3D printing technologies to local economies, the improvements to be made in supply chain management and the ecological benefits provided by both the use of recycled raw materials and the reduction of logistics-based carbon footprint are discussed.

2. LITERATURE REVIEW

The current manufacturing occurring worldwide today is carried out through mass production paradigm. The primary aim of manufacturing technology is to produce the designed products at the lowest cost and with the most accepted quality quickly. Factory type production existing mainly as mass production requires very high production volumes with very low varieties under certain standards where operator skill levels do not need to be as high as in other production models (Ryan et al., 2017).

From a classical point of view, production can be defined as one-to-one-based personalized production or mass production. Although mass-produced products are much cheaper than tailor-made production that requires manual dexterity and low skilled labor, it gives little importance to customer requests and expectations. With the advent of additive manufacturing, the definition of classical manufacturing started to change. Additive manufacturing provides engineers with the opportunity to produce computer-aided, personalized and uniquely designed products by using a combination of automated processes and standardized materials (Melchels et al., 2014). Additive manufacturing or 3D printing involves the production of a prototype or final product in a very short time by accumulating layers. This new technology leads to a radical change in the production system based on mass production. With 3D printing, production processes are undergoing radical changes. With reduced production steps and work processes, raw material and energy losses are minimized. Time spent on production and logistics activities is saved (Panwisawas et al., 2020).

Energy efficiency is one of the goals sought to be improved in supply chain management. Manufacturers are using digital technology applications or replacing existing technologies with clean technology to improve their energy efficiency. 3D printing, which is one of the innovative applications, causes a change in existing production models due to its advantage in reducing energy use. Resource efficiency with 3D printing is achieved by 3D printing technology reducing the need for materials and wastes used in production, and the same material can be used repeatedly (Feng et al., 2022).

Household products, toys, small parts, ornaments, figurines are the first products produced with 3D printers (Majumdar et al., 2018). With many studies, it is seen that houses and boats are also produced with 3D printers. In addition to these, aerospace industry application can also be offered. Nickel-based superalloy, developed for turbojet engines and suitable for high temperature operations, is widely used in the aerospace and energy industries. Approximately 10% of the super alloy used in the gas turbine production of turbojet engines is used, while the remaining material is waste. 3D printing can replace traditional manufacturing and be used to produce complex geometries such as turbine engines without causing waste (Panwisawas et al., 2020).

Nowadays, plastic packages, plastic boxes and disposable products made of plastic are used quite frequently. Tons of plastic waste is produced every day. Plastic remains intact in nature for many years and harms nature. However, microplastics also pose a danger to the soil and aquatic ecosystem. In terms of waste management, it is aimed to prevent waste generation instead of collecting and disposing of wastes. In order not to create plastic waste, the production and consumption of plastic should be reduced, but in today's conditions, it is not enough to prevent the use of plastic. In cases where waste generation cannot be prevented, waste reduction and waste reuse gain importance (TMMOB, 2021). 3D printers offer innovative solutions for the reuse of plastics. At this stage, plastic wastes can be converted into plastic filaments and reused.

3D printing technology, which gives users the right to personalize through the opportunity to produce their own original designs, also offers various material alternatives. It is a desired feature that these materials, also known as additives or filaments, do not harm ecology during the production phase. At this stage, studies are carried out on wood and sawdust materials due to their renewable properties (Cengiz and Aktepe, 2022).

In this study, the discussion of the destructive and transformative power of 3D printer technology was made through mass customization and supply chain networks. These two main points are analyzed in the context of how mass production, which is the main element of the current economic model and has a centralized structure, can be transformed into decentralized local economies. Compiling and analyzing a limited number of studies on strengthening local economies, ecology, creating a circular economy at minimum waste level, and making policy and method recommendations distinguish this study from other studies in the literature.

2.1. Additive Manufacturing and 3D Printing Technology

(Berman, 2020) explained three main characteristics of disruptive technologies: Innovation, creating new markets and a more efficient production technology with less costly materials. With a new production model for consumers, it makes consumers as producers, improves delivery speed, eliminates intermediate producers and hence leads to transformations in the existing supply chain by enabling customers to customize the design of the product they want to have and enabling local and small-scale manufacturers to survive with new business models against large companies. It epitomizes the destructive nature of 3D printing technology. Additive manufacturing is one of the best developing technologies for the standard of living, localization and the ability of local businesses to compete with global companies (Shree et al., 2019).

3D printing technology proverbially Rapid Prototype Manufacturing (RPM), and in terms of production technology, 3D printing technology is also known as Additive Manufacturing (AM). 3D printing enables the production of objects by stacking certain materials layer by layer based on a 3D model file that is designed and maintained in digital form. It is a technology that uses different printing techniques and printing tools as well as different materials. 3D printing websites provide consumers to print personalized 3D models of the products they want by changing design parameters (Sun et al. 2022). 3D printing is a hard technology which is used to manufacture three-dimensional objects based on the digitally controlled deposition of successive layers of material until a final object is produced (Feng et al., 2022).

3D printing or additive manufacturing has developed in recent years and has become low-cost and easily accessible and usable as a desktop compared to when it first appeared. The potential to create new forms, enable mass customization, and support low-volume, distributed production has made 3D printing or additive manufacturing seen as a disruptive technology that will revolutionize design and fabrication (Corsini et al, 2022).

The advantage of 3D printing in terms of energy efficiency is that less energy is needed in the printing process and also resource efficiency is the reduction of waste as a result of production, the need for more pleasant raw materials, high deficit prediction ability (Feng et al., 2022). Apart from the electrical energy produced from fossil fuels for printing, electrical energy produced from renewable energy sources may also be sufficient. The consumer is also the producer of the product and can easily print with the electrical

energy produced from renewable sources at home. Contrary to machining, with 3D printing technology or additive manufacturing, a clean production is ensured because very little waste is generated. In addition to these, making designs via computer minimizes the margin of error arising from the design (Toğay and Sağıroğlu, 2019).

In traditional production, spare parts are stored in anticipation of need. On the other hand, spare parts are produced as needed in additive manufacturing. The use of 3D printing reduces or eliminates uncertainty in demand. 3D printing allows companies to print parts for devices that are no longer manufactured. Thus, devices and machines that cannot be used due to lack of spare parts are continued to be used instead of scrapped. According to a research, a family using one 3D printer to print only 20 domestic products per year (about 0.02% of the products available) can expect to save between \$300 and \$2000. This means that a simple 3D printer is an economically attracting enterprise for the average US household already (Wittbrodt et al., 2013).

Currently, the costs of 3D printers for printing fully functional products from materials such as steel, ceramic, glass etc are not cost efficient for ordinary families. The technology is expected to lower the costs to be affordable by them.

2.2 Supply Chain

Supply chain is an integrated process in which raw materials are converted into final products and distributed to customers, as well as being very relevant to supplier management, which deals with materials and production management, facility planning, customer service, transportation and physical distribution, and information flow. Manufacturers, distributors, wholesalers and retailers are also actively involved in this process. Analyzes and designs are made for recycling, remanufacturing and reuse, which includes reverse logistics and aims at product recovery in a multi-factor, multi-stop supply chain that starts with the source of supply and ends at the point of consumption (Shree et al., 2019).

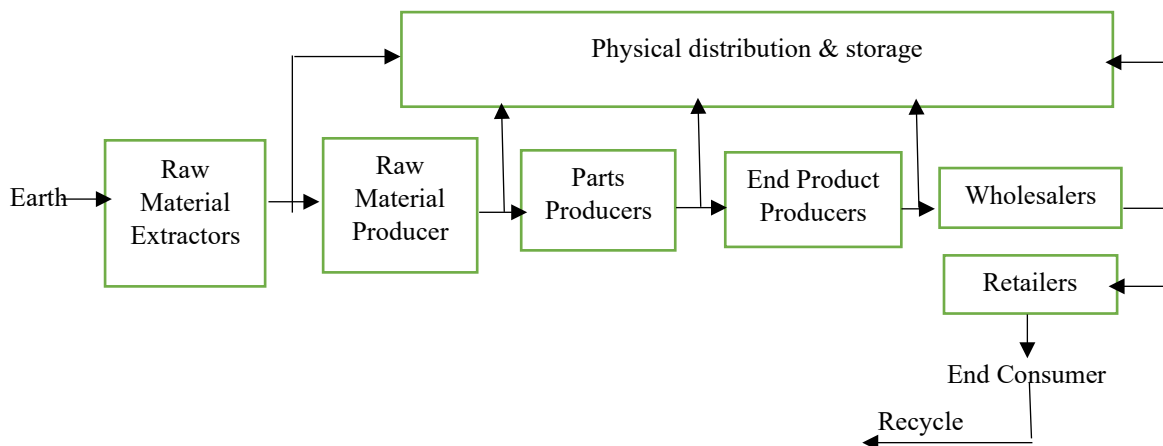


Figure 1. Events and participants in the supply chain (Source: Adapted from Yılmaz, 2003)

Figure 1 shows the events and participants in the supply chain. The process starts with the acquisition of raw materials and minerals and progresses to manufacturers, wholesalers, retailers and end users. Supply chain management also includes recycling or reuse of products or materials. Supply chain management involves procedures such as planning, product design and development, resource planning, fabrication, installation, transportation, storage, delivery and finally distributed customer support. In an integrated supply chain, instead of manufacturers pushing the product towards end users, end customers pull stock.

The role of supply chain management and processes in environmental pollution is undeniable (Fang and Zhang, 2018). The use of fossil fuels from logistics activities causes greenhouse gas emissions. Warehouses are needed for raw material stocks. Electrical energy is needed for lighting, heating and cooling of these warehouses. The supply of electricity from fossil fuels is one of the factors that pollute the environment and deepen the climate crisis.

2.3. Mass Customization

Today, the customer has realized the importance of his own wishes and has started to oppose the impositions. Customers no longer object to the color, they also specify the features they do not want and inform the manufacturer of their own needs and take part in the

design of the product. Many industries such as automobile, computer, construction, machinery industry have begun to transform their production and management styles from mass production to mass customized production in order to provide changes and innovations in technology, product diversity and flexibility.

Table.1: Comparison of mass production and mass customization

Properties	Mass Production	Mass Customization
<i>Focal Point</i>	Efficient fabrication	Diversity and customization
<i>Purpose</i>	Easiness and control	Resilience and quick response
<i>Object</i>	Market share	Customer share
<i>Aim</i>	As a result of the design, manufacturing and delivery stages of the products, customers should be able to reach affordable products.	As a result of the design, manufacturing and delivery stages of the products, customers should have access to individualized and affordable products.
<i>Decision Maker</i>	Producer	Customer and producer
<i>Basis of Manufacturing</i>	Forecasting demand	Demands created by customer orders
<i>Property of Demand</i>	Unfluctuating demand	Fluctuating demand
<i>Properties of Market</i>	Large, homogenous market	Heterogeneous niche market
<i>Product Development Process</i>	Long	Short
<i>Product Life Cycle</i>	Long	Short
<i>Amount of Production</i>	High amount of production per orders	Low amount of production per orders
<i>Choices of Product</i>	Consumers can choose from limited options	Consumers can choose between a lot of options
<i>Variety & Production</i>	Limited level of production	Flexible production for product variety
<i>Stock Management</i>	Stock must be kept in every level of supply chain	There is no need to keep stock of finished products as sales occur before production.
<i>Limitation of Production</i>	Production to the stock	Production to the order
<i>Quotation</i>	Based on returned items, stocking cost and price reductions	The purposes based on mass production are not taken into account
<i>Production</i>	Continuous manufacturing	Grouped and clustered manufacturing
<i>Advance</i>	A large community is targeted	A small community is targeted
<i>Agility</i>	Slow	Fast
<i>Investigated Properties</i>	Mass production	Mass customization
<i>Reducing the Cost</i>	Economies of scale	Economies of scope
<i>Cash Flow</i>	Inflexible due to intermediate stocks held in the supply chain process	Part or all of the payment has been taken because the product is sold before the production process
<i>Logistic</i>	Group orders that are similar	Group customized products based on customer order

Source: Adapted from Efendioğlu et al., 2016.

In Table 1, the comparison of mass production and mass customization can be seen as main features of production and supply chain management. The primary goal of mass production is to produce standard products at prices that anyone can buy. The main purpose of mass customization is to produce a sufficient variety of products and services so that customers can purchase exactly the products and services they want at affordable prices. Low costs in mass production are primarily achieved through economies of scale. Cost advantage in economies of scale is achieved by creating capacities large enough to produce a single product or service and minimizing the fixed costs per unit by producing large masses with the effective use of these capacities. Low costs in mass individualized production are provided by economy of scope. In scope economy, the aim is to produce a wide variety of products and services cheaper and faster with a single process.

3. 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR MASS CUSTOMIZATION

3D printing leads to a paradigm shift in production by providing remarkable improvements in many performance criteria related to mass production. These criteria can be listed as fuel saving, energy saving, product development time, reduction in costs, increased durability, easier production of complex designs much cheaper and production of impossible objects with other manufacturing techniques and machines (Jordan, 2019). The fact that it can easily produce designs with complex geometry by making mass customization and distributed production possible, has led 3D printing being accepted as a revolutionary technology (Corsini et al., 2020). Mass customization is a new manufacturing paradigm that stabilizes the efficiency and customization capability of mass production. Alongside of traditional production, 3D printing decreases the need for tools and thus enables unfluctuating production that can transform 3D data directly into physical parts using digital production processes, considerably reducing customization costs and saving lead time. Complex geometry structures can be designed and produced with the desired materials by 3D printing or additive manufacturing (Sun et al. 2022).

There are also significant differences in the manufacturing processes enabled by the wide variety of 3D printing technologies available on the market. 3D printing machines range from desktop printers that can produce low-quality plastic components and cost a few hundred dollars, to industrial machines that can produce high-quality products from a variety of materials such as metal, plastic, ceramics, and cost hundreds of thousands of dollars (Ryan et al., 2017).

3D printing, which is a production technology suitable for mass customization versus mass production, has the characteristics of producing small quantities economically by pulling production from a global scale to a local scale, producing according to the individualized demands of customers and producing less waste. Low-cost, highly customized products, faster prototype development times, lower inventory holding costs, and highly flexible manufacturing facilities are the advantages of 3D printing versus the economies of scale that mass production provides (Berman, 2020).

3D printing provides various advantages to users. These advantages can be listed as time efficiency, keeping less inventory, reduction in production costs according to the zero waste policy and waste reduction, product personalization, feasibility of small production batches, reduced delivery times, flexibility in design, more effective use of creativity in the production phase, use of more color options (Ukobitz & Faullant, 2021). What is more, 3D printing provides many advantages over the current production model. Local production reduces the need for warehouses and lowers inventory costs. The speed of delivery to the customer increases. The need for large transport stocks is eliminated. Thanks to low stock holding costs, high production volumes are not required, where mass production provides price advantage in order to balance high stock costs. Complex parts such as gears can be produced without molding and cutting operations. No assembly is required as the number of component parts is also reduced. The production process, which takes weeks with the current production model, is replaced by days and hours. In the model of production from a single center and distribution to the local, the use of fuel from logistics causes a carbon footprint. With local production, a reduction in carbon footprint is achieved. Because 3D printing provides manufacturing flexibility, there is no need to stockpile large stocks or make significant discounts due to uncertainty in forecasting demand. In subtractive production, production is made by subtraction from the main material, while in additive manufacturing, production is made without loss of material. This results in less scrap and less assembly work is required. This provides a positive reduction in the carbon footprint of companies.

4. 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR SUPPLY CHAIN

3D printing technology reduces the complexity of the supply chain. With this technology, production can be made as soon as the need arises. Thus, besides reducing

the sub-steps that make up the production process, the amount of stock held also decreases (Mohr and Khan, 2015).

Table 2. Impact of 3D printing on supply chain network, governance, operation and output.

Sample	1. Centralised manufacturing at a local production site	2. Fixed manufacturing plant at implementing company	3. Mobile manufacturing plant at implementing company	4. Distributed manufacturing at local production sites
Network	Reducing the number of upstream tiers by eliminating the need for storage	Elimination of international and local suppliers, resulting in a reduction in the number of upstream layers	Elimination of international and local suppliers, resulting in a reduction in the number of upstream layers	Reducing international suppliers in the upstream layers and the creation of the upstream layers with local suppliers.
	Production takes place in a single center in the country and final outputs are carried to multiple distribution channels.	Direct distribution of final outputs to consumers with on-site production.	The mobile production facility goes to the production area. Direct distribution of final outputs to end users is ensured.	Distributed production is done with more than one producer in local production centers in the country.
	It is produced locally. Materials and tools are imported instead of the final product.	It is produced locally. Materials and tools are imported instead of the final product.	It is produced locally. Materials and tools are imported instead of the final product.	Finished products are sent to the end user.
	Design is distributed (international).	Design is distributed (international).	Design is localised	Manufacturing with 3D printers
Governance	There is cooperation between the design and production team	There is cooperation between the design and production team	Direct design and manufacturing.	Distributed supply chain.
	In the supply chain processes, information is shared through digital communication.	There is upstream information sharing between manufacturers in the supply and production of materials such as 3D printers and filaments.	There is improved information sharing downstream.	There is cooperation between the design and production team
		Information sharing between consumers and manufacturers	Reduced number of actors in supply chain.	Information sharing across supply chain simplified by digital communications.
Operation	Team work	Team work	User-centered	Participatory
	Increased circularity	User-centered	Enhanced circularity	Resilient
Output	On demand	Mass customisation	Customisation	Low cost
Example	Spare or repair parts	Prosthetics	Spare or repair parts	Prosthetics

Source: Adapted from Corsini et al., 2020.

In table 2, four supply chain archetypes transformed by 3D printing technology are examined through network, governance, operation and output criteria. In the network criterion, supply chain links have been created according to the location and geographical feature of the place where the production is made. In the

governance criterion, supply chain analysis was made in the context of information sharing, relations and ownership in the design and production processes. In the process criterion, supply chain connections were examined through value-added and non-value-added activities. In the product criterion, supply chain relations have been emphasized through factors such as diversity, complexity and cost of products.

What is more, in the machining method based on extraction techniques, the final product is produced by cutting and drilling the main material. A significant loss of material and waste occur in this production process. Since the material used for production with 3D printing technology is added layer by layer, only the necessary material is used to produce the final product and there is almost no waste. Since the design of the product can be kept digitally in the computer environment, the design can be sent to the customer's location via the internet. Thus, time is saved, energy and fuel costs arising from transportation and carbon emissions caused by the fuel used in transportation are eliminated (Pirjan and Petroșanu, 2013). 3D printing has a significant place in supply chain management due to its advantages such as minimum production time, cost reduction, less waste of raw materials, quality improvements and product design according to customer requests. With 3D printing, a consumer can have the final product at home or workspace by downloading and printing the design. In addition, a supplier can easily have highly complex and customized products using 3D printing (Shree et al., 2019).

The effects of 3D printing technology on supply chains include reductions in lead times and transportation costs, less inventory holding, product quality and reliability, production flexibility, productivity, economies of scale, which is an important competitive advantage of mass production. What is more this technology makes them affordable for local and small businesses, supply chains sustainability, new business models and opportunities for new suppliers (Ryan et al., 2017). 3D printing enables digitalization and localization in supply chains, reducing energy use and resource demands throughout the production phase of a product (Shree et al., 2019).

5. THE CONNECTION BETWEEN MASS CUSTOMIZATION, 3D PRINTING TECHNOLOGY AND SUPPLY CHAIN

Material development has an important role in the spread of the use of 3D printing technology. 3D printing machines, which will be used in production, will need logistics once they are moved to their places,

and the designs will be communicated to the users over the internet, and the users might start production at their location and have the finished product. In this process, there will be no logistics of finished products and thus the need for transportation fuel will decrease considerably. The most important item that will be needed for logistics here is the raw materials and materials to be used in production. Energy use and greenhouse gas emissions will decrease due to use of logistics style. There will be less logistics activities as the consumer can produce the products locally. However, since the production and distribution model in a single center will change, the amount of stock held will also decrease, and thus, a decrease in inventory costs will be observed. Since the products will flow directly from the producer to the customer and sometimes will be produced directly by customers, the retailers and intermediaries between the producer and the end consumer will disappear, and thus inventory and logistics activities will be reduced, and undesirable situations such as deterioration and breakage due to transportation will be eliminated (Silva and Rezende, 2013).

Localized and direct production formats are made possible with 3D printing. Therefore, it is predicted that it will have a notable effect on supply chains. These effects can be listed as shortening the supply chain, reducing complexity and increasing resource efficiency. In addition to these effects, 3D printing will enable rapid response to unforeseen events under significant resource constraints (Corsini et al, 2022).

One of the main advantages of 3D printing is that it supports product customization, which allows the consumer to actively participate in the design of the product according to their wishes and needs before production. Customer involvement can occur at different stages of the product manufacturing process and is defined as the point of order penetration (OPP) in supply chain management. OPPs, defined as the freezing point of product specifications, can influence the structure of customization in line with various supply chain managements. Six different OPPs and their associated supply chain structures are described (Figure 2). Through these six different points, the consumer can be included in the supply chain. Accordingly, customization covers circumstances from ship-to-stock (STS) where the finished product is reserved to the final distribution point, and engineering-to-order (ETO) where full customization takes place from the beginning of design and production (Ryan et al., 2017).

In mass production, manufacturers face transportation and stock-keeping costs, and by balancing these costs with the advantage of economies of scale and low labor

costs that express high production volume, they provide price competition against local and small producers. With 3D printing, also known as additive manufacturing, processes such as molding, turning and cutting in subtractive manufacturing processes are not required and the costs caused by these processes are eliminated. There is no finished product production for stock, production is made according to the customer's order, thus reducing the risks and inventory holding costs associated with the finished and unsold product. Since design and production can be separated, transportation and storage costs are reduced and local production is also possible. Since products with complex geometries can be produced in one go, there is no assembly process and no labor cost arising from this process (Berman, 2020).

personal and manufacturing type is craft. Production distribution of buy-to-order penetration point is local and manufacturing type is job shop. Production distribution of make-to-order penetration point is regional and manufacturing type is factory. According to engineer-to-order penetration point, the design is made specifically for each customer, outputs can be produced at home easily and as craft manufacturing type small-scale products can be generated on desktop printers. According to make-to-order penetration point, available designs of spare parts are produced when required and printed near to the center of request. Low volumes are produced by using specialized equipment. The technology of 3DP provides craft operations at much lower costs and at much lower volumes of products since the 3DP is run by the end user of the output (Ryan et al., 2017).

According to the literature review, production distribution of engineer-to-order penetration point is

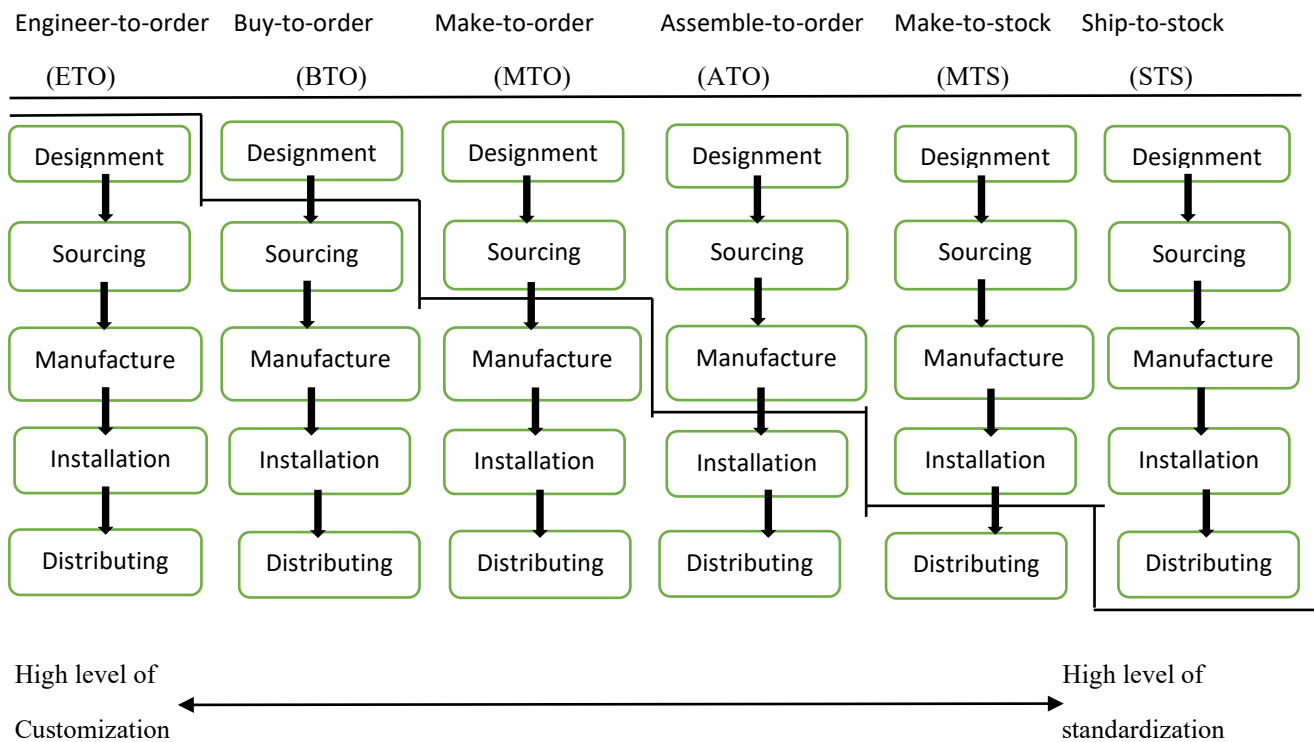


Figure 2. Six different OPP possibilities and their associated supply chain structured (Source: Adapted from Ryan et al. 2017)

Instead of overproducing for stock, 3D printing enables customized products to be produced according to customer requests and needs, thus reducing the unsold product inventory waiting in stock. In addition, the features of the design can be easily downloaded in the computer environment, access to the design features is both easy and fast. 3D printing also transforms the supply chain by changing the way products are designed, developed and distributed. Technological development in 3D printers for higher speed and the

ability to use different materials are two important factors in the spread of 3D printing (Berman, 2020).

Thanks to individualized production, supply chains are shortened, planning accuracy is ensured, and thus inventory and scrap rates resulting from unsold final or intermediate products are reduced, out-of-stocks are eliminated because production is tailored to customer demands. In addition to all these, the return on investment in additive manufacturing equipment and materials is very fast because production becomes

flexible with the same equipment and materials, and many different productions can be made with the same equipment. For preparing equipment and materials for production, additive manufacturing is more flexible than subtractive manufacturing methods such as machining, and thus production setup times are much less (Jordan, 2019).

With this technology, which leads to disruptive innovations, products can be customized in line with the expectations and demands of the customers. However, it has significant opportunities on the transformation of logistics and supply chains by reducing the inventory and transportation costs of industries.

Complex geometry structures can be designed and produced with the desired materials by 3D printing or additive manufacturing. With this technology, which leads to disruptive innovations, products can be customized in line with the expectations and wishes of the customers. However, it has significant opportunities on the transformation of logistics and supply chains by reducing the inventory and transportation costs of industries (Shree et al., 2019).

6. IMPLEMENTATION FOR POLICY AND PRACTICE

Using existing plastics as filaments instead of creating filaments for 3D printers from scratch will be an ecological practice within the scope of waste management. At this point, municipalities have important responsibilities in collecting plastic waste and recycling these wastes at the local level. Filament suppliers and municipalities should work together. Establishing distributed recycling centers instead of a single recycling center will also reduce logistics costs. Logistics costs should also be taken into account in transporting locally collected waste to recycling centers and transporting it to suppliers as an additive to be reused.

Although the demand for 3D printers is increasing day by day, many people are not aware of this technology. Comments that 3D printers are difficult to use also have negative effects on those who are curious about this technology. 3D printer manufacturers and vendors can develop joint projects with schools for the dissemination and awareness of this technology. The attention of children and young people can be attracted by producing the product they design and want.

Inability to reach raw materials with quality is one of the problems encountered in 3D printing technology. 3D printing technology is very suitable for local and distributed production in line with the production model. Access to local materials should also be possible in this direction. All actors can come together and interact, easily solve existing problems, and contribute

to each other in product and process development, with the online market that brings together local producers, customers and material suppliers (Garmulewicz et al. 2018).

3D printing technology has a significant impact on creating local entrepreneurial ecosystems and supporting local economic development (Beltagui et al. 2020). It is a positive production technology for small and domestic producers that it can be used easily in any environment, is capable of meeting the needs of many sectors, and produces according to the special needs and designs of the person. At this stage, companies that produce and sell 3D printing technology should cooperate with local users and share information. In order to create new entrepreneurship and innovation models, local governments such as manufacturers, users, as well as municipalities should be a part of information sharing.

Bringing the factory to the living room of the consumer, 3D printing technology brings many legal and ethical problems for policy makers, technology manufacturers and consumers who use this technology individually. The first of these is how to establish and ensure quality standards. Whether the use of designs found in digital environments constitutes an intellectual property violation is another issue. There are also factors that can threaten human health. Establishing standards in sectors such as pharmaceuticals and food, and how to ensure and follow-up that individual consumers comply with ethical rules in production are among the most important problems (Kietzmann et al. 2015). Academics, technology manufacturers, lawyers, and perhaps officials from the ministries of trade and technology should work together on these ethical and legal issues.

7. CONCLUSION

Today's production and consumption patterns are the most important main causes of the climate crisis, one of the world's problems. This problem facing humanity leads to various environmental, political, social and economic problems (Gündoğan and Çetiner, 2014). With the paradigm shift of mass manufacturing around which production policies are shaped by continuous growth, continuous employment discourses, it has begun to leave its place to disruptive technologies. Disruptive technologies, including 3D printers, will be able to improve processes, performance and cost efficiency by eliminating intermediaries, simplifying existing supply chains and enabling on-demand production (Ukobitz and Faullant, 2021).

When more environmentally friendly, that is, greener, methods are applied in supply chain management, environmental problems arising from production

processes may decrease significantly. The use of nature-friendly raw materials and materials in the design and production of products can eliminate the environmental problems that products will cause throughout their life cycle. Instead of the production model for stocking from a single center, it should be aimed to distribute the production locally. Thus, the stock levels of the companies will decrease, the product quality will increase, the delivery times will decrease as the finished product does not come out of a single center and the products are not delayed and damaged during visits to intermediaries (Fang and Zhang, 2018).

With 3D printing, which is a production technology suitable for mass customization, the economic model dominated by mass production is pulled from the global scale to the local scale, leaving it to mass individualization where production is made in smaller quantities, which can respond to customer demands and has the ability to produce less waste, instead of the economy of scale where mass production is advantageous.

The ability of 3D printing technology to produce locally and directly without the need for intermediaries is thought to change and transform supply chains. It is foreseen to shorten supply chains, reduce complexity from production and logistics, and increase resource efficiency (Corsini et al., 2020). The destructive and transformative power of 3D printing technology on the global economy and business models is important to be emphasized. The ability to produce the product at the customer's home outside the factory environment or to produce products at distributed production locations without being tied to a single production location can increase the competitiveness of local and small businesses, reduce economic imbalances, and reduce fuel use and carbon emissions from transportation (Pirjan and Petroşanu, 2013).

The following suggestions can be mentioned for the use of 3D printer technology by many people. Studies should be carried out on the optimization of materials such as wood and sawdust with renewable properties, which are used as filament raw materials in 3D printers. However, there is a need for studies on plant-based filaments.

The inability to achieve the desired quality in the products printed with 3D printers is a weak point of this technology that needs to be developed. Durability is also lacking in providing the desired condition in 3D produced parts. Studies should be carried out to improve quality and durability criteria. In response to these two weak points, the customization of production saves time and costs by eliminating unnecessary production processes. As elements such as quality and

durability are improved with studies, 3D printers will become very attractive to users.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Marmara University Scientific Research Coordination Unit (BAPKO) with FEN-C-DRP-120417-0180 Project number.

REFERENCES

- [1] Bayraktaroglu, G. and Atrek, B. (2010). Testing the superiority and dimensionality of SERVQUAL vs. SERVPERF in higher education, *The Quality Management Journal*, 17(1), 47-59.
- [2] Beltagui, A., Rosli, A., Candi, A., (2020). Exaptation in a digital innovation ecosystem: The disruptive impacts of 3D printing. *Research Policy* 49, 103833
- [3] Berman, B., (2020). Managing the disruptive effects of 3D printing. *Rutgers Business Review* Vol. 5, No. 3.
- [4] Cengiz, Ö., Aktepe, Ş., (2022). Üç boyutlu (3D) yazıcılarda sürdürülebilir malzeme olarak ahşap ve proses atıklarının kullanım potansiyelinin değerlendirilmesi. *European Journal of Science and Technology*, 38, 143-150.
- [5] Corsini, L., Aranda-Jan, C.B., Moultrie, J., (2020). The impact of 3D printing on the humanitarian supply chain. *Production Planning & Control*, 33:6-7, p. 692-704, DOI: 10.1080/09537287.2020.1834130
- [6] Çetiner, B.G., Gündoğan, M. (2014). Defying planned obsolescence: Paradigm change for macro level sustainability of supply chain management systems, *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, 809-814
- [7] Efendioğlu, D., Bayram, G., & Çetiner, B.G. (2016). The impact of miscellaneous industrial areas to Turkey's growth rate point of paradigms of mass production and mass customization. *Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- [8] Fang, C., Zhang, J., (2018). Performance of green supply chain management: A systematic review and meta analysis. *Journal of Cleaner Production* 183, 1064-1081.
- [9] Feng, Y., Lai, K., Zhu, Q., (2022). Green supply chain innovation: Emergence, adoption, and challenges. *Int. J. Production Economics* 248, 108497
- [10] Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuls, H., Yang, A., (2018). Disruptive technology as an enabler of the circular economy: What potential does 3D printing hold? *California Management Review*, Vol. 60(3), 112-132
- [11] Gaub, H. (2015). Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. *Reinforced Plastics*.
- [12] Gündoğan, M., Çetiner, B.G., (2014). Debt based monetary system. *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, 2315-2323
- [13] Jordan, J.M., (2019). Additive manufacturing ("3D printing") and the future of organizational design: some early notes from the field. *Journal of*

- Organization Design*, 8:5
<https://doi.org/10.1186/s41469-019-0044-y>
- [14] Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P., (2015). Disruptions, decisions, and destinations: Enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. *Business Horizons*, 58, 209-215
- [15] Majumdar, D., Banerji, P.K., Chakrabarti, S., (2018). Disruptive technology and disruptive innovation: ignore at your peril! *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol.30, No:11, 1247-1255
<https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1523384>
- [16] Melchels, F.P.W., Domingos, M.A.N., Klein, T.J., Malda, J., Bartolo, P.J., Huttmacher, D.W., (2014). Additive manufacturing of tissues and organs. *Progress in Polymer Science*, Volume 37, 1079-1104
- [17] Mohr, S., Khan, O., (2015). 3D printing and its disruptive impacts on supply chains of the future. *Technology Innovation Management Review*, Vol. 5, 11.
- [18] Panwisawas, C., Tang, Y.T., Reed, R.C., (2020). Metal 3D printing as a disruptive technology for superalloys. *Nature Communications*, 11:2327
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-16188-7>
- [19] Pirjan, A., Petroşanu, D., M., (2013). The impact of 3D printing technology on the society and economy. *Journal of Information Systems & Operations Management*. 360-370.
- [20] Ryan, M.J., Eysers, D.R., Potter, A.T., Purvis, L., Gosling, J., (2017). 3D printing the future: scenarios for supply chains reviewed. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* Vol. 47 No. 10, 2017 pp. 992-1014 Emerald Publishing Limited 0960-0035 DOI 10.1108/IJPDLM-12-2016-0359
- [21] Shree, M.V., Dhinakaran, V., Rajkumar, V., Bupathi Ram, P.M., Vijayakumar, M.D., Sathish, T., (2019). Effect of 3D printing on supply chain management. *Materials Today Proceedings* 21 958–963
- [22] Silva, J.V.L., Rezende, R.A., (2013). Additive manufacturing and its future impact in logistics. *6th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics The International Federation of Automatic Control* September 11-13. Fortaleza, Brazil
- [23] Sun, H., Zheng, H., Sun, X., Li, W., (2022). Customized investment decisions for new and remanufactured products supply chain based on 3D printing technology. *Sustainability*, 14, 2502.
<https://doi.org/10.3390/su14052502>
- [24] TMMOB Kimya Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Plastik ve Kauçuk Komisyonu, (2021). *Türkiye’de Plastik Geri Dönüşümü ve Atık İthalatı Raporu*.
- [25] Toğay, A., Sağıroğlu, Ö., (2019). 3 boyutlu baskı teknolojilerinin mimarlık ve inşaat alanında kullanımında mevcut durum değerlendirmesi. *4th International Congress on 3D Printing (Additive Manufacturing) Technology and Digital Industry*.
- [26] Ukobitz, D., Faullant, R., (2021). Leveraging 3D printing technologies: The case of Mexico’s footwear industry. *Research-Technology Management*, 64:2, 20-30, DOI: 10.1080/08956308.2021.1864919.
- [27] Yılmaz, D., (2003). Tedarik zinciri yönetiminde eniyileme yaklaşımları ve uygulamaları. (Publication No: 139930) [Doctoral dissertation, Uludağ University]. YOK Thesis Center.

Dark Energy from the Scalar Field and Gauss-Bonnet Interactions

Dilek ÇİFTÇİ KAZICI¹ 

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi (TNKU), Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Tekirdağ, Türkiye

Abstract

In this work, we study a homogeneous and isotropic cosmological model of the universe filled with the perfect fluid and scalar field. Using the framework of Brans-Dicke (BD) and Gauss-Bonnet (GB) theories of gravity, we obtain the field equations and find the expansion parameter and dynamical field functions. We suppose that an energy interaction occurs between the BD and GB components, then adopting this argument, we speculate that the BD scalar field may arise from the intrinsic properties of the GB medium. Also, we get the positive energy density and negative pressure for the baryonic part of matter, so we confirm that this property coincides with the dark energy behavior of the late time universe. We conclude that since some sort of interaction between the scalar field and GB sector provides the accelerating expansion of the universe, to recover the dark energy effect, we may no longer need a cosmological constant.

Keywords: Brans-Dicke theory, Gauss-Bonnet theory, cosmology, scalar field theory

Öz

Bu çalışmada, mükemmel akışkan ve skaler alan ile dolu homojen ve izotropik kozmolojik evren modeli incenmiştir. Brans-Dicke (BD) ve Gauss-Bonnet (GB) kütleçekim teorileri birlikte kullanılarak, alan denklemleri çözülmüş, evrenin genişleme parametresi ve dinamik alan fonksiyonları elde edilmiştir. BD ve GB bileşenleri arasında bir tür enerji etkileşimi olabileceği varsayılarak, BD skaler alanının, GB ortamının içsel özelliklerinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Baryonik madde yapısının, pozitif enerji yoğunluğu ve negatif basınca sahip olduğu elde edilmiş ve böylece bu sonucun geç evren dönemi için karanlık enerji davranışıyla uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Skaler alan ve GB sektörü arasındaki bu enerji etkileşiminin evrenin hızlanarak genişlemesini sağladığı ve böylece karanlık enerji etkisi için artık kozmolojik sabite ihtiyacımız olmayabileceği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Brans-Dicke teorisi, Gauss-Bonnet teorisi, kozmoloji, skaler alan teorisi

I. INTRODUCTION

From the observations, we know that the universe is expanding with acceleration [1,2]. On the other hand, we don't have a sufficient theoretical and observational explanation for the origin of this expansion yet. The hypothetical reasoning for this acceleration is named dark energy and is considered as a new kind of dynamical fluid or field and has the following characteristics: it spreads across all of space, emits the strong negative pressure, and pushes opposite that of the matter and normal energy. We need to search the dark energy candidates, understand the property of space, obtain a new dynamic fluid, or a new theory of gravity. Einstein's theory of gravity says that all the forms of matter and energy affect the fabric of space-time and may govern how it evolves in time. Although Einstein's general theory of relativity is highly successful, there are some experimental and observational deviations of gravity from Einstein's theory in cosmology [3]. Searching for an alternative model, especially to explain the late-time acceleration of the universe and dark energy, becomes a fundamental problem for theoretical physicists. Brans-Dicke theory is one of the modified gravity model alternatives to Einstein's General Relativity in which Newton's Gravitation constant is not a constant but is characterized by a scalar field [4]. Moreover, the Gauss-Bonnet theory of gravity is a string motivated model [5,6,7] and used to describe the universe during the primordial period and known to explain the inflationary era [8,9,10,11]. The Gauss-Bonnet term includes the higher order derivative curvature corrections and is usually used in higher dimensional string theories since the topologically invariant GB term has no contribution to the Einstein field equations in four dimensions. In accordance with this information, the works

[12,13,14,15,16,17,18] study the modified Brans-Dicke scalar tensor theory in the presence of Gauss-Bonnet curvature corrections and explore the present

cosmological features of a four dimensional homogeneous and isotropic universe.

II. MATERIAL AND METHOD

In this work, we show that modified Brans-Dicke-Gauss-Bonnet (BD-GB) gravity may play the role of a gravitational alternative for dark energy (DE). We think that, the unknown forms of matter and their behaviors could be modeled both by BD scalar field and GB stringy correction terms, hence, this assumption may predict a late-time accelerated expansion and may clarify the evolution of the universe. Therefore, we consider a minimally coupled BD-GB theory and the Brans-Dicke action with a scalar field coupled Gauss-Bonnet term can be described by the following gravitational action,

$$S_{BD} = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{\phi R}{2} - \frac{\omega}{2\phi} g^{ab} \nabla_a \phi \nabla_b \phi - f(\phi) GB + L_m \right], \quad (1)$$

where R is the Ricci scalar, ϕ is the Brans-Dicke scalar field, ω is the Brans-Dicke coupling constant, GB is Gauss-Bonnet invariant term and $f(\phi)$ is the Gauss-Bonnet coupling scalar function which may be responsible for the of dark energy, L_m describes the ordinary matter Lagrangian [19]. The Gauss-Bonnet invariant is defined as,

$$GB = R^2 - 4R_{ab}R^{ab} + R_{abcd}R^{abcd}, \quad (2)$$

with R_{ab} and R_{abcd} represent the Ricci and Riemann tensor.

Applying the variation principle with respect to the metric tensor and the scalar field, we get the field equations of gravity and the continuity equation of the scalar field. The variation with respect to g^{ab} gives,

$$\begin{aligned} & -\frac{\phi G_{ab}}{2} + \frac{\omega}{2\phi} \left(\nabla_a \phi \nabla_b \phi - \frac{1}{2} g_{ab} \nabla_c \phi \nabla^c \phi \right) \\ & + \frac{1}{2} (\nabla_a \nabla_b \phi - g_{ab} \square \phi) - 2(\nabla_a \nabla_b f) R \\ & + 2g_{ab}(\square f) R + 4(\nabla^c \nabla_a f) R_{bc} + 4(\nabla^c \nabla_b f) R_{ac} \\ & - 4(\square f) R_{ab} - 4g_{ab}(\nabla^c \nabla^d f) R_{cd} + 4(\nabla^c \nabla^d f) R_{abcd} \\ & + 8\pi T_{ab}^{(m)} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

where $T_{ab}^{(m)}$ is the energy-momentum tensor of ordinary matter and $G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2} g_{ab} R$ is the Einstein tensor. The variation with respect to ϕ becomes,

$$\frac{R}{2} - \frac{\omega}{2\phi^2} g^{ab} \nabla_a \phi \nabla_b \phi + \frac{\omega}{\phi} \nabla_c \nabla^c \phi - \frac{df}{d\phi} G = 0, \quad (4)$$

where ∇_a is the covariant derivative operator and $\square \equiv g^{ab} \nabla_a \nabla_b$ is the d'Alembertian operator. The usual BD scalar field equations together with GB correction can

be obtained by taking trace of (3) and incorporating into (4), but we prefer using (3) in this work.

Since equation (3) contains different contents of matter and energy, we can express each ingredient separately. Hence, the contributions from the BD scalar field can be written as (the first line of the (3))

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{ab}^{(\phi)} &= -\frac{\phi G_{ab}}{2} + \frac{\omega}{2\phi} \left(\nabla_a \phi \nabla_b \phi - \frac{1}{2} g_{ab} \nabla_c \phi \nabla^c \phi \right) \\ &+ \frac{1}{2} (\nabla_a \nabla_b \phi - g_{ab} \square \phi). \end{aligned} \quad (5)$$

Also, the contributions from the GB term which contains the field $f(\phi)$ in (3) can be addressed as,

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{ab}^{(GB)} &= -2(\nabla_a \nabla_b f) R + 2g_{ab}(\square f) R + 4(\nabla^c \nabla_a f) R_{bc} \\ &+ 4(\nabla^c \nabla_b f) R_{ac} - 4(\square f) R_{ab} - 4g_{ab}(\nabla^c \nabla^d f) R_{cd} \\ &+ 4(\nabla^c \nabla^d f) R_{abcd}. \end{aligned} \quad (6)$$

Hence, the equation (3) can be expressed as,

$$\mathcal{G}_{ab}^{(\phi)} + \mathcal{G}_{ab}^{(GB)} + 8\pi T_{ab}^{(m)} = 0 \quad (7)$$

We consider the flat, spatially homogeneous and isotropic cosmological geometry which represented by the Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) line element as,

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t)(dr^2 + r^2 d\Omega_{(2)}^2), \quad (8)$$

in comoving coordinates, where $d\Omega_{(2)}^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2$ is the line element on the unit 2-sphere.

The Gauss-Bonnet invariant for the metric tensor (8) becomes $GB = 24^2(\dot{H} + H^2)$ and Ricci tensor reads the $R = 6\dot{H} + 12H^2$ where H denotes Hubble's parameter defined as $H = \frac{\dot{a}}{a}$ and the "dot" represent the derivative with respect to the cosmic time t .

Our main purpose is to look for accelerating cosmological solutions of the space-time filled with the matter of perfect fluid with stress-energy tensor,

$$T_{ab}^{(m)} = (P^{(m)} + \rho^{(m)}) u_a u_b + P^{(m)} g_{ab}, \quad (9)$$

where $u_a u^a = -1$ is the fluid 4-velocity. From the field equations (3) and (4), the Friedmann, acceleration, and scalar field equations for the geometry (8) become,

$$\begin{aligned} 3H^2 &= \frac{16\pi\rho^{(m)}}{\phi} + \frac{\omega}{2\phi^2} - 3H\frac{\dot{\phi}}{\phi} + 24H^3\frac{\dot{f}}{\phi}, \\ -2\dot{H} &= \frac{16\pi}{\phi} (\rho^{(m)} + P^{(m)}) + \omega\frac{\dot{\phi}^2}{\phi^2} + \frac{\ddot{\phi}}{\phi} - H\frac{\dot{\phi}}{\phi} \end{aligned} \quad (10)$$

$$-16H\dot{H}\frac{\dot{\phi}}{\phi} - 8H^2\left(\frac{\ddot{\phi}}{\phi} - H\frac{\dot{\phi}}{\phi}\right), \tag{11}$$

$$\omega\left(\frac{\dot{\phi}}{\phi} + 3H\frac{\dot{\phi}}{\phi} - \frac{1}{2}\frac{\dot{\phi}^2}{\phi^2}\right) - \frac{R}{2} + 24\frac{df}{d\phi}H^2(\dot{H} + H^2) = 0. \tag{12}$$

We consider a barotropic fluid which relates the energy density $\rho^{(m)}$ and pressure as $P^{(m)} = (\gamma - 1)\rho^{(m)}$ (for constant γ). The energy conservation equation $\nabla_a T_{(m)}^{ab} = 0$ is satisfied for the energy density of $\rho^{(m)}(a) = \frac{\rho_0}{a^{3\gamma}}$, where ρ_0 is the non-negative integration constant which is obtained from the nonzero component of energy conservation equation, $\dot{\rho}^{(m)} + 3H(P^{(m)} + \rho^{(m)}) = 0$. Here, as we have said, the matter part of the universe is modeled with perfect fluid and assumed that there is no energy transfer with the other BD scalar field and GB components. Besides, it is clear that, scalar field will affect the dynamics of the universe via the field equations. Moreover, there could be the energy transfer between the other ingredients of space-time, hence, we suppose,

$$\begin{aligned} \nabla_a \mathcal{G}_{(\phi)}^{a0} &= -\Theta(t), \\ \nabla_a \mathcal{G}_{(GB)}^{a0} &= \Theta(t), \end{aligned} \tag{13}$$

for the nonzero component of energy conservation equation. Where $\Theta(t)$ is the interaction term between the BD scalar field and GB contents. The nature of $\Theta(t)$ is not known, and it may arise from the microscopic properties of space-time or it depends on the interaction between the scalar and GB fields. Note that if interaction term is $\Theta(t) > 0$, the energy transfers from medium $\mathcal{G}_{ab}^{(\phi)}$ to the medium $\mathcal{G}_{ab}^{(GB)}$ or vice versa [20]. It means that we can consider a cosmological model containing a scalar field that interacts with the stringy properties of space-time which might originated from the GB term. In this case, the exchange of energy between the scalar field part and GB part may offer a reasonable explanation for the observed late time acceleration of the universe.

In the next section of this paper, using the above setup, we derive the power law expressions and in the third section, we obtain the solutions for the exponential dynamical functions of the field equations. Finally, in the last section, we present a brief conclusion.

1.1. Power Law Solutions

In this part, we begin by assuming that the scale factor $a(t)$, scalar field $\phi(t)$ and the GB coupling function $f(\phi)$ are simply given by,

$$\begin{aligned} a(t) &= a_0 t^q, \\ \phi(t) &= \phi_0 t^2, \\ f(t) &= f_0 \phi^2, \end{aligned} \tag{14}$$

where q, a_0, ϕ_0 and f_0 are constants to be determined from the field equations (10) - (12). The measure of cosmic acceleration of the expansion of the universe in the power law is given by the deceleration parameter q_0 . It satisfies,

$$q_0 = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2} = -\frac{q-1}{q}, \tag{15}$$

and produces the accelerated expansion simply for $q > 1$. Using (19), if we admit the values of f_0 and ϕ_0 are bigger than zero, the transfer of energy always occurs from BD scalar field to GB sector.

Also, substituting the field functions (14) into the Friedmann equation (10) and into the acceleration equation (11), we obtain the constant $\gamma = 0$. Then, energy density and pressure for the baryonic matter become as following,

$$\rho^{(m)} = -P^{(m)} = \frac{\phi_0[3q^2(q-3)+2\omega(5q+1)]}{16\pi(q-1)} = \text{constant}, \tag{16}$$

and the BD scalar field and GB coupling field satisfy that,

$$\phi(t) = \phi_0 t^2 \quad \text{and} \quad f(t) = \frac{\phi_0(2q-1-2\omega)}{16q^2(q-1)} t^4, \tag{17}$$

where $f_0 = \frac{(2q-1-2\omega)}{16\phi_0 q^2(q-1)}$. Here, note that, we require the value $2q - 1 - 2\omega > 0$ should always satisfied for the positive value of $f(t)$.

Moreover, substituting the field functions (14) into (13), the interaction term is obtained as,

$$\begin{aligned} \nabla_a \mathcal{G}_{(\phi)}^{a0} &= \frac{3\phi}{2} \left[-\dot{H}\frac{\dot{\phi}}{\phi} + \omega\frac{\dot{\phi}}{\phi} \left(H\frac{\dot{\phi}}{\phi} - \frac{1}{6}\frac{\dot{\phi}^2}{\phi^2} + \frac{1}{3}\frac{\ddot{\phi}}{\phi} \right) \right] = -\Theta_0 t^{-1}, \\ \nabla_a \mathcal{G}_{(GB)}^{a0} &= 12\dot{f}H^2(\dot{H} + H^2) = \Theta_0 t^{-1}, \end{aligned} \tag{18}$$

where the constant Θ_0 satisfies

$$\Theta_0 = 3q\phi_0(2q - 1 - 2\omega), \tag{19}$$

here, the value of positive $2q - 1 - 2\omega > 0$ also required for the appropriate direction of energy transfer in (18), otherwise, the interaction will be in the opposite direction and hence f_0 reads negative value. It can easily seen that two equations in (18) have the opposite sign, hence the total energy is conserved in this theory. Also, the interaction term is not a constant but changes in time by the factor t^{-1} .

Here, the transfer of energy from the BD scalar field to the GB stringy sector yields the universe a dark energy dominated era, therefore, this scenario may describe the late-time dynamics of the accelerated expansion. If we consider the stress-energy tensor of GB contribution as a perfect fluid type of matter, using (6), energy density and pressure of this component satisfy the following relations,

$$\rho^{(GB)} = 12H^3 f(t) = \frac{3q\phi_0(2q-1-2\omega)}{(q-1)} = \text{constant},$$

$$P^{(GB)} = -4H[2\dot{f}(H+H^2) + H\ddot{f}] = -\frac{(2q+1)}{3q}\rho^{(GB)}, \quad (20)$$

here, it is worthwhile to express that the GB dark sector also satisfies the positive energy condition since the numerator has the positive value, and both energy density and pressure remain constant while the universe is expanding. In this type of interaction, we choose the scalar field as $\phi(t) = \phi_0 t^2$ and the equation of state (EoS) (16) for baryonic fluid becomes $P^{(m)} = -\rho^{(m)}$ that implies the vacuum energy dominance or so-called dark energy behavior according to Λ Cold Dark Matter model (Λ CDM) [21]. On the other hand, EoS (20) for the GB content, gives $P^{(GB)} = -\frac{(2q+1)}{3q}\rho^{(GB)}$. This rate corresponds to the value $-1 < -\frac{(2q+1)}{3q} < -\frac{1}{3}$ and behaves as an effective quintessence era since the value of q is always bigger than one as we mentioned before [6]. Unknown properties of scalar field or its interaction with the GB sector somehow provide this expansion. Or we can simply speculate that, some intrinsic features of the GB sector might be the source of the scalar field. Nevertheless, understanding the origin and true nature of the scalar field is undoubtedly crucial for a valuable theory, however, lack of knowledge both about the GB sector and its practical applications constrains us to analyze the dynamics of matter contents and to obtain a more precise theory.

1.2. Exponential Solutions

The solution of (11) and (12) for the exponential expansion satisfies,

$$a(t) = a_0 e^{\lambda_a t},$$

$$\phi(t) = \phi_0 e^{\lambda_\phi t},$$

$$f(\phi) = f_0 \phi(t), \quad (21)$$

where λ_a and λ_ϕ are the expansion parameters and $f_0 = \frac{12\lambda_a^2 - \lambda_\phi(6\lambda_a + \lambda_\phi)\omega}{48\lambda_a^4}$.

The matter part of ingredients behaves as perfect fluid as we mentioned before and the energy density and pressure for the baryonic matters have the following form,

$$\rho(t)^{(m)} = \frac{\phi_0(6\lambda_a^2(\lambda_a - \lambda_\phi) + \lambda_\phi^2(5\lambda_a + \lambda_\phi)\omega)}{32\pi\lambda_a} e^{\lambda_\phi t},$$

$$P(t)^{(m)} = -\frac{3\lambda_a + \lambda_\phi}{3\lambda_a}\rho(t)^{(m)}, \quad (22)$$

where the positive energy density and negative pressure is easily satisfied if the numerator of $\rho(t)$ has the positive values. However, since the value of λ_ϕ should always be nonzero, the rate $\frac{3\lambda_a + \lambda_\phi}{3\lambda_a}$ is never become the unity, hence, this solution doesn't recover the pure cosmological constant behavior. On the other hand, depending the value of λ_ϕ , the field may satisfy

the so called quintessence or phantom-like dark energy in which the value $-1 < -\frac{3\lambda_a + \lambda_\phi}{3\lambda_a} < -\frac{1}{3}$ for the quintessence field [6] and $-\frac{3\lambda_a + \lambda_\phi}{3\lambda_a} < -1$ for the phantom field [22]. Nevertheless, our model always satisfies the accelerated expansion for the values $\lambda_a > 1$.

The interaction term (13) between the BD and GB sectors becomes,

$$\Theta(t) = \frac{\lambda_\phi \theta_0}{4} [12\lambda_a^2 - \lambda_\phi(6\lambda_a + \lambda_\phi)\omega] e^{\lambda_\phi t}. \quad (23)$$

Here, if we require the condition $f(t) > 0$ on the GB scalar field in (21), the interaction energy is therefore transferred from the scalar field to the GB medium and vice versa. In any case, however, we can speculate that the scalar field is generated from intrinsic properties of the geometry which is contributed from the GB term.

For the perfect fluid type of GB content, we obtain the energy density and pressure as following,

$$\rho^{(GB)} = \frac{\lambda_\phi \theta_0}{4\lambda_a} [12\lambda_a^2 - \lambda_\phi(6\lambda_a + \lambda_\phi)\omega] e^{\lambda_\phi t},$$

$$P^{(GB)} = -\frac{2\lambda_a + \lambda_\phi}{3\lambda_a}\rho^{(GB)}, \quad (24)$$

here, we see that, the GB dark sector also satisfies the positive energy condition and negative pressure if the numerator of (21) has the positive value.

Now, if we criticize the rates for equations of state in (22) and (24), for example, for $\lambda_\phi = \lambda_a$ the baryonic matter satisfies the phantom-like dark energy while the GB component becomes the pure cosmological constant nature of dark energy [21]. Moreover, for example, for $\lambda_\phi = -\lambda_a$, both the baryonic matter and the GB content may satisfy the quintessence type of dark energy.

III. CONCLUSION

In this work, we have studied the late-time dynamics of a four-dimensional homogeneous and isotropic FLRW universe based on the Brans-Dicke scalar-tensor theory in the presence of the Gauss-Bonnet invariant. Our model contains the modification of source term that includes the scalar field and the modifications of curvature term as a scalar field non-minimally couples to the curvature R and to the other string inspired higher-order curvature squared corrections. In the model, we have considered the cosmological perfect fluid matter and assumed that the energy of the perfect fluid content is conserved, but there is an energy exchange between the scalar field and the GB components. We proposed that this interaction can conveniently explain the origin of dark energy.

We have shown that the power law evolution of the scale factor and scalar field yields the power law form of the GB coupling function. We introduced the $\phi_0 t^2$ type of the scalar field and derived the corresponding analytic solution of the field equations. We obtained

that if there is no energy transfer between perfect fluid matter and the other (BD and GB) sectors, spacetime expands with acceleration, negative pressure is exerted on the barotropic content of matter, and hence all visible objects move away from each other with acceleration. We have also investigated the exponential solution and find similar results. In each scenario, we concluded that dark energy can arise both from the energy density of the scalar field and from the generalized nonminimal coupling to the GB invariant. This result shows that considering GB and BD theories in the same model provide us the additional dynamical degrees of freedom and this model might be the relevant explanation of the nature of dark energy. Even Λ CDM model describes the cosmology in the very simplest form, the flatness of the universe at a large scale and also a highly fine-tuned explanation for the accelerated expansion of the universe (or so-called vacuum energy) leaves the model further unsolved problems. On the other hand, in our work, higher-order curvature terms provide a relevant explanation of the late time acceleration then we explain the dark energy without introducing a vacuum energy or a cosmological constant. Moreover, the scalar field offers a viable description of the inflationary era and then solves the flatness problem. In our work, a scalar field is naturally included in the BD theory and also combined with the string-motivated GB invariant. As a result, considering a scalar field and the higher-order curvature terms in an action might be a promising model to explain both the early universe and late-time acceleration.

Our scenario seems to be consistent with the observed late-time dynamics of the universe but, we need further works to clarify how this scalar field is generated from the GB interaction and hence leads the dark energy behavior and also how these theoretical results are compared and supported by recent observational data.

ACKNOWLEDGEMENT

The author thanks the Tekirdağ Namık Kemal University.

REFERENCES

- [1] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, P. M. Garnavich, R. L. Gilliland, C. J. Hogan, S. Jha, R. P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, David Reiss, Brian P. Schmidt, Robert A. Schommer, R. Chris Smith, J. Spyromilio, C. Stubbs, N. B. Suntzeff, and J. Tonry. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *The Astronomical Journal*, 116(3):1009, (1998).
- [2] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg, and W. J. Couch. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. *The Astrophysical Journal*, 517:565–586, (1999).
- [3] Timothy Clifton, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, and Constantinos Skordis. Modified gravity and cosmology. *Physics Reports*, 513:1–189, 3 (2012).
- [4] C. Brans and R. H. Dicke. Mach's principle and a relativistic theory of gravitation. *Phys. Rev.*, 124:925–935, (1961).
- [5] D. J. Gross and J. H. Sloan. The quartic effective action for the heterotic string. *Nuclear Physics B*, 291:41–89, (1987).
- [6] C.G. Callan, D. Friedan, E.J. Martinec, and M.J. Perry. Strings in background fields. *Nuclear Physics B*, 262(4):593–609, (1985).
- [7] Z. Kuan Guo and D. J. Schwarz. Slow-roll inflation with a gauss-bonnet correction. *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*, 81, 1 (2010).
- [8] P. Kanti, R. Gannouji, and N. Dadhich. Gauss-bonnet inflation. *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*, 92, 8 (2015).
- [9] G. Hikmawan, J. Soda, A. Suroso, and F. P. Zen. Comment on "gauss-bonnet inflation". *Physical Review D*, 93, 3 (2016).
- [10] P. Jiang, J. Hu, and Z. Guo. Inflation coupled to a gauss-bonnet term. *Phys. Rev. D*, 88:123508, (2013).
- [11] S. Chakraborty, T. Paul, and S. Sengupta. Inflation driven by einstein-gauss-bonnet gravity. *Physical Review D*, 98, 10 (2018).
- [12] S. Nojiri and S. D. Odintsov. Modified gauss-bonnet theory as gravitational alternative for dark energy. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 631:1–6, 12 (2005).
- [13] M. Gürses. Some solutions of the gauss-bonnet gravity with scalar field in four dimensions. *General Relativity and Gravitation*, 40:1825–1830, 9 (2008).
- [14] A. R. El-Nabulsi. Modified brans-dicke scalar tensor theories with generalized stringy gauss-bonnet corrections. *Astrophys Space Sci*, 327:167–171, (2010).
- [15] S. D. Odintsov, V K Oikonomou, and F P Fronimos. Non-minimally coupled einstein-gauss-bonnet inflation phenomenology in view of gw170817. *Annals of Physics*, 420:168250, (2020).
- [16] M. Benetti, S. Santos da Costa, S. Capozziello, J. S. Alcaniz, and M. De

- Laurentis. Observational constraints on gauss–bonnet cosmology. *International Journal of Modern Physics D*, 27(08):1850084, (2018).
- [17] L. N. Granda and D. F. Jimenez. Dark energy from gauss-bonnet and nonminimal couplings. *Phys. Rev. D*, 90:123512, (2014).
- [18] G. Cognola, E. Elizalde, S. Nojiri, S. D. Odintsov, and S. Zerbini. String-inspired gauss-bonnet gravity reconstructed from the universe expansion history and yielding the transition from matter dominance to dark energy. *Phys. Rev. D*, 75:086002, (2007).
- [19] V. K. Oikonomou and F. P. Fronimos. Non-minimally coupled einstein-gauss-bonnet gravity with massless gravitons: the constant-roll case. *Eur. Phys. J. Plus*, 135:917, (2020).
- [20] M. Cataldo, P. Mella, P. Minning, and J. Saavedra. Interacting cosmic fluids in power-law friedmann-robertson-walker cosmological models. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 662:314–322, 5 (2008).
- [21] S. Weinberg. The cosmological constant problem. *Rev. Mod. Phys.*, 61:1–23, Jan (1989).
- [22] R. R. Caldwell. A phantom menace? cosmological consequences of a dark energy component with super-negative equation of state. *Physics Letters B*, 545(1):23–29, (2002).

Prediction of The Production Quality During Flat Bottom Drilling of Low Lead Brass Alloy Using Fuzzy Logic and Regression Models

Nima ZOGHIPOUR^{1,2} , Yusuf KAYNAK² 

¹ *Torun Bakır Alaşımaları Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş., Gebze, Kocaeli, Turkey*

² *Department of Mechanical Engineering, Marmara University, Istanbul, Turkey*

Abstract

The approved restrictive rules on the containment of Lead element in the chemical composition of the brass alloys which are utilized in drinking water and pumping systems have resulted in developing of new material generations. Neglect or limitation of this element has faced the industry with some serious problems such as lower machinability as compared to the conventional ones. Furthermore, since the most application of the manufactured components from these alloys corresponds to the fluids transfer, the permeability property between the parts and their surface becomes prominent. In other words, any burrs or extra material which are left on the surfaces of manufactured components will make assembly troublesome, causing seals to tear, and permeability problems in the user's hands. In this study, the quality of the machined blind holes with flat bottom drills with various geometries including radial, axial rake angle as well as the cutting edge-radius have been investigated for machining of low-lead brass alloy. Moreover, it has attempted to develop fuzzy logic and regression models in order to predict the machined holes burr height and surface quality. The model predictions have been compared with the experimental data. The obtained results have demonstrated that the developed models are able in predicting of the product quality.

Keywords: Flat bottom drilling, Brass, Machinability, Fuzzy logic

I. INTRODUCTION

Brass materials with the main element of Zinc are categorized in the family of the copper-based alloys. Due to the excellent properties such as strength, formability, recyclability and corrosion resistance, brass alloys are widely used in the sterile, water and pumping components [1]. In order to intensify the forming and machining process efficiency of these alloys several elements one of which is Lead are being added to the chemical composition [2]. On the grounds of the toxic and harmful nature of this element, the use of Lead is prohibited/limited in most European countries and USA by accepted and published rules [3-6]. This restriction has led to the decrease in the brass formability and machinability. As a result, new challenges have emerged that must be resolved in order to expand this material change globally. In this scope, few authors have researched the machinability of these alloys. [7].

The friction behavior of leaded and lead-free brasses was studied by Gane et al. [8] with cutting and sliding tests. According to his results, the friction stress for lead-free brass was measured two times of the leaded one. In a performed investigation by Trent et al. [9, 10], it was concluded that the adding Lead element in the brass composition results in the reduction in the cutting forces, shortens the chips and the tool wear. They explained the reason behind this occurrence as adhering of Lead to the tool contact area and acting as an "internal lubricant" [10]. Bushlya et al. [11] studied the wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools for machining lead-free silicon brass. They found that the main reason for the tool failure is the crater formation on the rake face. Schultheiss et al. [12] focused on the machinability of CuZn39Pb3 and CuZn21Si3P brasses. Their work presented a profound level of differences in machinability in terms of tool coating types and their wear during machining of these two materials according to the properties and behavior. Nobel et al. [13] analysed the effect of microstructure on the chip formation, cutting forces, tool temperatures and tool wear is during external turning. Toulfatzis et al. [14] studied the machinability of three lead-free brass alloys, CW510L, CW511L and C27450 in a comparison with leaded brass CW614N with turning experiments. Zoghipour et al. [15] studied the effect of drilling process on surface integrity characteristics of lead-free brass alloy by focusing on the dimensional accuracy and the surface quality of the holes, subsurface characteristics including microhardness and microstructure. Hua et al. [16] studied the influences of the cutting-edge geometry, cutting conditions, and workpiece hardness in micro drilling of lead-free brass alloy. According to their results,

sharpen edge with chamfer cutting edge leads to higher compressive residual stress, and hardness. In a similar study Hua et al. [16], Kato et al. [17] studied the effects of web thinning, the helix angle, and the nick geometry on chip evacuation in micro drilling on lead-free brass alloy. Timata et al. [18] carried out an experimental study in drilling forging brass using a special tungsten carbide drilling tool and measured the exit burr height and workpiece diameter. They found that the most influencing parameters on the exit burr height and workpiece diameter are spindle speed and feed rate. Zoghipour et al. [19] considered the effects of the tools geometries, feed rates and rotational speeds in drilling of hot forged lead-free brass alloys with various copper content. They used artificial neural networks modelling, and genetic algorithm-based optimization methods to predict and minimize the cutting forces, dimensional accuracy error, and surface quality of the holes.

All the performed studies in the literature confirm the existence of Lead benefits in the machining process, and report lower and problematic machining properties for the low-lead and lead-free brass alloys. Furthermore, considering that most of the studies are associated with standard machining operations, it is seen that the industry requirements need high performance and efficient processes, one of which passes through the correct cutting tool design and its application. Therefore, in this study different flat bottom drills with various geometries including radial, axial rake angle as well as the cutting edge-radius have been utilized in order to form blind holes in low-lead brass alloy. The quality of the generated holes has been considered according to industrial component

requirements. For this purpose, fuzzy logic and regression models have been developed in order to predict the machined holes burr height and surface quality. The model predictions have been compared with the experimental data.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Experimental Tests

The workpieces used in this study was hot extruded round bars of 60 mm diameter and 28 mm length low-lead type of brass alloys CuZn38As (CW511L). The mechanical properties and chemical composition of the test materials is presented in Table 1. Ø8 mm diameter carbide flat bottom drill with given geometric specifications in Table 2 were utilized during the experiments. The designed flat bottom drill is demonstrated in Fig. 1. The cutting speed and the feed rate were kept constant at 100 m/min and 0.125 mm/rev during through hole drilling using 25 Bar of internal cooling flood. The machining experiments were conducted on a four axis FANUC Robodrill □-D21LiB5 CNC milling center having maximum spindle speed of 10000 rpm and 14.2 kW. In order to study the formed burrs height at entry of the machined holes Keyence digital optic microscope was used. The measurements for every drilled hole were executed from four different points. The surface quality of the holes bottom was evaluated with Mitutoyo Contracer CV-2100M4. All experiments have been carried out three times and the average result is reported. Fig. 2 shows the experimental setup and the machined product requirements in this study.

Table 1. The chemical composition of the studied brass alloys [20]

E, GPa	Machinability, %	Composition	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Ni	Al	As
			%Min.	Rem.	-	-	-	-	-	
CuZn38As (CW511L)	100	40	61.5	Rem.	-	-	-	-	-	0.02
			63.5	Rem.	0.2	0.1	0.1	0.3	0.05	0.15

Table 2. The geometric specification of the utilized cutting tools

Parameter	Diameter (mm)	Helix angle (deg)	Radial rake angle (deg)	Axial rake angle (deg)	Cutting edge-radius (µm)
Flat Bottom Drill	8	30	6	-2	10
			8	0	15
			10	2	20

2.2. Fuzzy Logic Modeling

The ability of behaving similar to mankind's decisions, fuzzy logic has gained a broad application with different purposes. A fuzzy logic system is consisted of the following steps as illustrated in Fig. 3;

- Fuzzification, in which the crisp data converts into fuzzy data or Membership Functions (MFs)

- Fuzzy Inference, in which the control rules to derive the fuzzy output combines with the membership functions. By using these membership functions the output of a fuzzy controller is derived from fuzzifications of both inputs and outputs
- Defuzzification, in which the output converts to crisp variable using different methods.

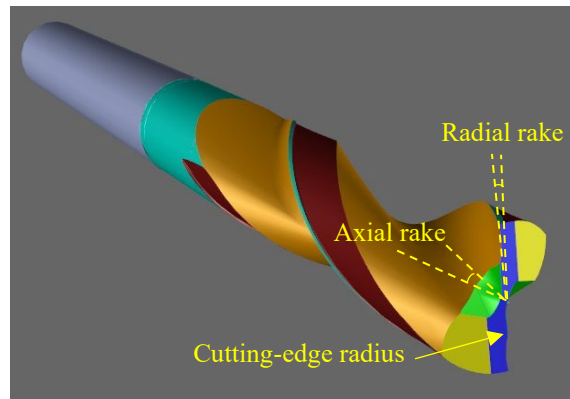


Fig 1. The designed flat bottom drill cutting tool

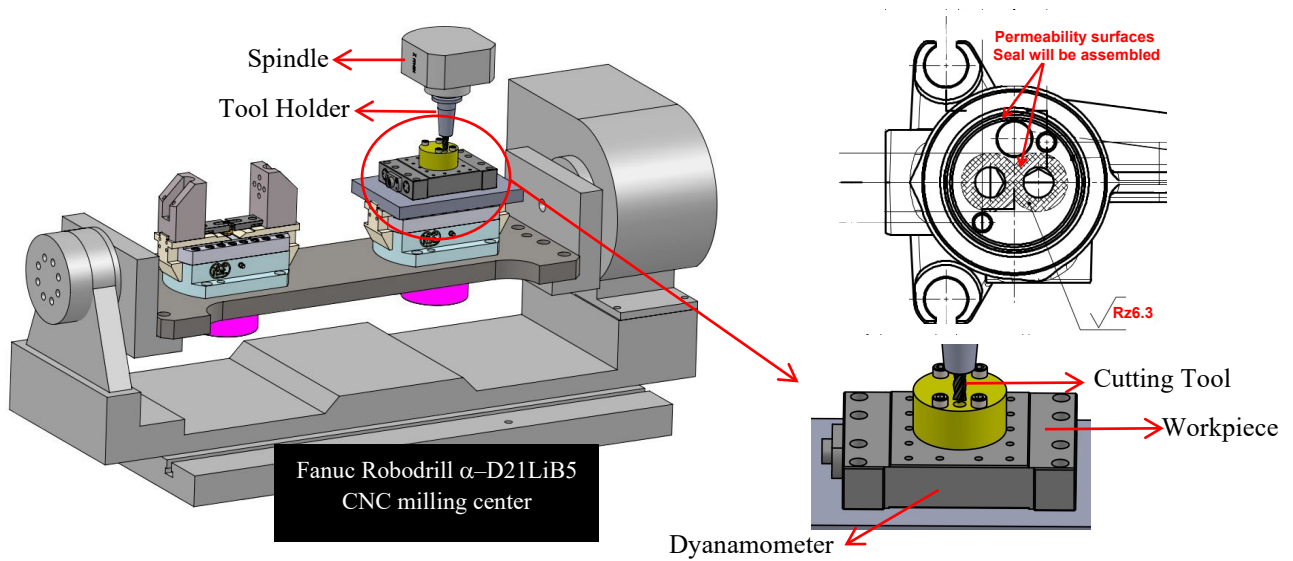


Fig. 2. The test setup in this study and the machined product requirement

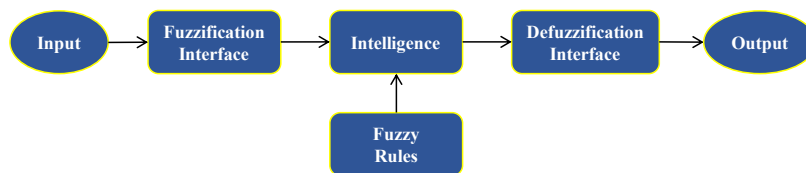


Fig. 3. The schematic of a fuzzy logic system

$$b = (\hat{x}\hat{x})^{-1}\hat{x}y \tag{3}$$

2.3. Regression modeling

The regression analysis was introduced in order to inspect the statistical relationship between one or more independent variables and dependent variables by Galton [21]. The parabolic regression is one the widespread used models for the purpose of inspections due to its simplicity and applicability. This model can be expressed as in below:

$$y_i = b_0 + b_1x_i + b_2x_i^2 + \dots + b_nx_i^n + \varepsilon \tag{1}$$

$$\varepsilon = y_i - \hat{y}_i \tag{2}$$

where y_i is dependent variable, x_i stands for the independent variable, b_0, b_1, b_2, b_n are the parameter coefficients and ε is the model error [22]. The regression coefficients can be obtained by the Eq. 3:

Furthermore, multiple regressions are a collection of numerical and factual strategies useful for modeling and analyzing issues in which the reaction of intrigued is influenced by a several variables [22,23].

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Fuzzy Logic Modeling

Mamdani FIS type was used and Gaussian membership function (gauss2mf) was deployed to return the fuzzy membership computed values using a combination of two Gaussian membership functions in the model. Subsequently, the linguistic coding was used as illustrated in Table 3. The generated inputs in the model are displayed in Fig. 4.

Table 3. The utilized linguistic coding for the developed model

Radial rake angle (deg)	Axial rake angle (deg)	Cutting edge radius (μm)	Burr height (μm)	Rz (μm)
6=L	-2=L	10=L	L<350	L<5
8=M	0=M	15=M	350≤M≤425	5≤M≤5.8
10=H	2=H	20=H	425<H≤500	5.8<H≤6.3
			VH>500	VH>6.3

where, L, M, H, VH represent low, medium, high and very high, respectively. The model was performed by 27 rules in total. The schematic developed rules based fuzzy logic model in this study is demonstrated in Fig. 5. Mean of Maximum (MoM) method was used for defuzzification. Therefore, the fuzzy output is a result of minimum and maximum compositional operations tracking.

The variation of the average entry burr height and surface roughness in a combined mode of the influencing cutting tool geometries is demonstrated in Fig. 6. The developed fuzzy model for the machining responses is given in Fig. 7. The lowest predicted average burr height and surface roughness values in the fuzzy logic model were 294.320 and 5.74 μm, respectively. It is seen that as compared with experimental results; the developed model has predicted the same cutting tool geometry for the minimum burr height. Furthermore, it has recognized two of three geometric parameters of the tool correctly. Along with the fuzzy logic system, in order to model the quality of the drilled hole, quadratic polynomial functions were used to predict the responses. The generated functions are illustrated in Table 3. The confidence coefficients for the burr height and surface roughness functions were %80.04 and %96.31, respectively. The lowest predicted average burr height and surface roughness values in

the fuzzy logic model were 331.946 and 5.03 μm, respectively. The regression model has only determined the same cutting tool geometry for burr height in a comparison with experimental results. The fuzzy logic average entry burr height and surface quality prediction error are %11.01 and %2.98, respectively. On the other hand, these percentages were %12.26 and %7.15 in the regression model. Table 5 illustrates the measured and predicted results for the process with their calculated error. The model’s average entry burr height and surface roughness graphs are demonstrated in Fig. 8. Beyond the predicted and measured result values, it is seen that the model predictions have demonstrated a good trend with the variation of the radial, axial rake angles

and cutting-edge radius. Consequently, both models can be used in the industrial and academic applications since they can give an acceptable range of confidence in their prediction results.

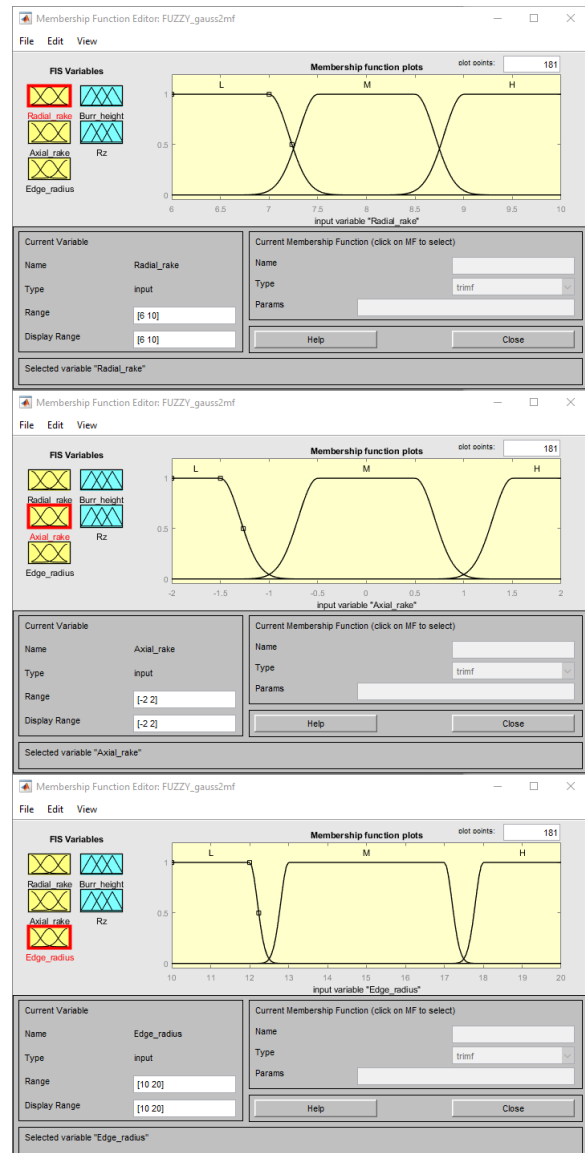


Fig. 4. The generated inputs FIS model

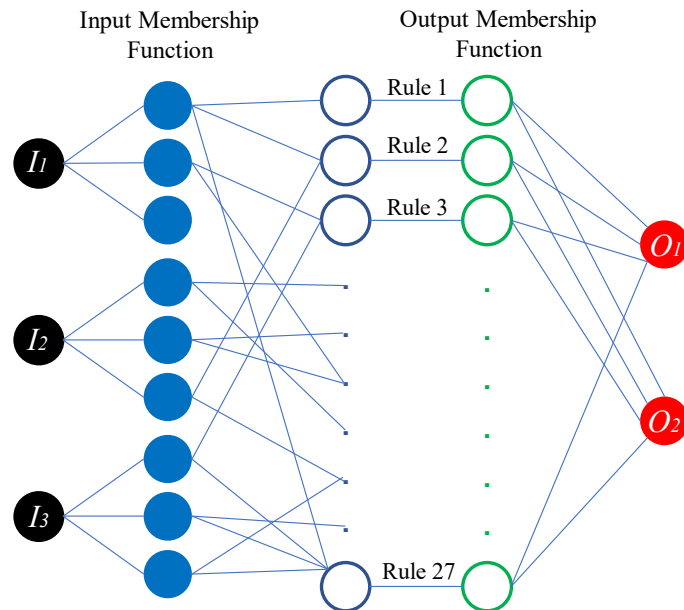
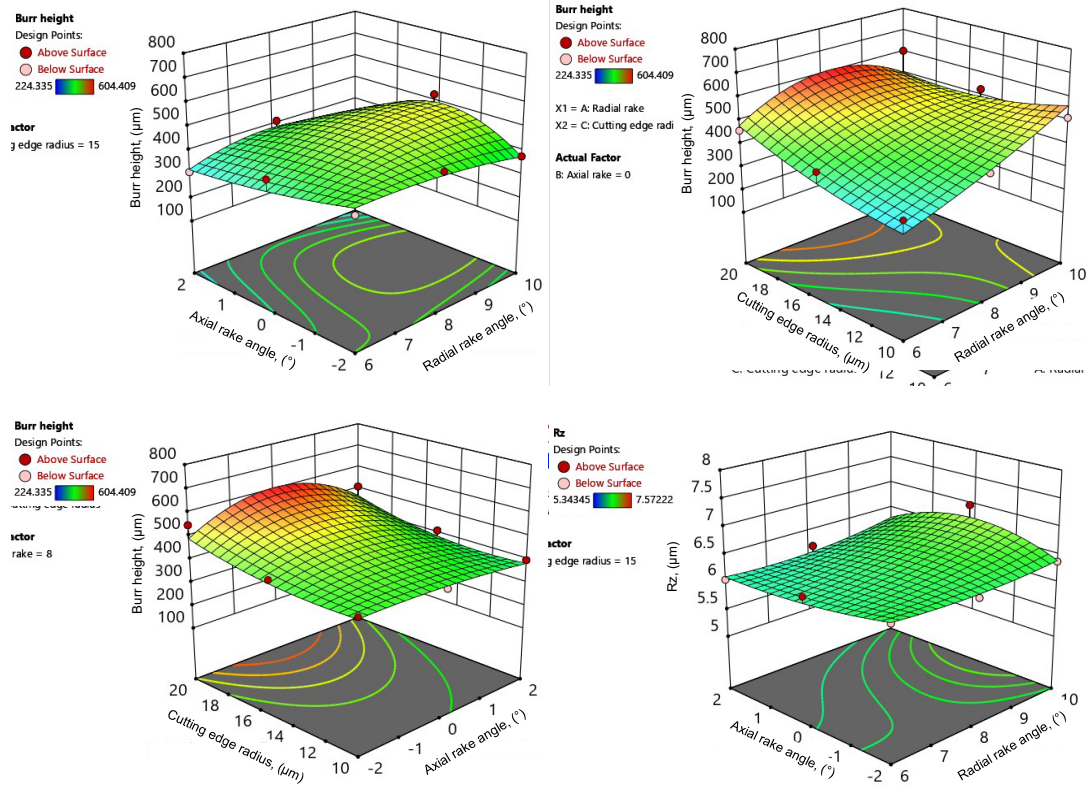


Fig. 5. The schematic of the developed fuzzy logic model



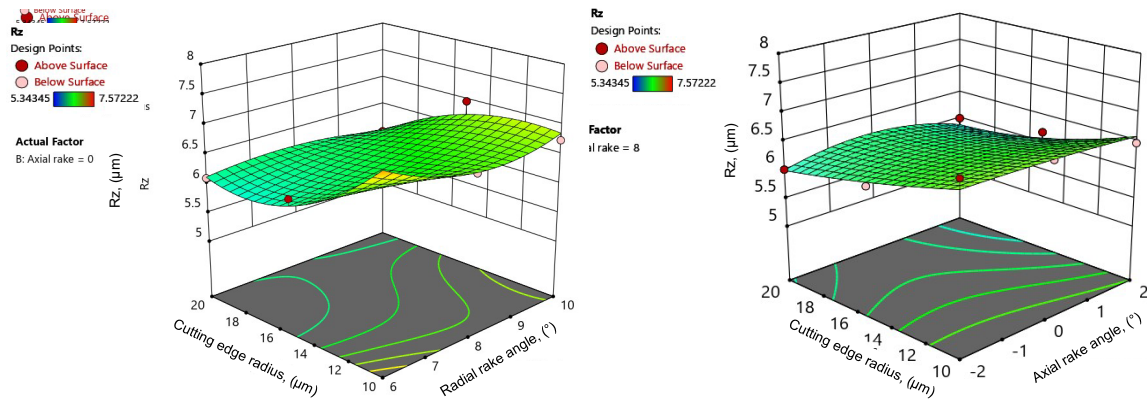


Fig. 6. The variation of the average entry burr height and surface roughness in a combined mode of the influencing cutting tool geometries

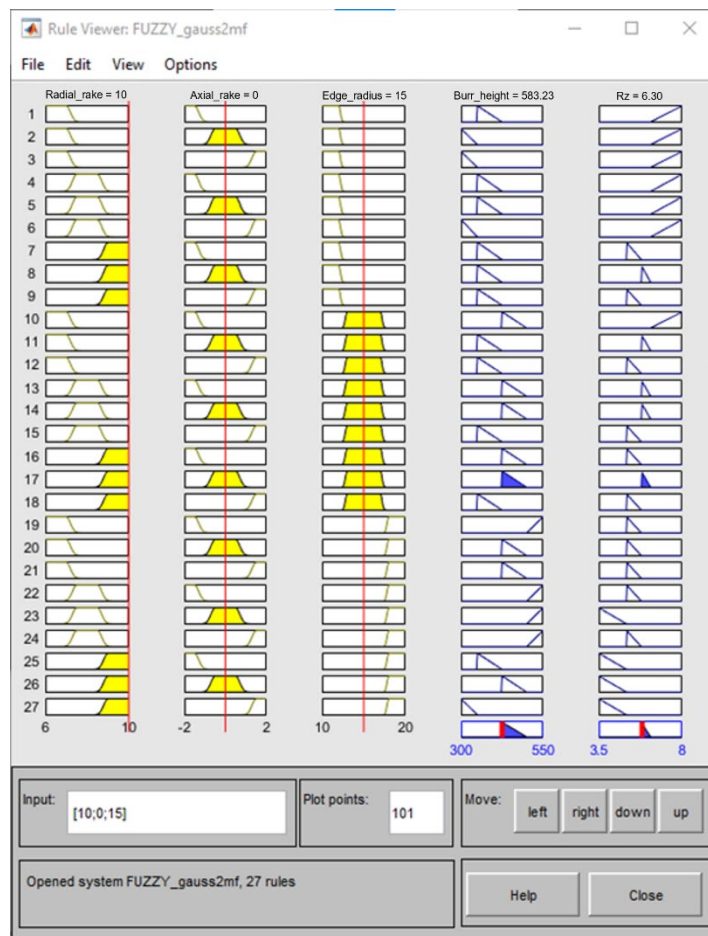


Fig. 7. The developed fuzzy logic model in this study

Table 4. The developed regression models

	A	B	C	AB	AC	BC	A ²	B ²	C ²	ABC	A ² B	A ² C	AB ²	AC ²	B ² C	BC ²	
Burr	479.03	66.91	-19.28	96.04	8.59	-59.75	3.34	-50.2	-72.01	33.76	12.85	-28.98	-66.88	-87.98	5.32	-57.89	4.68
Rz	6.35	0.29	-0.11	-0.24	-0.04	0.05	0.006	0.09	-0.14	0.09	-0.11	0.01	-0.25	-0.23	-0.41	-0.11	0.05

Table 5. The obtained results in this study

Run	Experimental Results				Regression Model Results					Fuzzy Logic Model Results			
	Radial rake angle, (°)	Axial rake angle, (°)	Cutting edge radius, (μm)	Entry burr height, (μm)	Rz Bottom, (μm)	Entry burr height, (μm)	Rz Bottom, (μm)	% Burr Error	% Rz Error	Entry burr height, (μm)	Rz Bottom, (μm)	% Burr Error	% Rz Error
1	6	-2	10	395.33	7.57	353.57	8.01	10.563	5.81	452.18	7.21	14.38	4.76
2	6	0	10	355.46	7.25	378.16	7.56	6.386	4.28	427.96	7.24	20.40	0.14
3	6	2	10	296.02	7.25	258.74	7.87	12.593	8.55	373.24	6.97	26.09	3.86
4	8	-2	10	428.68	6.9	466.73	6.32	8.876	8.41	472.59	6.86	10.24	0.58
5	8	0	10	404.88	6.68	499.92	6.99	23.475	4.64	413.98	6.94	2.25	3.89
6	8	2	10	398.87	6.47	389.09	6.76	2.451	4.48	384.03	6.94	3.72	7.26
7	10	-2	10	534.11	6.43	479.50	5.87	10.225	8.71	508.55	6.71	4.79	4.35
8	10	0	10	513.02	6.74	521.27	6.23	1.610	7.57	555.31	6.83	8.24	1.34
9	10	2	10	439.66	6.84	419.03	6.47	4.691	5.41	424.97	6.83	3.34	0.15
10	6	-2	15	407.59	6.37	389.08	5.97	4.541	6.28	465.94	6.66	14.32	4.55
11	6	0	15	409.77	6.27	417.02	6.69	1.769	6.70	403.94	6.59	1.42	5.10
12	6	2	15	310.77	6.05	300.95	6.32	3.160	4.46	389.29	6.32	25.27	4.46
13	8	-2	15	441.19	6.25	442.50	6.74	0.297	7.84	471.58	6.27	6.89	0.32
14	8	0	15	418.37	6.21	479.03	6.86	14.500	10.47	427.56	6.35	2.20	2.25
15	8	2	15	412.64	6.19	371.54	6.45	9.960	4.20	385.72	6.13	6.52	0.97
16	10	-2	15	377.44	6.38	395.51	6.95	4.788	8.93	376.76	6.17	0.18	3.29
17	10	0	15	529.00	6.97	440.63	6.37	16.705	8.61	583.23	6.3	10.25	9.61
18	10	2	15	271.23	6.14	341.73	6.55	25.995	6.68	328.89	6.13	21.26	0.16
19	6	-2	20	508.28	6.09	492.11	6.41	3.180	5.25	568.72	6.1	11.89	0.16
20	6	0	20	458.45	6.09	523.40	6.66	14.168	9.36	504.66	6.14	10.08	0.82
21	6	2	20	382.04	6.07	410.67	5.03	7.494	17.13	458.99	5.84	20.14	3.79
22	8	-2	20	548.23	6.01	485.78	5.03	11.392	16.31	585.01	5.88	6.71	2.16
23	8	0	20	519.24	6.11	525.65	6.30	1.235	3.11	522.72	5.95	0.67	2.62
24	8	2	20	509.65	6	421.51	5.50	17.295	8.33	549.75	5.87	7.87	2.17
25	10	-2	20	242.96	5.59	331.95	5.80	36.626	3.76	304.8	5.74	25.45	2.68
26	10	0	20	604.41	5.99	427.50	6.20	29.270	3.51	595.11	5.97	1.54	0.33
27	10	2	20	224.34	5.34	331.95	5.10	47.969	4.49	294.32	5.81	31.20	8.80

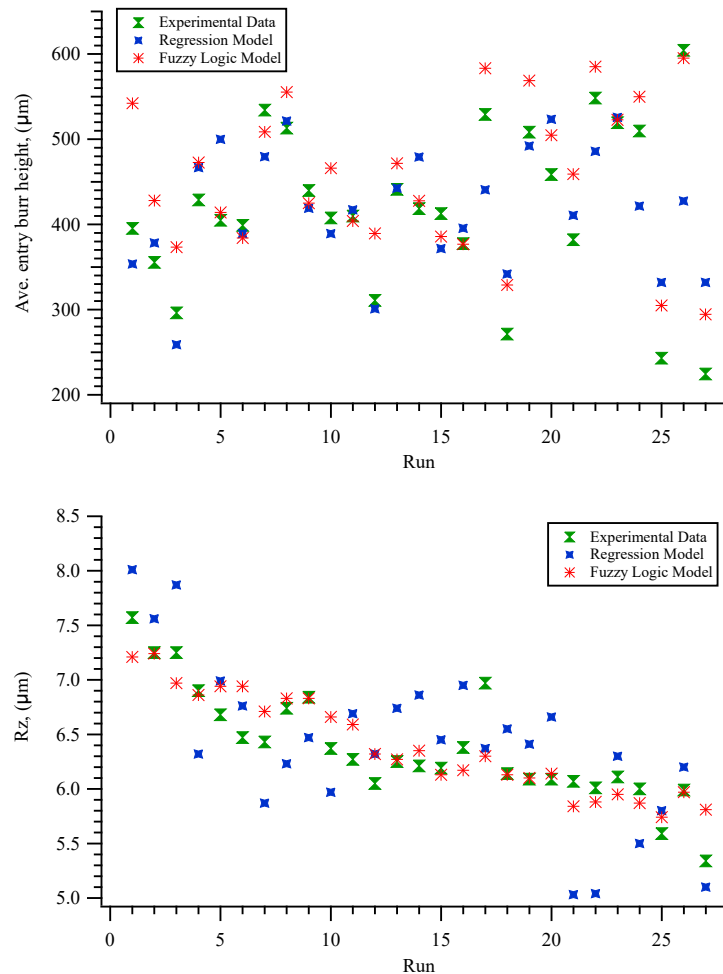


Fig. 8. Comparison of the model predictions with the experimental results

IV. CONCLUSION

This paper discusses the development of fuzzy logic and regression models to predict the average burr height the hole entry, and surface quality of a drilled specimens on low lead brass alloy. After several trial-and-error attempts, the accurate and effective types of fuzzification and defuzzification methods were determined. Moreover, a regression model was also developed to predict the responses as well. After all, the predicted results were compared with the experimental ones. The fuzzy logic average entry burr height and surface quality prediction error are %11.01 and %2.98, respectively. On the other hand, these percentages were %12.26 and %7.15 in the regression model. Both models are in good agreement with the achieved experimental results. Therefore, the developed models can be effectively used in to predicting the average entry burr height and surface quality. Consequently, these models can be helpful to neglect several costly experiments to predict the drilling responses as well as optimized cutting specially in industrial and academic applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) for partially supporting this work under project number 118C069.

REFERENCES

- [1] K. Aytakin, Characterization of machinability in lead-free brass alloys, PhD thesis, KTH Royal institute of technology, Sweden (2018).
- [2] M. Adineha, H. Doostmohammadi, Microstructure, mechanical properties and machinability of Cu–Zn–Mg and Cu–Zn–Sb brass alloys, *Journal of Materials Science and Technology*, 35(12), 1504–1514, (2019).
- [3] <https://www.copper.org/applications/rodbar/pdf/A7038-brass-for-european-potable-water-applications.pdf>
- [4] https://rohs.exemptions.oeko.info/fileadmin/user_upload/RoHS_Pack_9/Exemption_6_c_/Exemption_6_c_2015-10-mitsubishi-shindoh-rohs.pdf

- [5] D. Peters, Bismuth Modified Cast Red Brasses to Meet U.S. Drinking Water Standards, *Copper Development Association*, (1995).
- [6] D. Davies, Bismuth in copper and copper base alloys: a literature review, Technical Report, *Copper Development Association*, (1993).
- [7] L. Amaral, R. Quinta, T.E. Silva, R.M. Soares, S.D. Castellanos, A.M.P. de Jesus, Effect of lead on the machinability of brass alloys using polycrystalline diamond cutting tools, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53(8), 602–615, (2018).
- [8] N. Gane, The effect of lead on the friction and machining of brass, *Journal of Philosophical Magazine A*, 43(3), (1981).
- [9] E.M. Trent, P.K. Wright, Metal Cutting, 4th ed., Butterworth-Heinemann, Stoneham, MA, USA, (2000).
- [10] E.M. Trent, Metal cutting and the tribology of seizure: III temperatures in metal cutting, *Journal of Wear*, 128, 65–81, (1988).
- [11] V. Bushlya, D. Johansson, F. Lenrick, J. E. Ståhl, F. Schultheiss, Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass, *Journal of Wear*, (376-377), 143-151, (2017).
- [12] F. Schultheiss, D. Johansson, V. Bushlya, J. Zhou, K. Nilsson, J. E. Ståhl, Comparative study on the machinability of lead-free brass, *Journal of Cleaner Production*, 149, 366-377, (2017).
- [13] C. Nobel, F. Klocke, D. Lung, S. Wolf, Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys, *Journal of Procedia CIRP*, 14, 95-100, (2014).
- [14] A. I. Toulfatzis, G. A. Pantazopoulos, C. N. David, D. S. Sagris, A. S. Paipetis, Machinability of Eco-Friendly Lead-Free Brass Alloys: Cutting-Force and Surface-Roughness Optimization, *Journal of Metals*, 8, 250, (2018).
- [15] N. Zoghipour, E. Tascioglu, G. Ataya, Y. Kaynak, Machining-induced surface integrity of holes drilled in lead-free brass alloy, *Journal of Procedia CIRP*, 87, 148-152, (2020).
- [16] J. Hua, R. Shivpuri, X. Cheng, V. Bedekar, Y. Matsumoto, F. Hashimoto, T. R. Watkins. Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry, *Journal of Materials Science and Engineering A*, 394, 238–248, (2005).
- [17] H. Kato, S. Nakata, N. Ikenaga, Improvement of chip evacuation in drilling of lead-free brass using micro drill, *International Journal of Automation Technology*, 8, (2014).
- [18] M. Timata, C. Saikaew. Influences of spindle speed and feed rate on exit burr height and workpiece diameter in drilling forging brass, *Solid state phenomena*, 279, 67-71, (2018).
- [19] N. Zoghipour, G. Atay, Y. Kaynak, Modeling and optimization of drilling operation of lead-free brass alloys considering various cutting tool geometries and copper content, *Journal of Procedia CIRP*, 102, 246-251, (2021).
- [20] <https://sarbak.com.tr/dokuman/alasimlar/en/S511.pdf>
- [21] F. Galton, Regression towards mediocrity in hereditary stature, *The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland*, 15, 246–263, (1886).
- [22] I. J. Jeong, K. J. Kim, An interactive desirability function method to multiresponse optimization, *European Journal of Operational Research*, 195, 412–426, (2009).
- [23] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley, New York, NY, USA, 2nd. (1984).

Strongly Confined Electromagnetic Waves in a Hybrid Photonic–Plasmonic Resonator for Enhancing Light–Matter Interaction

Belkis GÖKBULUT 

Boğaziçi University, Institute for Data Science and Artificial Intelligence, İstanbul, Türkiye

Abstract

In this paper, a 1D photonic crystal waveguide and a plasmonic compound nano-system are utilized to design a hybrid photonic-plasmonic device for enhancement of light–matter interaction. Strongly localized light waves in a very small volume intensify the optical field, via a plasmonic particle, which interacts with the resonator’s cavity mode while the photonic crystal nanobeam ensures a high temporal confinement. The enhancement of light–matter interaction in the hybrid resonator is investigated through the single-atom cooperativity parameters based on numerically obtained results, which is calculated to be a factor of 14 as a consequence of the considerably reduced optical mode volume in the presence of the plasmonic nanoparticle. Additionally, the theoretical models and calculation procedures, presented in this paper, are demonstrated to be pioneering for the fabrication of efficient quantum devices based on hybrid photonic-plasmonic resonators.

Keywords: Photonic crystal, Hybrid resonator, Optical mode, Plasmonic nanoparticle, Light–matter interaction

I. INTRODUCTION

Controlling of light–matter interaction has become more of an issue for the scientific and technological developments in the area of photonics [1-3]. In this regard, numerous optoelectronic and photonic devices in various research fields like quantum information, laser and sensor technologies [4-6] have been introduced and efforts have been made to couple quantum sources such as dye molecules, quantum dots (QDs) into these photonic devices to manipulate their spontaneous emission [7]. Photonic resonators are basically designed based on two parameters; the quality factor (Q -factor), which corresponds to the temporal confinement of the electromagnetic waves and the mode volume (V), which accounts for the spatial localization of the photons [8]. The enhancement of the spontaneous emission rate is achieved provided that a resonator has either a high Q -factor or a small mode volume, yielding a high Purcell factor to improve the performance of the photonic devices [9].

Photonic crystal cavities have been demonstrated to offer a remarkable platform to control and manipulate the light emission with their ability to successively trap the photons at desired frequencies [10]. Even a slight change in the design parameters, like the dimensions or the shape of the mirror holes, results in the resonance frequency of the device to change, leading to a different design with a particular Q -factor and mode volume [11, 12]. Therefore, a wide variety of 1D or 2D photonic crystal designs, using diversified materials with varied Purcell factors at specific resonant frequencies, have been achieved [13-17] and they have been utilized in various applications; such as, optical trapping of nanoparticles [18], biological detection [19], light modulation [20] by means of vertical component of the light, which strongly emerges in the photonic crystals [21]. Although these dielectric photonic crystals are usually designed to have a high Q -factor based on their design parameters and materials, it is challenging to reduce the mode volume of these devices due to the number of the reflective mirrors used to achieve a high temporal confinement of the optical power [22]. On the other hand, it is a well-known fact that plasmonic nanoparticles act like nanoantennas with their capability of trapping light waves in a very small volume [23, 24]. It is also known that the plasmonic structures are not generally efficient to fabricate a resonator with a high Q -factor because of the radiation loss caused by their high absorption coefficients [25]. However, if metallic nanoparticles are integrated into a photonic cavity, provided that the quality factor of the resonator is essentially preserved, depending on the number and size of the plasmonic nanoparticles; the radiation properties of the device can be improved through the strong light localization [26, 27]. For example, a hybrid device, which comprised of a partially encapsulated photonic crystal waveguide and a single gold nanosphere, was reported to achieve a considerably enhanced Purcell factor, compared to the previously reported values for its counterparts due to the strong light concentration within a very small volume around the plasmonic nanoparticle[28].

Corresponding Author: BELKIS GÖKBULUT, Tel: 0212 359 5400, e-posta: belkis.gokbulut@boun.edu.tr

Submitted: 25.11.2022, **Revised:** 20.01.2023, **Accepted:** 28.02.2023

Hybrid photonic-plasmonic devices have also been demonstrated to offer unique opportunities for various applications as they provide ideal platforms for enhancing light–matter interaction [29, 30]. For instance, an optical refractive index sensor based on a photonic crystal structure integrated with metallic nanorods was shown to outperform the pure plasmonic or photonic crystal sensors as the localized surface plasmons increase the interaction of the optical field and the matter inside the cavity. This situation enhances the sensitivity and figure of merit of the device [31]. In another study, the synergetic coupling between the plasmonic field and the photonic crystal waveguide mode in a refractive index sensor was also revealed to offer an excellent potential to be used in sensing applications; the device was based on hybrid topology of photonic crystal and nested circular metallic split-ring resonator [32].

In this paper, a hybrid photonic-plasmonic device, which originates from a 1D photonic crystal waveguide and a plasmonic nanostructure is proposed to benefit from the advantages of both photonic and plasmonic systems. First of all, the photonic resonator, with gradually decreasing nanoholes towards the center of the resonator, is designed. Then, a core/shell nanoparticle, which consists of a gold nanoparticle, coated by polystyrene (PMMA) layer and a dipole, placed on the surface of the PMMA layer surrounding the plasmonic nanoparticle is introduced to be integrated on the surface of the photonic crystal cavity. The polymer layer between the dipole and the plasmonic nanoparticle provides a required distance to prevent any radiation loss induced by the excessive electron or energy transfers between the dipole and the metal nanoparticle. In this regard, while the light waves are demonstrated to be localized in a very small volume due to the strong interaction between the surface plasmons and the cavity mode, the Q -factor of the system is mainly preserved. The enhancement factor of the light–matter interaction in the hybrid resonator is investigated by the single-atom cooperativity parameters of the designed photonic crystal nanobeam and photonic compound system, which results in a value of about 14. The appropriate theoretical models and calculation procedures presented in this paper ensure fabrication of a highly efficient quantum device based on a hybrid resonator. Therefore, in our photonic design, strongly confined electromagnetic field at nanoscale in a hybrid photonic-plasmonic device, which consists of an efficient photonic resonator and a well-defined core/shell nanoparticle, is demonstrated to be promising for remarkable progresses in nanophotonics, nanoplasmonics, and quantum information technologies.

II. THE DESIGN OF THE PHOTONIC DEVICE

In this work, photonic crystal nanobeam is designed to be a 1D sequential layout of air holes with a lattice constant (p) of 250 nm and a hole radius (r) of 70 nm aiming to have high Q -factor and a small mode volume at the visible wavelength regime via Finite Difference Time Domain (FDTD) Technique. The reasons behind using 1D geometry and an air-bridged design are that 1D photonic crystal beams usually have larger band gaps than their 2D counterparts [33]; and air-bridged designs offer a high refractive index contrast between the waveguide and the air cladding to facilitate obtaining a high Q -factor [34].

The schematic representation of the photonic crystal nanobeam that includes eleven mirror holes as Bragg reflectors and four taper holes on each side, is given in Figure 1.

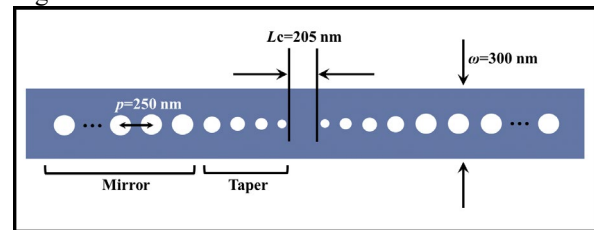


Figure 1. A display of the designed photonic crystal nanobeam.

A defect mode is introduced at the desired wavelength of 628 nm to obtain a radiation with the optimized simulation parameters. The substrate material is chosen to be SiN with a refractive index of 2.05 because it has a low absorption coefficient at the visible range. The layer thickness and width (ω) of the substrate material are determined to be 200 nm and 300 nm, respectively. There are four taper holes on each side that have linearly decreasing radius from 66 nm to 55 nm towards the center of the beam. Cavity length (L_c) is also determined to be the distance between the innermost holes, which is equal to 205 nm.

The design parameters of the photonic crystal nanobeam are optimized to have a high Q -factor and small mode volume through the optimization toolbox of the FDTD solver module of the Lumerical Ltd. In the simulations, after the design of the photonic crystal cavity, a gold nanoparticle with a radius of 10 nm is coated by a PMMA shell with a thickness of 15 nm first; and then, an electric dipole is attached to the surface of the layer to introduce a hybrid core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle. This nanoparticle is integrated at the central region of the photonic crystal nanobeam to produce a hybrid photonic-plasmonic resonator, as shown in Figure 2.

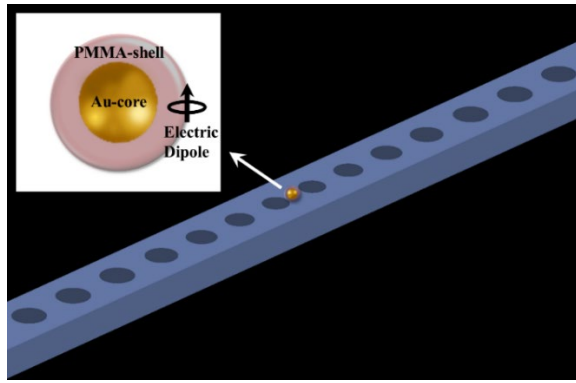


Figure 2. The schematic representation of the hybrid device that includes 1D photonic crystal nanobeam and a core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle, which is illustrated in detail in the zoomed image.

The coupling of the localized surface plasmons to the optical mode significantly confines the electromagnetic field in the photonic device. However, plasmonic particles near the fluorescent quantum light sources like quantum dots or molecules induce a considerable optical loss because of the quenching of the light intensity [35]. Nonetheless, with a specified thickness of the polymer layer surrounding the gold nanoparticle, a controllable distance between the plasmonic nanoparticle and the dipole is provided to prevent the excessive electron or energy transfer mechanisms between the particles; hence, an efficient dipole-hybrid mode interaction is achieved simultaneously. The numerical calculations have also been performed to optimize the radius of the gold nanoparticle whose diameter is much smaller than the interacting light wavelength after the resonance wavelength of the photonic structure is simulated. According to our results, the local electric field near the plasmonic nanoparticle is observed to be considerably boosted when the gold nanoparticle with a radius of 10 nm is used.

III. RESULTS AND DISCUSSION

In the simulations, the electric field distribution is calculated for each unit cell to obtain the field distribution profiles of the resonators. The mesh grid size in the hybrid structure is determined to be 0.1 nm. The optical mode volume and the Q -factor of the hybrid cavity are also determined by time-domain calculations using perfectly-matched layers surrounding the resonator to calculate the Purcell factor. The optical mode volume calculations are performed over the entire space, including the perfectly matched-layers. The main reason to use perfectly-matched layers at the boundaries of the hybrid resonator is to ensure taking account of the field leakage from the system, induced by the plasmonic nanoparticle. Thus, using perfectly-matched layers facilitates to determine the exact field distribution and the optical mode volume of the hybrid photonic-plasmonic cavity. The top view and electric

field distribution profile of the photonic crystal nanobeam are obtained by FDTD technique, which are given in Figure 3a and 3b, respectively. In our numerical calculations, a dipole is also attached to the surface of the shell (PMMA) particle, and then the shell (PMMA)-dipole particle is placed at the central region of the photonic crystal nanobeam. The top view of the photonic crystal beam, after the shell (PMMA)-dipole particle is placed, is shown in Figure 3c along with its electric field distribution profile, shown by Figure 3d. Although the electric field distribution profile is observed to change as a result of the effect of the cavity mode on the polymer layer, a strong light localization, which induces a substantially reduced mode volume, is not observed. The top view and electric field distribution profile of the photonic crystal nanobeam after the core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle is integrated on the surface of the structure, are also given in Figure 3e and 3f, respectively. In Figure 3f, the inset figure shows the zoomed electric field distribution around the plasmonic nanoparticle. For visual purposes, the central regions of the resonators are illustrated. After the core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle is integrated on the surface of the resonator, the local electric field near the plasmonic nanoparticle is shown to be noticeably enhanced when the gold particle with a radius of 10 nm is used, as shown in Figure 3f.

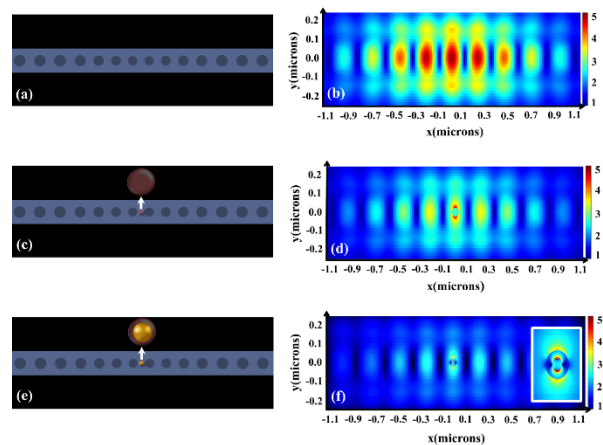


Figure 3. (a) Top view and (b) field distribution of the resonator. (c) Top view and (d) field distribution of the resonator in which a shell-dipole nanoparticle is placed. (e) Top view and (f) field distribution of hybrid resonator.

The Purcell factor is basically determined by Equation 1 when the dipole is oriented with respect to the mode field direction at the resonant frequency [36].

$$F_p = \frac{3Q(\lambda/n)^3}{4\pi^2V} \quad (1)$$

in which n is the refractive index of the cavity, V is the optical mode volume and λ is the resonance wavelength of the device, and Q is the quality factor. When the plasmonic particle exists, the mode volume of the hybrid mode is determined by Equation 2,

which accounts for both the confined cavity mode and photonic loss from the cavity due to the absorptive plasmonic nanoparticle [37]. The Drude model is utilized for the complex dielectric function with the total field ($\tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{H}}$) generated by a dipole, $\mathbf{p} = p\mathbf{u}$ in which \mathbf{u} is a unit vector.

$$V = \frac{\int \left[\tilde{\mathbf{E}} \cdot \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} \tilde{\mathbf{E}} - \tilde{\mathbf{H}} \cdot \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} \tilde{\mathbf{H}} \right] d^3\mathbf{r}}{2\varepsilon_0 n^2 \left[\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{u} \right]^2}, \quad (2)$$

In the numerical calculations, the mode volume of the photonic crystal nanobeam is determined to be around $0.12(\lambda/n)^3$. The mode volume is also determined after the shell (PMMA)-dipole particle is placed on the surface of the photonic crystal beam, which is found to be $0.09(\lambda/n)^3$. The insignificantly decreased mode volume of the structure is induced by the slight confinement of the light waves in a very small volume of the polymer region.

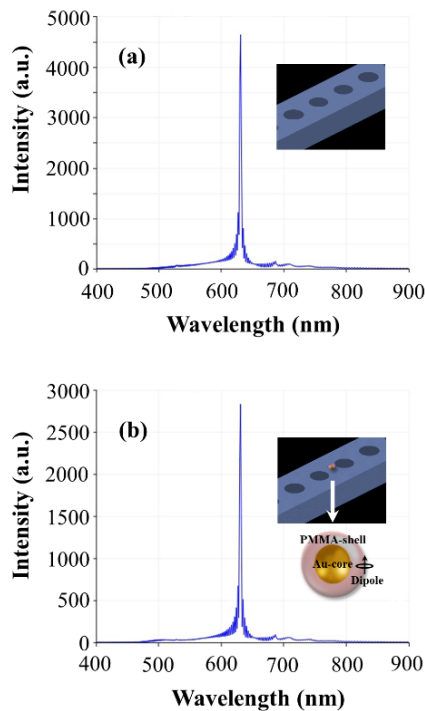


Figure 4. Numerically obtained photoluminescence spectra of (a) the photonic crystal nanobeam and (b) the hybrid device, consisting of a 1D photonic crystal nanobeam and core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle.

Finally, the core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle is integrated on the surface of the resonator and the nanostructure with an optimized Au core radius of 10 nm is observed to ideally confine the optical mode field of the photonic crystal cavity in a very small volume through the localized surface plasmons. As a

result, the mode volume of the hybrid structure is observed to considerably decrease to a value of $0.007(\lambda/n)^3$ with a negligible imaginary part.

The photoluminescence spectra of the photonic crystal waveguide and hybrid device are also acquired by FDTD technique, which are given in Figure 4a and 4b, respectively. The lasing spectrum is observed not to be changed noticeably in the existence of the gold particle because of the minimized dimensions of the plasmonic nanoparticle used in the hybrid system.

The quality factors of the photonic systems presented in Figure 3a, 3c and 3e are also obtained numerically. The Q -factor of the photonic crystal nanobeam and the shell (PMMA)-dipole particle integrated photonic crystal nanobeam are calculated to be about 10448 and 10254, respectively. The Q -factor of the hybrid resonator is also determined to be about 8434 in the presence of the plasmonic nanostructure.

Table 1. The resonant wavelength λ_c , Mode volume, Q -Factor, and the Purcell factor (F_p) values of the designed photonic crystal (PC) nanobeam; photonic crystal nanobeam in which a shell (PMMA)-dipole nanoparticle is placed; and the hybrid resonator in which core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle is placed.

Structure	Mode volume	Q -factor	λ_c (nm)	F_p
PC nanobeam	$0.12(\lambda/n)^3$	10448	628.68	6622
PC with the shell-dipole	$0.09(\lambda/n)^3$	10254	628.68	8666
PC with the Au/PMMA-dipole	$0.007(\lambda/n)^3$	8434	628.68	91651

The Purcell factors of the designed photonic crystal nanobeam shown in Figure 3a, the photonic crystal nanobeam after the shell (PMMA)-dipole nanoparticle is placed, which is demonstrated in Figure 3c, and the hybrid resonator after the core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle is placed, which is presented in Figure 3e, are also calculated and given in Table 1 along with their mode volume, Q -factor values and resonance wavelengths. The Purcell factor is observed to be considerably enhanced to a value of $F_p=91651$ in the presence of the plasmonic nanoparticle.

The absorptive nature of the gold nanoparticle, interacting with optical mode is expected to cause a decrease of the Q -factor of the device. However, in our photonic design, interrogating a plasmonic nanoparticle with a radius of 10 nm, reduces the effects of the optical losses and the Q -factor of the structure remains still high. Therefore, it is obviously

seen that the hybrid device proposed here is demonstrated to be highly efficient for developments of the low-threshold lasers since the designed photonic structure with a high Q -factor and small mode volume enables to considerably enhance the Purcell factor and reduce the amount of active material in the resonator if a quantum source like a dye molecule or a QD is used to be a dipole to be chemically attached to the surface of the synthesized core/shell-Au/PMMA nanoparticle.

The light-matter interaction enhancement factor is determined in terms of the single-atom cooperativity parameters of the designed photonic resonators based on Equation 3 [38]:

$$C = \frac{2G^2}{\kappa\gamma_s}, \quad (3)$$

in which γ_s is the decay rate of dipole, κ is the decay rate of the optical mode, and G represents the coupling strength, calculated by [38]

$$G = \mu f_c(\mathbf{R}) \left(\frac{\omega_c}{2\hbar\epsilon_0\epsilon_c V_c} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

in which \hbar is the reduced Planck's constant, ϵ_0 is the vacuum permittivity, μ and ϵ_c represents the photonic medium permeability and permittivity, respectively, and $f_c(\mathbf{R})$ corresponds to the normalized electric field distribution in the cavity where the distance is represented by \mathbf{R} .

The light-matter interaction enhancement factor (C_{c+m}/C_c), is determined by the ratio of the single-atom cooperativity parameters of the dipole coupled into the photonic-plasmonic mode of the hybrid device, consisting of a 1D photonic crystal waveguide and core/shell-Au/PMMA-dipole nanoparticle (C_{c+m}) and the cavity mode of the photonic crystal resonator (C_c) based on the numerically obtained results for both systems. The light-matter interaction enhancement factor is determined to be about 14 in the hybrid resonator. Although our study has no direct analogy to previously published works in the literature, the enhancement factor we have obtained might be compared to the system based on a hybrid structure, which consists of a plasmonic nanoparticle and a WGM cavity [39]. When the radius of the plasmonic nanoparticle in this system is 10 nm and the distance between the dipole and the plasmonic nanoparticle is about 15 nm, the enhancement factor of the light-matter interaction is determined to be about 5 [39], which seems to be much lower than ours.

In the literature, plasmonic particles integrated to 2D photonic crystal waveguides with low or moderate Q -factors have been demonstrated to improve radiation efficiency [40, 41]. For example, the enhanced mode field has been revealed in a recent study in which

plasmonic rods and nanospheres are excited to enable surface plasmons to be coupled into the cavity field of the resonator as the Q -factor of the device is significantly reduced from $Q=2500$ to $Q=720$ because of the absorptive nature of the plasmonic particle [41]. In another study, a plasmonic nanoparticle is located at the center of an integrated photonic device with two different photonic cavities; a Fabry Perot cavity and a 2D photonic crystal waveguide to interact with the mode fields. In the hybrid device, as the electric field is observed to be significantly enhanced around the plasmonic nanoparticle, the Q -factor of the device is also shown to decrease from $Q=435$ to $Q=184$ due to plasmonic particle [42]. In addition to all these, the boosted cavity mode field through plasmonic interaction has also been achieved in a recently published study in which a hybrid structure, consisting of a partially encapsulated photonic crystal waveguide and a gold nanoparticle is used [28]. The photonic design is based on a partial encapsulation of a 1D photonic crystal waveguide with a polymer layer of a thickness of 40 nm. The mode volume of the device is demonstrated to considerably decrease to a value of about $0.8 (\lambda/n)^3$ in the presence of the gold nanoparticle [28]. In the photonic design proposed here, together with appropriate theoretical models and calculation procedures, the light-matter interaction enhancement is accomplished by a hybrid photonic-plasmonic design consisting of a 1D photonic crystal waveguide and a core/shell-Au/SiO₂-dipole nanoparticle, which offers both high Q -factor and small mode volume. As the polymer layer between the electric dipole and the surface of the gold particle provides an efficient distance for enhancement of light-matter interaction, light waves are demonstrated to be extremely confined through synergetic effect of the cavity mode and the plasmonic fields. Thus, the mode volume of the device is dramatically decreased to a value of $0.007(\lambda/n)^3$. It proves that the stronger light concentration, and hence, the stronger light-matter interaction is achieved compared to the similar hybrid architecture published earlier as the high Q -factors of the photonic resonators are almost maintained in the presence of the plasmonic nanoparticles in both devices [28]. Therefore, the photonic platform introduced here offers a significantly improved device characteristics through plasmonic effect, which enables fabrication of a nanostructure with a great potential to be used in various applications such as optical trapping or biosensing.

In a future work, the photonic crystal waveguide proposed here will be produced by electron beam lithography and the core/shell-Au/PMMA particle will be synthesized chemically and decorated with a few quantum dots to reduce the amount of active material in the resonator and then, integrated on the surface of the photonic cavity by Atomic Force Microscopy technique. Time-resolved experiments based on single

photon counting technique will also be performed to obtain the experimental results to compare with the theoretical model, calculations and the numerically obtained results presented in this paper. The fabrication of such a hybrid photonic-plasmonic resonator would facilitate to produce a nanodevice operating in the quantum regime, which may have a potential to be used in quantum information technologies.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, a 1D photonic crystal resonator with gradually decreasing nanoholes towards the center of the structure, is designed. Then, a well-defined nanoparticle, which comprises a plasmonic nanoparticle, coated by a silica layer and a dipole, is integrated on the surface of the cavity to generate a hybrid photonic-plasmonic resonator. The strongly enhanced electromagnetic field at nanoscale is generated as a result of the interaction between the optical mode field and gold particle to enhance the light-matter interaction by a factor of about 14. The theoretical models and calculation procedures introduced in this paper are demonstrated to be leading for the fabrication of a highly efficient quantum device based on a hybrid resonator. Therefore, the photonic design presented in this paper is considered to be promising for the advances in fabrication of hybrid and efficient devices for photonic and optoelectronic platforms, laser and sensor technologies, and quantum information processing.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author acknowledges TUBITAK for the financial support provided under Contract Number 120F323.

REFERENCES

- [1] Giannini, V., Fernández-Domínguez, A.I., Sonnefraud, Y., Roschuk, T., Fernández-García, R. and Maier, S.A. (2010). Controlling light localization and light-matter interactions with nanoplasmonics. *Small*, 6, 2498–2507.
- [2] Xu, Y., Ji, D., Song, H., Zhang, N., Hu, Y., Anthopoulos, T.D., Di Fabrizio, E.M., Xiao, S. and Gan, Q. (2018). Light-matter interaction within extreme dimensions: From nanomanufacturing to applications. *Advanced Optical Materials*, 6, 1800444.
- [3] Koenderink, A.F., Alù, A. and Polman, A. (2015). Nanophotonics: Shrinking light-based technology. *Science*, 348, 516–521.
- [4] Feng, L., Zhang, M., Wang, J., Zhou, X., Qiang, X., Guo, G., and Ren, X. (2022). Silicon photonic devices for scalable quantum information applications. *Photonics Research*, 10, A135–A153.
- [5] Bekele, D., Yu, Y., Yvind, K. and Mork, J. (2019). In-plane photonic crystal devices using Fano resonances. *Laser & Photonics Reviews*, 13, 1900054.
- [6] Zhang, Y., Zhao, Y. and Lv, R. (2015). A review for optical sensors based on photonic crystal cavities. *Sensors and Actuators A: Physical*, 233, 374–389.
- [7] Javadi, A., Söllner, I., Arcari, M., Lindskov Hansen, S., Midolo, L., Mahmoodian, S., Kiršanskė, G., Pregolato, T, Lee, E.H, Song, J.D., Stobbe, S. And Lodahl, P. (2015). Single-photon non-linear optics with a quantum dot in a waveguide. *Nature Communications*, 6, 8655.
- [8] Zhang, Z. and Qiu, M. (2004). Small-volume waveguide-section high Q microcavities in 2D photonic crystal slabs. *Optics Express*, 12, 3988–3995.
- [9] Liu, F., Brash, A.J., O'Hara, J., Martins, L.M.P.P., Phillips, C.L., Coles, R.J., Royall, B., Clarke, E., Bentham, C., Prtljaga, N., Itskevich, I. E., Wilson, L. R., Skolnick, M. S. and Fox, A. M. (2018). High Purcell factor generation of indistinguishable on-chip single photons. *Nature Nanotechnology*, 13, 835–840.
- [10] Noda, S., Fujita, M. and Asano, T. (2007). Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities. *Nature Photonics*, 1, 449–458.
- [11] Yang, D., Tian, H. and Ji, Y. (2015). High-Q and high-sensitivity width-modulated photonic crystal single nanobeam air-mode cavity for refractive index sensing. *Applied Optics*, 54, 1–5.
- [12] Yang, D., Zhang, P., Tian, H., Ji, Y., Quan, Q. (2015). Ultrahigh-Q and low-mode-volume parabolic radius-modulated single photonic crystal slot nanobeam cavity for high-sensitivity refractive index sensing. *IEEE Photonics Journal*, 7, 1–8.
- [13] McCutcheon, M.W. and Loncar, M. (2008). Design of a silicon nitride photonic crystal nanocavity with a Quality factor of one million for coupling to a diamond nanocrystal. *Optics Express*, 16, 19136–19145.
- [14] Gupta, S. and Waks, E. (2013). Spontaneous emission enhancement and saturable absorption of colloidal quantum dots coupled to photonic crystal cavity. *Optics Express*, 21, 29612–29619.
- [15] Yang, D., Wang, C. and Ji, Y. (2016). Silicon on-chip 1D photonic crystal nanobeam bandstop filters for the parallel multiplexing of ultra-

- compact integrated sensor array. *Optics Express*, 24, 16267–16279.
- [16] Fryett, T.K., Chen, Y., Whitehead, J., Peycke, Z.M., Xu, X. and Majumdar, A. (2018). Encapsulated silicon nitride nanobeam cavity for hybrid nanophotonics. *ACS Photonics*, 5, 2176–2181.
- [17] Chen, Y., Ryou, A., Friedfeld, M.R., Fryett, T., Whitehead, J., Cossairt, B.M. and Majumdar, A. (2018). Deterministic positioning of colloidal quantum dots on silicon nitride nanobeam cavities. *Nano Letters*, 18, 6404–6410.
- [18] Mandal, S., Serey, X. and Erickson, D. Nanomanipulation using silicon photonic crystal resonators. (2009). *Nano Letters*, 10, 99–104.
- [19] Liang, F., Clarke, N., Patel, P., Loncar, M. and Quan, Q. (2013). Scalable photonic crystal chips for high sensitivity protein detection. *Optics Express*, 21, 32306–32312.
- [20] Hendrickson, J., Soref, R., Sweet, J. and Buchwald, W. (2014). Ultrasensitive silicon photonic-crystal nanobeam electro-optical modulator: Design and simulation. *Optics Express*, 22, 3271–3283.
- [21] Dutta, H.S., Goyal, A.K., Srivastava, V. and Pal, S. (2016). Coupling light in photonic crystal waveguides: A review. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 20, 41–58.
- [22] Quan, Q., Deotare, P.B. and Marko, L. (2010). Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide. *Applied Physics Letters*, 96, 203102.
- [23] Gramotnev, D.K. and Bozhevolnyi, S.I. (2014). Nanofocusing of electromagnetic radiation. *Nature Photonics*, 8, 13–22.
- [24] Song, M., Wang, C., Zhao, Z., Pu, M., Liu, L., Zhang, W., Yub, H. and Luo, X. (2016). Nanofocusing beyond the near-field diffraction limit via plasmonic Fano resonance. *Nanoscale*, 8, 1635–1641.
- [25] Schuller, J.A., Barnard, E.S., Cai, W., Jun Y.C., White, J.S. and Brongersma, M.L. (2010). Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. *Nature Materials*, 9, 193–204.
- [26] Conteduca, D., Reardon, C., Scullion, M.G., Dell’Olio, F. and Armenise, M.N. (2017). Ultra-high Q/V hybrid cavity for strong light-matter interaction. *APL Photonics*, 2, 086101.
- [27] Barth, M., Schietinger, S., Fischer, S., Becker, J., Nüsse, N., Aichele, T., Löchel, B., Sönnichsen, C. and Benson, O. (2010). Nanoassembled plasmonic-photonic hybrid cavity for tailored light-matter coupling. *Nano Letters*, 10, 891–895.
- [28] Gökbulut, B. (2022). A hybrid photonic-plasmonic resonator based on a partially encapsulated 1D photonic crystal waveguide and a plasmonic nanoparticle. *Heliyon*, 8, e12346.
- [29] Zhang, H., Zhao, W., Liu, Y., Chen, J., Wang, X. and Lu, C. (2021). Photonic-plasmonic hybrid microcavities: Physics and applications. *Chinese Physics B*, 30, 117801.
- [30] Hajshahvaladi, L., Kaatuzian, H. and Danaie, M. (2021). Design of a hybrid photonic-plasmonic crystal refractive index sensor for highly sensitive and high-resolution sensing applications. *Physics Letters A*, 420, 127754.
- [31] Hajshahvaladi, L., Kaatuzian, H., Moghaddasi, M. and Danaie, M. (2022). Hybridization of surface plasmons and photonic crystal resonators for high-sensitivity and high-resolution sensing applications. *Scientific Reports*, 12, 21292.
- [32] Hajshahvaladi, L., Kaatuzian, H. and Danaie, M. (2022). A very high-resolution refractive index sensor based on hybrid topology of photonic crystal cavity and plasmonic nested split-ring resonator. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 51, 101042.
- [33] Bauters, J.F., Heck, M.J.R., John, D., Dai D., Tien, M.C., Barton, J.S., Leinse, A., Heideman, R.G., Blumenthal, D.J. and Bowers, J.E. (2011). Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides. *Optics Express*, 19, 3163–3174.
- [34] Grande, M., Calo, G., Petruzzelli, V. and D’Orazio, A. (2012). High-Q photonic crystal nanobeam cavity based on a silicon nitride membrane incorporating fabrication imperfections and a low-index material layer. *Progress in Electromagnetic Research*, 37, 191–204.
- [35] Samanta, A., Zhou, Y., Zou, S., Yan, H. and Liu, Y. (2014). Fluorescence quenching of quantum dots by gold nanoparticles: a potential long range spectroscopic ruler. *Nano Letters*, 14, 5052–5057.
- [36] Purcell, E.M. (1946). Spontaneous emission probabilities at radio frequencies. *Physical Review*, 69, 681.
- [37] Sauvan, C., Hugonin, J.P., Maksymov, I.S., Lalanne, P. (2013). Theory of the spontaneous

optical emission of nanosize photonic and plasmon resonators. *Physical Review Letters*, 110, 237401.

- [38] Walls, D.F. and Milburn, G.J. (2008). *Quantum Optics*. 2nd edition, Springer, Berlin.
- [39] Xiao, Y.-F., Liu, Y.-C., Li, B.-B., Chen, Y.-L., Li, Y. and Gong, Q. (2012). Strongly enhanced light-matter interaction in a hybrid photonic-plasmonic resonator. *Physical Review A*, 85, 031805(R).
- [40] Liu, J.N., Huang, Q., Liu, K.K., Singamaneni, S. and Cunningham, B.T. (2010). Nanoantenna-microcavity hybrids with highly cooperative plasmonic-photonic coupling. *Nano Letters*, 17, 7569–7577.
- [41] Do, J., Sediq, K.N., Deasy, K., Coles, D.M., Rodríguez-Fernández, J., Feldmann, J. and Lidzey, D.G. (2013). Photonic crystal nanocavities containing plasmonic nanoparticles assembled using a laser-printing technique. *Advanced Optical Materials*, 1, 946–951.
- [42] Barth, M., Schietinger, S., Fischer, S., Becker, J., Nüsse, N., Aichele, T., Löchel, B., Sönnichsen, C. and Benson, O. (2010). Nanoassembled plasmonic-photonic hybrid cavity for tailored light-matter coupling. *Nano Letters*, 10, 891–895.

Dövme ve Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Inconel 625 Alaşımların Termal Yöntemle Hızlı Delinmesinde Elektrot Aşınmasının İncelenmesi

Investigation of Electrode Wear in Ultra Fast Thermal Drilling of Wrought and Additively Manufactured Inconel 625 Alloys

Ferhat CERİTBİNMEZ¹, Ali GÜNEN², Uğur GÜROL^{3,4} ve Gurel ÇAM⁵

¹ Candy Hoover Group Srl, Eskişehir, Türkiye

² Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 31200 Iskenderun-Hatay, Türkiye

³ Istanbul Gedik University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical & Materials Engineering, Istanbul, Türkiye

⁴ Gedik Welding Company, Research and Development Center, Istanbul, Türkiye

⁵ Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 31200 Iskenderun-Hatay, Türkiye

Öz

Inconel grubu alaşımlar üretildikleri 1950'li yıllardan beri havacılık, uzay, nükleer, biyomedikal endüstrisi gibi ileri mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu alaşımların daha maliyet etkenli bir yöntem olan eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliği son 20 yılda yoğun olarak çalışılmaktadır. Ancak, süper alaşımlar işlenebilirliği zor malzemeler grubunda olup, iletkenlikleri zayıf olduğundan bu alaşımların delinmesinde kullanılan elektrotlarda ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Dahası, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen bu alaşımların delinebilirliğinde kullanılan elektrotlardaki aşınmayı inceleyen sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu amaçla bu çalışmada, dövme ve eklemeli imalat tekniği ile üretilmiş Inconel 625 alaşımların, EDM ile hızlı delik delme yöntemi kullanılarak 3 mm çapında pirinç elektrotlarla delinmesi neticesinde aşınan elektrotlarda oluşan aşınma miktarları incelenmiştir. Elektrot aşınması; iş parçası üzerinden ölçülen delik çapları ve kerf açıları dikkate alınarak analitik olarak ve deneylerde aşınan elektrotların hassas terazilerle tartılması ile fiziksel olarak tespit edilmiştir. Daha tok ve kararlı bir yapıda olan dövme Inconel malzemeyi işleyen elektrodun eklemeli imalat Inconel alaşımı işleyen elektroda göre % 108,33 daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten, dövme Inconel iş malzemesinde elektrot aşınmasından kaynaklı kerf açısının eklemeli imalat Inconel malzemeye göre % 80,06 daha fazla olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Inconel 625, Tel-ark eklemeli imalat, Hızlı delik delme, EDM, Elektrot aşınması, Kerf açısı

Abstract

Inconel group alloys have been frequently preferred in advanced engineering applications such as aviation, space, nuclear and biomedical industries since the 1950s. The production of these alloys by the additive manufacturing method, which is a more cost-effective method, has been studied intensively in the last 20 years. However, superalloys are in the group of materials that are difficult to machine, and since their conductivity is weak serious damage occurs to the electrodes used in the drilling of these alloys. Moreover, there are a limited number of studies examining the wear of the electrodes used in the drillability of these alloys produced by additive manufacturing methods. For this purpose, the amount of wear on the electrodes as a result of drilling of wrought and additively manufactured Inconel 625 alloys by EDM fast drilling method using 3 mm diameter brass electrodes was investigated in this study. Electrode wear was determined analytically by considering the hole diameters and kerf angles measured on the workpiece, and physically by weighing the electrodes worn in the experiments with precision scales. It has been determined that the electrode that processed the wrought Inconel material, which has a tougher and more stable structure, wore 108.33% more than the electrode that drilled the additive-manufactured Inconel alloy. In addition, it was observed that the kerf angle due to electrode wear in the wrought Inconel material was 80.06% higher than that in the additive-manufactured Inconel alloy.

Keywords: Inconel 625, WAAM, Ultra fast drilling, EDM, Electrode wear, Kerf angle

I. GİRİŞ

Süper alaşımlar; 1000 °C'ye varan sıcaklıklara kadar yüksek yüzey kararlılığı, korozyon direnci ve mekanik mukavemetlerini koruyan bir alaşım türüdür. Bu alaşımlar geleneksel çelikler ve paslanmaz çeliklere göre daha yüksek oranda nikel, kobalt ve krom içerikleri ile oluşturulurlar. Ayrıca içeriklerinde az miktarda molibden, tungsten, niyobyum vb. refrakter elementleri içerirler [1]. Süper alaşımların çıkış serüveni düşünüldüğünde bu alaşımların paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki korozyon, oksidasyon ve mukavemet değerlerini yüksek sıcaklık uygulamalarında gösterememesinden çıktığı görülmüştür. Süper alaşımların geliştirilmesi ve literatüre kazandırılması 1950-1970 yılları arasına

2010'lu yıllara kadar süper alaşımların üretimi döküm, dövme veya toz metalurjisi yöntemlerinden biri ile üretilirdi. Bu yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri vardı. Şöyle ki döküm yöntemi seri üretim için avantajlı bir üretim prosesi olmasına karşın döküm işlemindeki katılaşma çoğu zaman segregasyon ile sonuçlanır [3,4]. Bu durum mekanik özellikleri ve korozyon direncini olumsuz etkiler. Dövme süper alaşımların üretimi genellikle eritme, döküm, dövme, ısıl işlem, işleme ve tahratsız muayene gerektirdiğinden gibi çoklu üretim süreçleri bu alaşımların cost-effective bir şekilde üretilmemesine neden olmaktadır [4]. Geleneksel döküm ve işlenmiş Ni bazlı süper alaşımlarla karşılaştırıldığında PM Ni bazlı süper alaşımlar, katılaşma ayrışmasını etkili bir şekilde ortadan kaldıracak ve böylece genel mekanik özellikleri daha da iyileştirmek için alaşım seviyelerinde artışlara izin verebilir ancak tozların mekanik alaşımlandırılması, preslenmesi, sinterlenmesi, malzeme muayenesi gibi çoklu üretim süreçlerinin yanında boyut ve karmaşık geometri sınırlamalarını içermektedir [5].

Bu üç yöntemlerdeki sınırlamalar bilim insanlarını ve endüstriyel çevreyi süper alaşımların eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliği üzerine çalışmaya yönlendirmiştir. 2000'li yıllara doğru Alman EOS firmasının direkt lazer sinterleme makinesini üretmesi metal ve alaşımlarının da eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilirliklerini başlatmıştır [6]. Eklemeli imalat yönteminde üretilecek model, özel yazılımlarla katmanlara ayrıştırıldıktan sonra üç boyutlu yazıcı yardımıyla katman katman bir parçaya dönüştürülmektedir. Eklemeli üretim sayesinde, tasarımda oldukça kolaylık sağlanmakta ve üretimi oldukça zor olan parçalar kısa sürede rahatlıkla üretilmektedir [7,8]. Ancak, döküm, dövme ve toz metalurjisi yöntemlerde olduğu gibi eklemeli imalat yönteminde sınırlamaları vardır. Bunların en önemlileri üretilen parçalarda gözlemlenen mikroyapısal heterojenlikler ve mekanik özelliklerin tekrarlanabilirliğinin zorluğudur [7]. Eklemeli imalat yöntemleriyle günümüzde polimer malzemeler, alüminyum alaşımları, çelikler ve süper alaşımların üretildiği birçok çalışmada bildirilmiştir. Havacılık,

dayanmaktadır. Süper alaşımlar ilk olarak endüstride gaz türbinlerinde kullanılmak amacıyla geliştirilmiş olsa da günümüzde bu alaşımlar uzay ve havacılık endüstrisinde, nükleer endüstri, kimya endüstrisi, fırın parçalarında, korozif etkili kimyasalların muhafaza ve taşınmasında kullanılan potalarda ve petrol rafineri tesisleri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanım alanı bulunmaktadır [2]. Özellikle süper alaşımların havacılık endüstrisinde uçak ve endüstriyel gaz türbinlerinde civatalar, şaftlar, sabit kanatçıklar ve yanma odalarında kullanımı bulunmaktadır. Çevirimli motorlarda turbo şarjlar, egzoz valfleri, sıcak bujiler, valf-yatağı saplamalarında kullanılmaktadır [2].

uzay, nükleer, medikal, ısıl işlem ekipmanları gibi ileri mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarından dolayı süper alaşımların eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirlikleri özel bir yere sahiptir. Süper alaşımlar içeriğindeki ana alaşım elementine bağlı olarak demir esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve Ni-esaslı süper alaşımlar olarak 3'e ayrılır [8]. Demir esaslı süper alaşımlara göre daha yüksek sıcaklık dayanımlarına sahip olmakla birlikte kobalt esaslı süper alaşımlara göre daha cost-effective olması dolayısıyla Ni esaslı süper alaşımlar diğer iki alaşıma göre daha yaygındır [9-16]. Ni esaslı süper alaşımların kullanım alanlarının başında havacılık endüstrisidir. Gelişmiş uçakların ağırlığının %40'ından fazlasının bu alaşımlardan oluştuğu bildirilmiştir [17]. Bu alaşımların uçaklardaki kullanım yerleri düşünüldüğünde havacılık motoru bileşenleri, gaz türbini sıcak uç bileşenleri gibi uçakların başlıca yapısal parçalarıdır [18,19]. Ni esaslı süper alaşımlar içerisinde ise Inconel 625 zorlu yüksek sıcaklık dayanımları sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan ve ticari olarak temin edilebilen Ni bazlı süper alaşımların en yaygın olanıdır [20]. Bu alaşımların uçaklardaki kullanım yerleri düşünüldüğünde bu alaşımların birleştirme işlemleri için delinmesi, perçin yuvalarının açılması vb. birçok ikincil işlem gerektirdiği anlaşılmaktadır. Yapılan bu işlemler sonrasında malzeme yüzey kalitesinin iyi olması gerekmektedir [21] Karataş ve Gökkaya [22] küçük uçaklarda yaklaşık yüz bin, büyük uçaklarda ise neredeyse bir milyondan fazla montaj deliği bulunduğunu bildirmişlerdir. Ancak, Ni esaslı süper alaşımlar "delinmesi zor" malzemeler (Süper alaşımlar, Zr alaşımları ve WC alaşımları) grubu içerisinde yer alır [23-25].

Bu durum süper alaşımların sahip olduğu çok zayıf termal iletkenlikleri dolayısıyla sürtünmeden kaynaklı ısıyı üzerlerinden zor atmalarının bir sonucudur. Bu durum işleme takımları üzerinde ciddi hasarlara neden olur. Bu delinmesi zor malzeme gruplarının delinmesi için tel erozyon dalma EDM (Electrical Discharge Machining- elektrik deşarjlı işleme) prosesi gibi geleneksel olmayan işleme yöntemleri kullanılır, çünkü bunlar, sertlik ve erime sıcaklığından bağımsız olarak

sert alaşımları yüksek doğruluk ve mükemmel finisajla delebirlirler [26-28]. Literatür incelendiğinde döküm ve dövme yöntemiyle üretilen süper alaşımların bu yöntemlerle delinebilirliği üzerinde çalışmalar olmakla beraber eklemeli imalat yöntemiyle üretilen numunelerin delinebilirliği üzerine literatürde sınırlı sayıda çalışmanın olduğu (ya da olmadığı) görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalardan bazıları:

Choudhary ve arkadaşları, Inconel 600 süper alaşımının EDM yönteminde işlenmesinde işleme parametrelerinin elektrot aşınma oranı (TWR - Tool Wear Rate) için optimizasyonu Taguchi yaklaşımı ile çalışmışlardır. Analizlerde değişken parametreler olarak ark süresi (T_{on} - pulse-on-time), akım (I_p - peak current), and voltaj (V_g - gap voltage) seçerek elektrot olarak tungsten karbür (WC), dielektrik sıvı olarak EDM sıvısı kullanmışlardır. Akımın (I_p) artmasıyla TWR'in doğrusal olarak arttığını, voltajın (V_g) artmasıyla önce azaldığını daha sonra tekrar artış eğilimine girdiğini, ark süresinin (T_{on}) artışıyla önce arttığını daha sonra azalış eğilime girdiğini rapor etmişlerdir. Optimum TWR ($0.551 \text{ mm}^3/\text{min}$) için I_p (30 A), V_g (94 V) ve T_{on} (150 s) çalışma parametrelerini önermişlerdir [29]. Sahoo ve arkadaşları [30], Inconel 625 alaşımının dalma erozyon EDM yönteminde işlenmesinde kullanılan işleme parametrelerinin Taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Giriş parametreleri olarak ark süresi, dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve akım seçilerek çıktı parametreleri olarak talaş kaldırma oranı (MRR - material removal rate) ve elektrot aşınma oranı (TWR) analiz edilmiştir. Inconel 625'in EDM ile işlemede en çok akım (etkisi %78 civarındadır) ve ark süresi (etkisi %18) parametrelerinden etkilendiğini vurgulayarak; maksimum MRR ve minimum TWR için ark süresi 110 μs , akım 5 A ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı 7.5 psi değerlerini önermişlerdir [30]. Singh and Singh, korozyona karşı oldukça dirençli malzeme türü olan Inconel 600 nikel - krom süper alaşımının oldukça kırılğan olmasından dolayı konvansiyonel yöntemlerle işlenmesinin uygun olmadığını bildirmiştir. Bu malzemeleri EDM yönteminde 14 mm çapında bakır, pirinç ve bakır-tungsten elektrotlarla işleyerek talaş kaldırma oranı (MRR), elektrot aşınma oranı (EWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) değerlerini Anova ile analiz etmişlerdir. EWR üzerine en çok etki eden parametrelerin elektrot cinsi ve akım olduğunu; optimal EWR için (bakır-tungsten), akım 9 A, ark süresi 120 μs ve voltaj 40V değerlerinin kullanılmasını önermişlerdir. Bakır-tungsten elektrodun bakır ve pirinç elektroda göre daha düşük EWR sergilediğini vurgulamışlardır [31].

Urtekin ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde elektrolitik-bakır (E-Cu) ve bakır-berilyum (Cu-Be) takım elektrotlarının performansının karşılaştırılması üzerine çalışma yapmıştır. Cu-Be elektrotlarla işlemede MRR'de bir

artış, TWR'de ve relatif aşınmada ($RW = TWR / MRR$) bir azalma gözlemlemişlerdir. CuBe alaşımının yüksek hammadde maliyeti, bu elektrotların endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasında önemli bir dezavantaj olduğunu bildirmişlerdir. Düşük ve yüksek akım ayarlarında E-Cu'nun hammadde maliyetinin düşük olduğunu bu durumun onu daha avantajlı hale getirdiğini rapor etmişlerdir. Cu-Be alaşımı, daha yüksek MRR ve daha düşük relatif aşınma (RW - relative wear) değerleri göz önüne alındığında, E-Cu'dan daha iyi performans gösteren bir elektrot malzemesi olarak kabul edilmiştir [32]. Opoz ve arkadaşları [33], hidroksiapatit (HA) tozu katkılı elektro erozyon ile işlenen Ti6Al4V yüzeylerini incelemiştir. Deiyonize sudaki farklı HA konsantrasyonları EEI sırasında deneysel bir değişken olarak test etmişler. Hidroksiapatit tozu katkılı EEI'nin yüzeylerinin diğer yüzeylere kıyasla daha yüksek hidrofilik özellik sergilediğini bildirmişlerdir. HA tozu katkılı EEI'nin, titanyum alaşımları gibi biyomalzemelerin yüzey modifikasyonu için umut verici bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır [33]. Yuvaraj ve arkadaşları ise, Inconel 625 malzemesinin EDM yönteminde işlenmesinde dielektrik sıvı içerisine titanium karbür nano tozlar ekleyerek kesim verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir [34].

Literatür çalışmaları incelendiğinde EDM yönteminde Ni ve Ti gibi alaşımları içeren malzemelerin işlendiği, işleme parametrelerinin etkilerinin analiz edildiği, farklı katkı malzemelerin deiyonize sudaki katkılarının raporlandığı görülmüştür. Fakat dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 alaşımının EDM ile delinmesi ve kullanılan elektrotların aşınması konusunda literatürde büyük açık vardır. Bu sebeple bu çalışma akademik ve endüstriyel uygulamalar için önemli bir referans olma potansiyeli barındırmaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Dövme ve eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625 test malzemeleri

Bu çalışmada, dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Inconel 625 malzemeler kullanılmıştır. Eklemeli imalat yöntemi olarak diğer yöntemlere nispeten daha büyük boyutların daha düşük maliyetlerle üretilmesine olanak sağlayan tel-ark eklemeli imalat (wire arc additive manufacturing - WAAM) yöntemi kullanılmıştır. WAAM numunelerinin üretiminde 1,2 mm çapında ER NiCrMo dolu tel kullanılmıştır. Kullanılan telin kimyasal bileşimi üretici firma tarafından % ağırlıkça 64,86 Ni, 21,15Cr, 8,67 Mo, 3,54Nb, 1,15 Fe ve arta kalan diğer katışıklar olarak belirtilmiştir. Biriktirme işlemi Gedik kaynak atölyesinde bulunan 6 eksenli OTC Daihen FD-V8L robotuna entegre su soğutmalı torçlu GeKa-Tec WB 500L makinesinde 150 A, 15.8 V, 50 cm/min hız ve 97,5% Ar + 2,5% CO2 koruyucu gazın 15 L/dk akış hızı parametreleri ile S304 çelik üzerine $350 \times 75 \times 12$ mm olacak şekilde parçalar üretilmiştir. Birçelik A.Ş'den çözeltiliye alama tavı yapılmış halde temin

edilen dövme Inconel 625 süper alaşımı ve WAAM Inconel 625 alaşımı malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Üretim sonrası yüksek yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi amacıyla numuneler freze tezgahında WEDM tezgahı kullanılarak 30x10x5 mm ölçülerine kesilmiştir. Daha sonra, Şekil 1’de gösterildiği gibi, hassas mengene aparatları kullanılarak EDM tezgahına bağlanmıştır.

2.2. EDM ile hızlı delik delme

Bu çalışmada her bir delik delme işleminde \varnothing 3 mm dış çap - \varnothing 1,5 mm iç çapı olan pirinç elektrot tüpler kullanılmıştır. Deneyler Oscarmax SD 400 ZNC PLUS 50 Amper gücünde hızlı delik delme EDM (Electric Discharge Machining) makinasında gerçekleştirilmiştir. Erozyon işlemi, Şekil 1’de gösterildiği gibi, elektrot ve iş parçası arasındaki talaşın tahliyesi için elektrot içerisinde ve spiral hortumlar ile elektrot dışından dielektrik sıvı (saf su) püskürtülerek dielektrik sıvı altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma parametrelerinin seçiminde pirinç elektrot ve makina güvenli çalışma parametreleri dikkate alınarak 7A akım, 29 μ s ark süresi, 3 μ s bekleme süresi (Toff) ve 3V voltaj değerleri kullanılmıştır.

2.3. Kerf açısı ve EWR hesaplamaları

Termal yöntemler kullanılarak delinen deliklerin giriş

çapları ve çıkış çapları arasında elektrot aşınmasına bağlı olarak ölçüsel farklılıklar olur. Çünkü elektrodun işlem başlangıcındaki ölçüleri ile işlem sonundaki ölçüleri aynı değildir. EDM teknolojisinde elektrot formu iş parçası üzerinde boşaltılır. Elektrot uc kısımlarında kıvılcımlanma yoğun olduğu için aşınma o bölgede olur. İş parçası üzerinde elektrot aşınmasına bağlı olarak oluşan kerf açısı, Eşitlik 1’de verilen denklem yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte belirtilen Hen elektrodun iş parçasına girişte açtığı delik giriş çapı, Hex ise elektrodun iş parçasından çıktığı anda oluşturduğu delik çıkış çapıdır. İş parçası kalınlığı olan t ise iş parçasının kalınlığıdır [35]. Delik giriş ve çıkış farklılıklarından kaynaklanan kerf açısı T ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

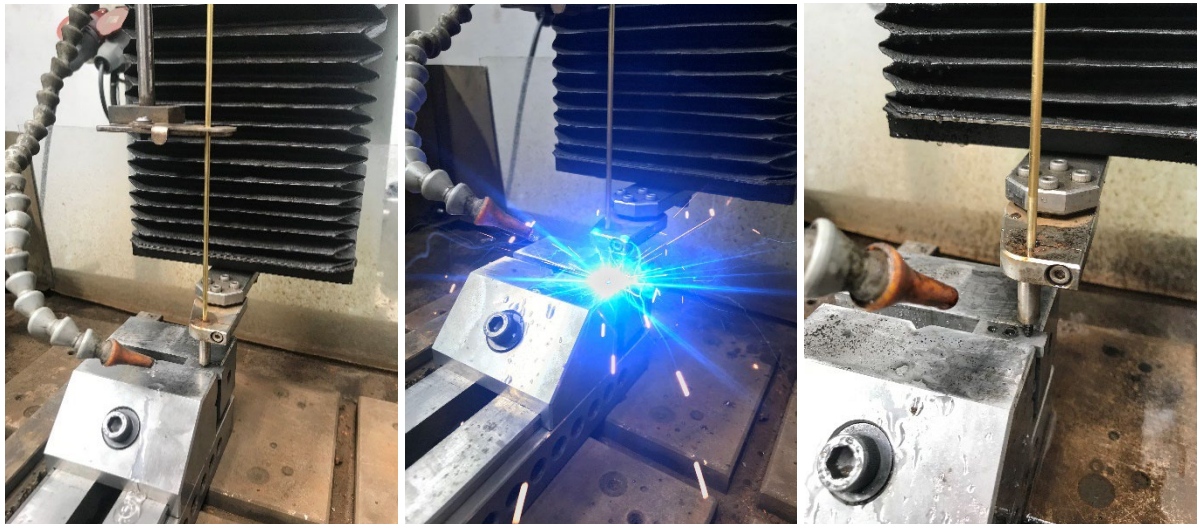
$$\text{Kerf Konik Açısı (T)} = \text{Arctan} (D_g - D_c / 2.t) \quad (1)$$

EDM işleminde kullanılan elektrotların işlem başlangıcındaki ağırlıkları ile işlem sonundaki ağırlıkları aynı değildir, çünkü aşınmalarından dolayı kütle kaybı yaşarlar. Bu kütle kaybıyla ortaya çıkan elektrot aşınma miktarı (EWR), Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{EWR (\%)} = (\text{İlk ağırlık} - \text{Son ağırlık} / \text{İlk ağırlık}) \cdot 100 \quad (2)$$

Tablo 1. Çalışmada kullanılan dövme ve WAAM Inconel 625 alaşımlarının ağırlıkça % kimyasal bileşimi

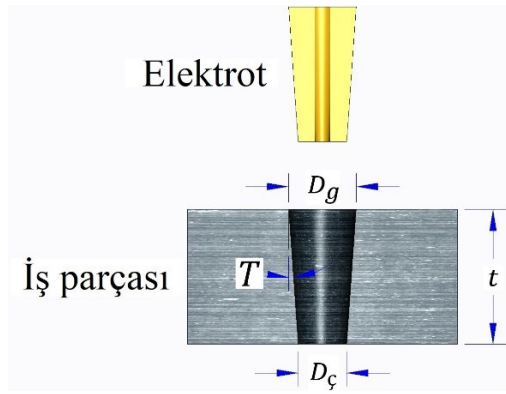
Malzeme	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ta	Diğer elementler
Dövme	61,30	22,91	1,92	3,35	9,94	0,11	0,47
WAAM	60,95	23,45	1,87	3,78	9,62	0,10	0,22



Şekil 1. EDM hızlı delik delme: (a) delme öncesi (b) delme anı ve (c) delme sonrası

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan tüm deneyler sonrası iş parçası üzerinde elde edilen delik giriş çıkış çapları ve bu çap farklılıklarından kaynaklı kerf ölçüleri Tablo 2’de verilmiştir. İş parçası üzerindeki delik çaplarının ölçümlerinde en az 3 farklı ölçüm yapılarak ortalama değerler yüksek hassasiyete sahip Mitutoyo kumpas kullanılarak tespit edilmiştir. Tüm deneylerde delik giriş çaplarının delik çıkış çaplarından daha büyük olduğu görülmüştür. Dövme malzemenin delinmesinde elektrot aşınması eklemeli imalat ile üretilmiş malzemenin delinmesine göre daha fazla olduğu için kerf açısı dövme alaşımın delinmesinde daha yüksek çıkmıştır.



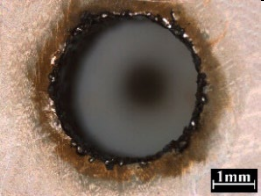
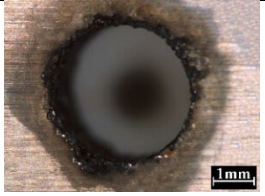
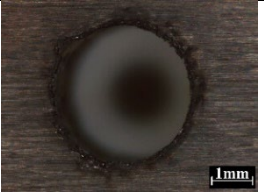
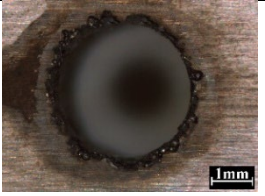
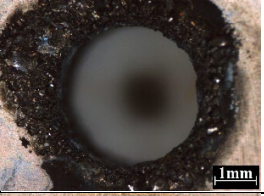
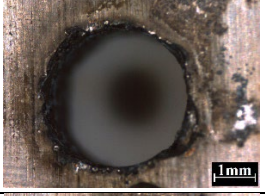
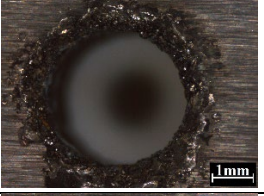
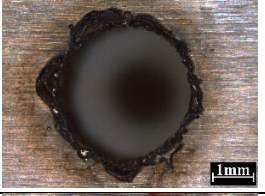
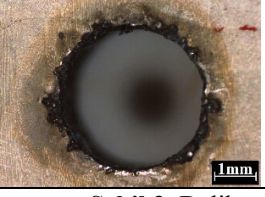
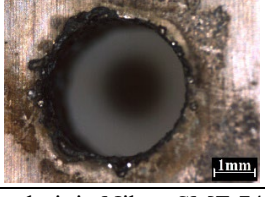
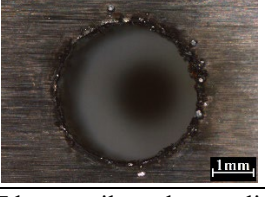
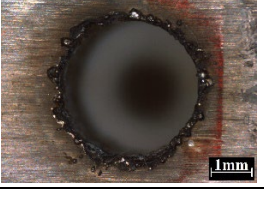
Şekil 2. Kerf konik açısı ölçümü

Delinen iş parçasının giriş ve çıkış bölgelerinin makro görüntüleri Nikon SMZ 745T mikroskop kullanılarak elde edilerek Şekil 3’te gösterilmiştir. Tüm delik giriş ve çıkış bölgelerinde yüksek ısı neticesinde ergimiş ve tekrar katılaşmış malzeme kalıntıları görülmektedir.

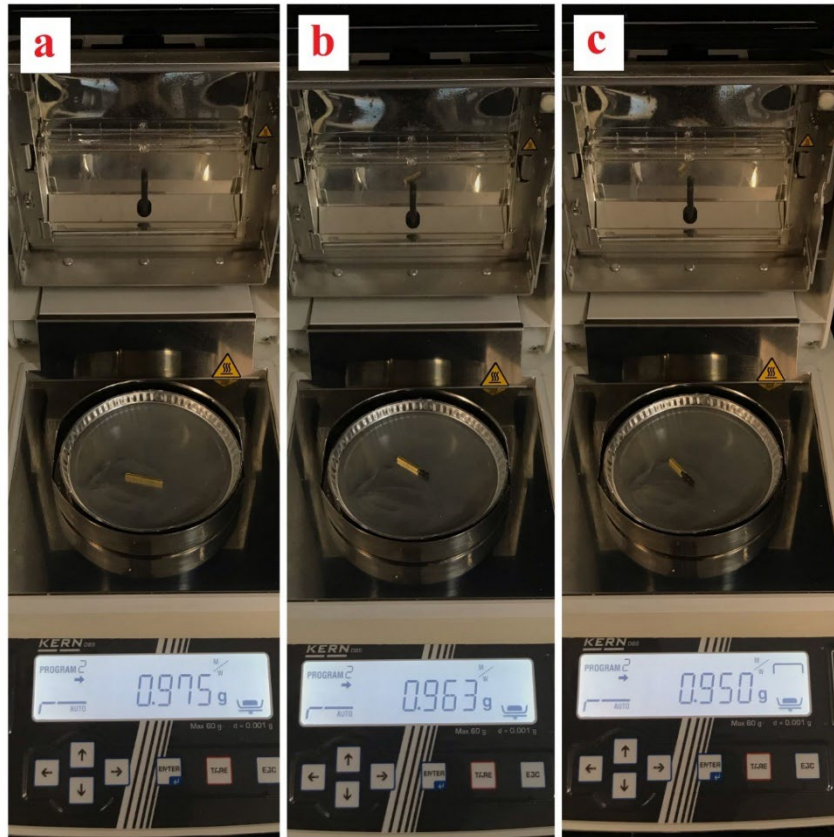
Deneylerde kullanılan tüm elektrotların işleme öncesi ve sonrası ağırlıkları 0,001 g hassasiyete sahip Kern DBS60-3 terazi ile tespit edilmiştir. Şekil 4’te elde edilen tartım verileri ve Eşitlik 2’deki eşitlik kullanılarak hesaplanan EWR değerleri incelendiğinde, eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625 numunenin işlenmesinde EWR % 1,23 iken dövme Inconel 625 alaşımın işlenmesinde EWR % 2,56 olarak tespit edildiği görülmektedir. EDM işleminde elektrotlardan (anot) iş parçasına (katot) doğru yoğun kıvılcım atlamaları olur. Bu süreçte iş parçası üzerinde yüksek ergime ve buharlaşmadan ötürü parçalar kopar ortama püskürtülen dielektrik sıvı (saf su) yardımı ile bu partiküller aniden soğur ve katılarak ortamdan tahliye edilir. Bu süreçte elektrot uç kısımlarında da aşınma meydana gelir. Uç kısımları aşınan elektrodun formu iş parçası üzerinde boşaltıldığı için iş parçası üzerinde meydana gelen boşlukta da kerf koniklik açısı oluşur. Bu değerler Şekil 5’te gösterilmiştir. Eklemeli imalat ile üretilmiş ve dövme numunelerin kesimlerde kullanılan elektrotların uc ve yan kenar aşınmalarının makro analizleri Şekil.6’da gösterilmiştir.

Tablo 2. İş parçaları üzerinde ölçülen delik çapları ve kerf açıları

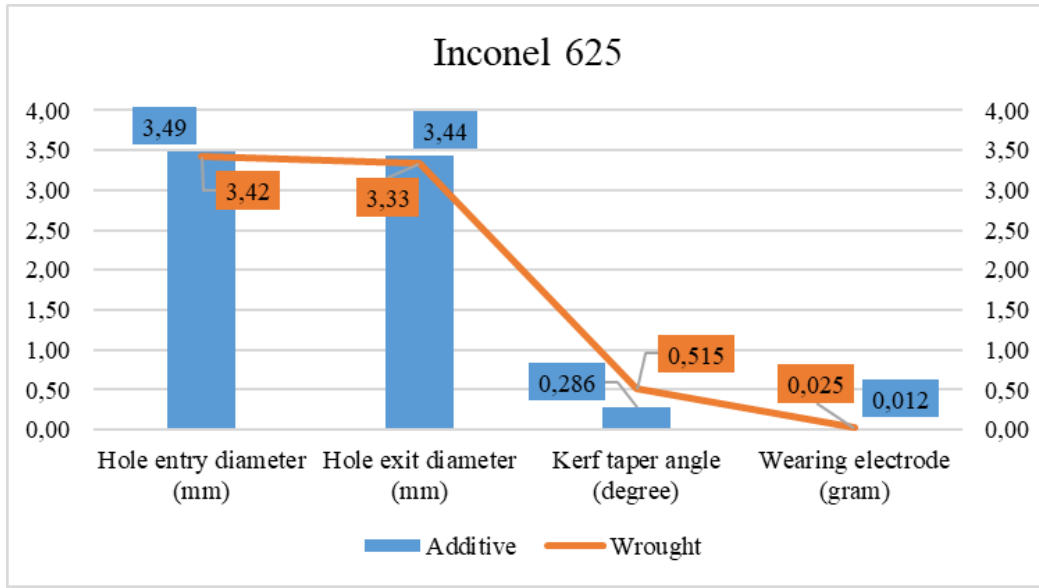
Inconel 625	Test Sayısı	Delik giriş çapı (mm)	Delik çıkış çapı (mm)	Kalınlık (mm)	Kerf (derece)
Eklemeli İmalat	1	3,48	3,44	5	0,229
	2	3,50	3,44	5	0,343
	3	3,48	3,44	5	0,229
	ortalama	3,49	3,44	5	0,286
Dövme	1	3,40	3,38	5	0,114
	2	3,44	3,30	5	0,802
	3	3,42	3,32	5	0,572
	ortalama	3,42	3,33	5	0,515

Test No	Eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625		Dövme Inconel 625	
	Delik girişi	Delik çıkışı	Delik girişi	Delik çıkışı
1				
				
				

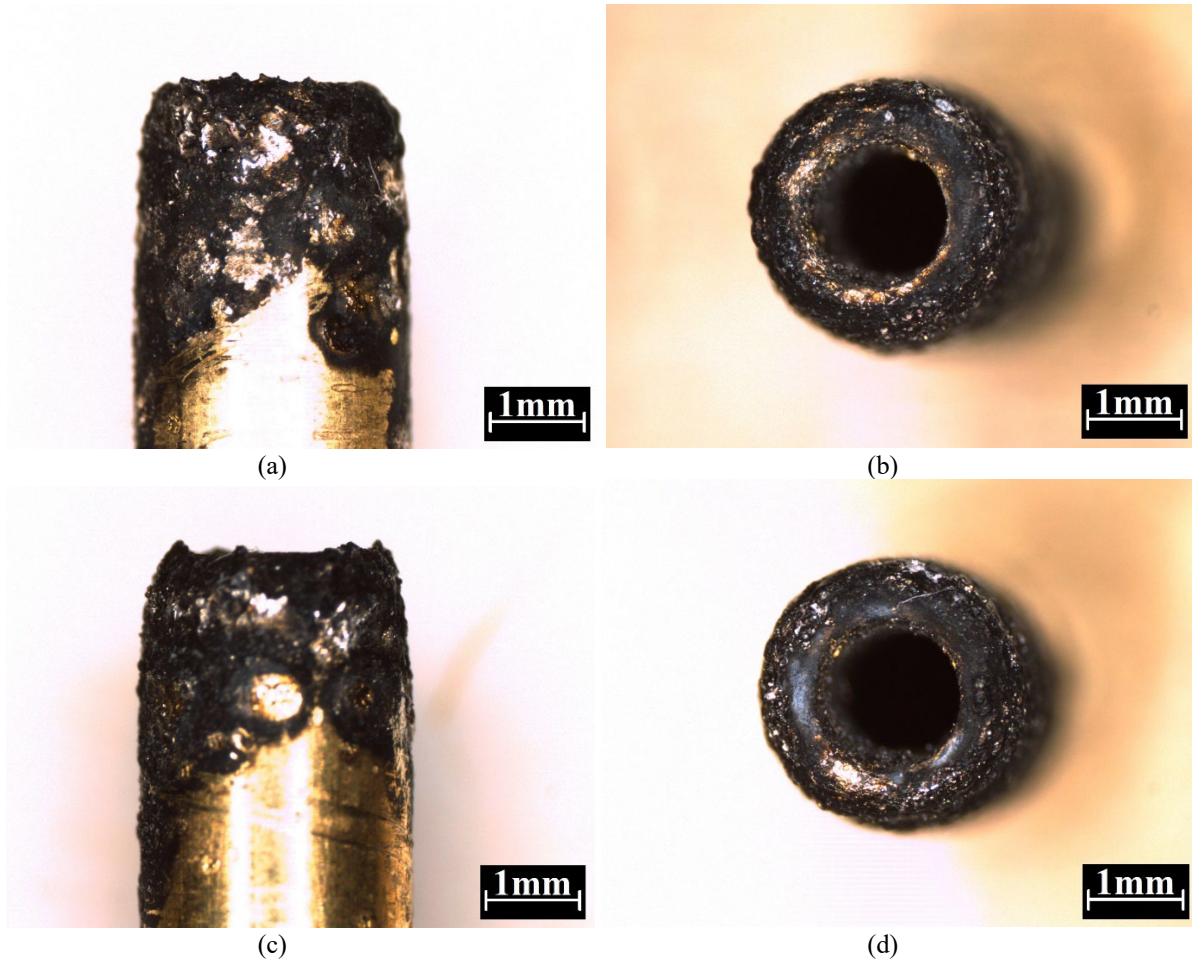
Şekil 3. Delik yüzeylerinin Nikon SMZ 745T kamera ile makro analizi



Şekil 4. Elektrot tartım işlemi (a) Pirinç elektrot (b) Eklemeli işleme ve (c) Dövme işleme



Şekil 5. Test sonuçlarının grafiksel gösterimi



Şekil 6. Pirinç elektrotların makro analizi: (a), (b) eklemeli imalatla üretilmiş numunenin delinmesi ve (c), (d) dövme numunenin delinmesi

Aşınan elektrotların SEM analizleri incelendiğinde işlem görmüş bölgelerinde, Şekil 7 (a) ve (b)'den görüleceği üzere, **çatlaklar**, **boşluklar**, **baloncuklar**, **kraterler** ve **kalıntılar**ın varlığı tespit edilmiştir.

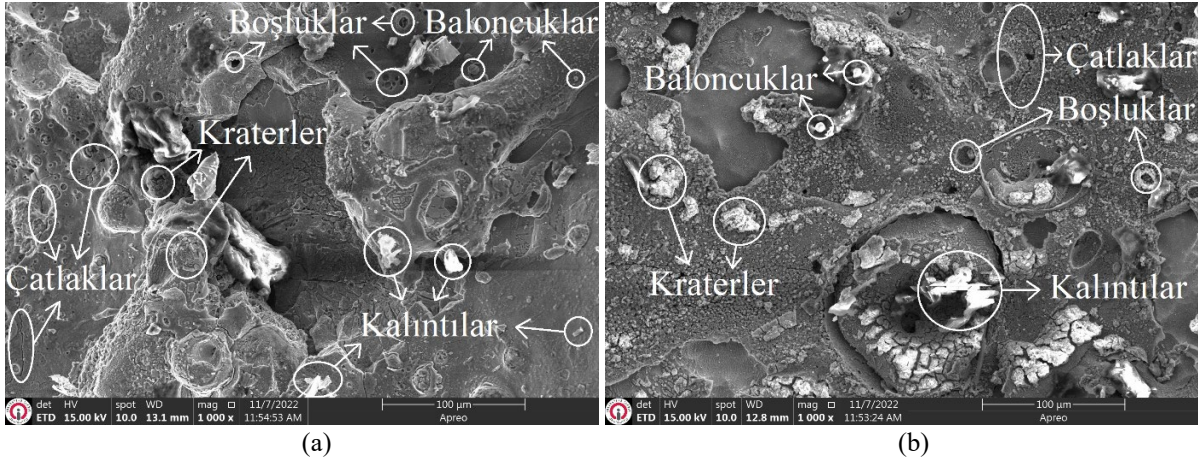
Yüksek sıcaklık ile eriyen metalin katılaşması sırasında hapsolan gazlar baloncukları oluşturur. Katılaşma esnasında bu **baloncuklar (globules)** patlar ise boşlukları oluşturur. Yüzeyde oluşan bu baloncuk

ve boşluklar yüzey morfolojisine direkt olarak etki etmektedir [36]. Yüksek sıcaklıklarla ergiyen iş parçası ve elektrot kalıntılarının yüzeyde katılaşması esnasında dielektrik sıvının daha düşük sıcaklıklarda temas etmesi neticesinde çatlaklar meydana gelir. Aşınan iş parçası ve elektrot kalıntılarının işlenmiş yüzeylerden tamamen arındırılmaması neticesinde de kalıntılar gözlemlenir.

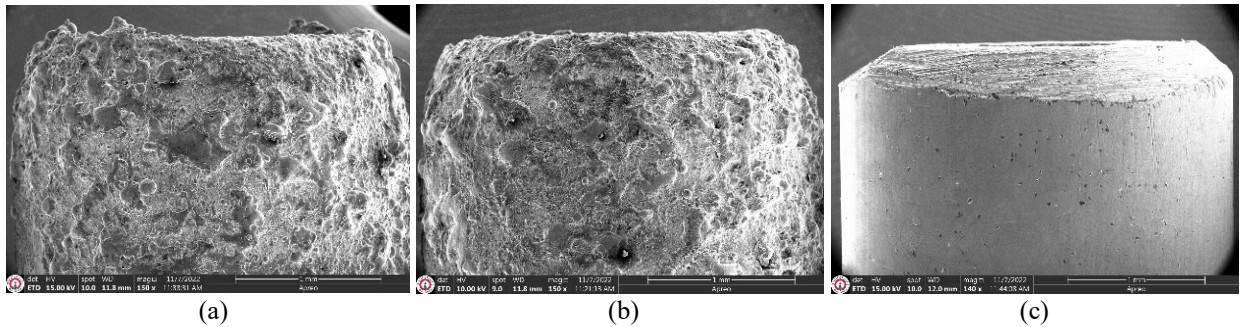
Deneysel olarak kullanılan işlem görmüş elektrotlar ile kullanılmamış elektrotların SEM görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8 (a) and (b)’de, elektrot yüzeylerinden de ısı ve ergime neticesinde parçalar kopmuş (aşındığı) bu sebeple yüzeylerinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. İşlem görmemiş elektrot yüzeyinin daha pürüzsüz ve düzgün olduğu görülmüştür (Şekil 8 (c)). EDM işlemi esnasında iş parçasından kopan partiküllerinde elektrot üzerine yapışma ihtimali vardır ve bu durum elektrot aşınmasına etki edebilir.

EDM gibi termal yöntemlerle delik delme esnasında yüksek sıcaklıklar altında aşınan ve buharlaşan iş parçası ve elektrot malzeme kalıntılarının ortamdan tahliye edilmesi için kullanılan su bazlı dielektrik sıvıların kimyasal tepkimeler sonucu hidrojen ve oksijene dönüşmesiyle iş parçası ve elektrot üzerinde oksit tabakası oluştuğu bilinmektedir [37].

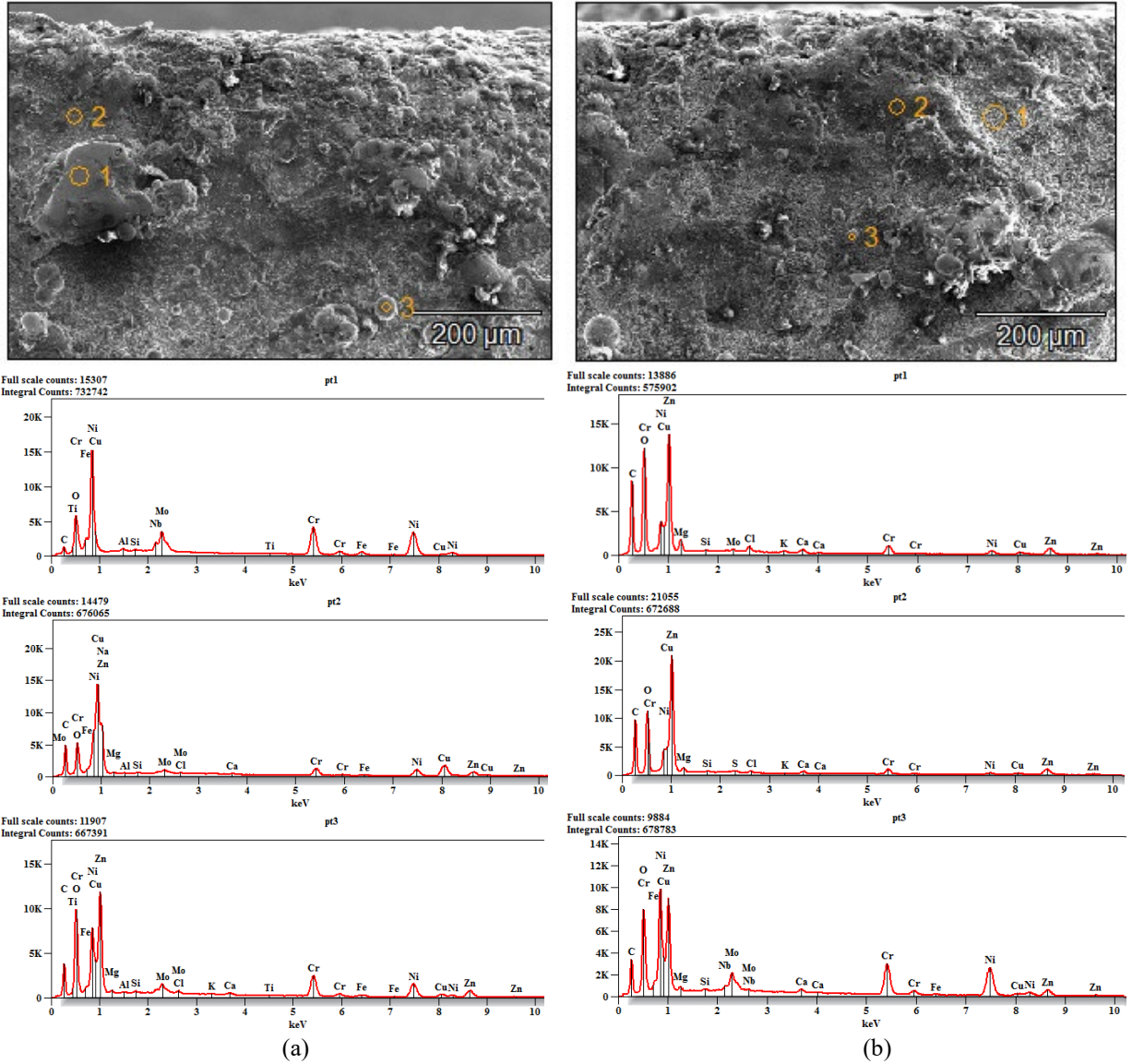
Şekil 9 (a) ve (b)’de görüldüğü üzere, her iki elektrot üzerinde aşınmış iş parçası kalıntılarını gösteren C, O, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Nb, Mo gibi iş parçası ve oksit kalıntıları ile Cu ve Zn gibi pirinç elektrot kalıntıları tespit edilmiştir. Dövme Inconel numuneyi işleyen elektrot üzerinde tespit edilen Cu ve Zn element kalıntılarının ağırlıkça oranının, eklemeli imalatla üretilmiş numuneyi işleyen elektrota göre % 1,37 daha fazla tespit edilmiştir. Bu durum EWR değerlerini ve hassas terazi ölçüm sonuçlarını destekler nitelikte olmuştur.



Şekil 7. Elektrot yüzeylerinin SEM analizi: (a) eklemeli imalatlı numunede delme işleminde ve (b) dövme numunede delme işleminde kullanılan elektrot



Şekil 8. Elektrot yüzeylerinin SEM analizi: (a) eklemeli imalatlı numunede, (b) dövme numunedeki delme ve (c) işlem görmemiş



Şekil 9. Elektrot yüzeylerinde gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri: (a) eklemeli imalatla üretilmiş numunedeki delme işlemi ve (b) dövme numunedeki delme işlemi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 alaşımların termal yöntemle hızlı delinmesinde karşılaşılan elektrot aşınması SEM ve EDS kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca 0,01 mm hassasiyete sahip kumpaslarla yapılan analitik ve 0,001 gram hassasiyete sahip terazi kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarına göre aşağıdaki bulgular raporlanmıştır;

- Deneylerde kullanılan elektrotların hassas tartımları neticesinde dövme Inconel malzemenin işlenmesinde kullanılan elektrodun 0,025 gr, eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel malzemenin işlenmesinde kullanılan elektrodun ise 0,012 gr aşındığı ölçülerek; elektrot açısından dövme malzemeyi işleyen elektrodun eklemeli imalatla üretilmiş Inconel numuneyi işleyen elektroda göre

% 108,33 daha fazla aşındığı tespit edilmiştir.

- Dövme Inconel 625'in delinmesinde elektrot aşınması eklemeli imalatla üretilen Inconel numunelere göre arttığından dolayı daha küçük delik giriş ve çıkış çapları elde edilmiştir. Dövme Inconel numuneyi delen elektrodun işlem gören kısımlarının çap ölçüsünün eklemeli imalatla üretilmiş Inconel numuneyi delen elektrota göre daha düşük olduğu yani yanıl aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Dövme Inconel iş malzemesinde elektrot aşınmasından kaynaklı kerf açısı eklemeli imalat Inconel malzemeye göre % 80,06 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Yapılan tüm deneysel çalışmalarda iş parçası delik giriş ve çıkış bölgelerinde ergimiş metal kalıntıları (debris) tespit edilmiştir.
- Eklemeli imalatla üretilmiş Inconel 625 numunenin işlenmesinde EWR % 1,23 iken,

dövme Inconel 625 işlemede % 2,56 olarak tespit edilmiştir.

- SEM ve EDS analizlerine göre dövme Inconel numuneyi işleyen elektrot üzerinde tespit edilen Cu ve Zn element kalıntılarının ağırlıkça oranı eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel numuneyi işleyen elektrotta göre % 1,37 daha fazla tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Tel-ark eklemeli imalat (WAAM) ile Inconel 625 parça üretimi sırasında teknik destekleri için İstanbul-Türkiye'deki Gedik Kaynak Ar-Ge Merkezi'ne teşekkürü borç biliriz. Ayrıca, Oscarmax SD400 EDM'de gerçekleştirilen delme işlemlerinde teknik destekleri için Haier Europe, Candy-Hoover, Eskişehir-Türkiye Kalıp Departmanı personeline ve mikroskop görüntülerinin elde edilmesindeki desteği için MEGEM (Mesleki Eğitim ve Geliştirme Merkezi), Eskişehir-Türkiye, Mekanik Test Laboratuvarı Teknik Müdürü Yasin YİĞİT'e ve Teknik Öğretmen Yasin ÖZEN'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Tin, S., Hardy, M., Clews, J., Cormier, J., Feng, Q., Marcin, J., ... & Suzuki, A., Superalloys (2020).
- [2] Reed, R.C., The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge University Press (2008).
- [3] Sjöberg, G., Casting superalloys for structural applications. *In 7th international symposium on superalloy*, vol. 718, pp. 117-130, (2010).
- [4] Yang, S.F., Yang, S. L., Qu, J. L., Du, J. H., Gu, Y., Zhao, P., & Wang, N., Inclusions in wrought superalloys: a review. *Journal of Iron and Steel Research International*, 28(8), 921-937, (2021).
- [5] Sreenu, B., Sarkar, R., Kumar, S.S., Chatterjee, S., & Rao, G.A., Microstructure and mechanical behaviour of an advanced powder metallurgy nickel base superalloy processed through hot isostatic pressing route for aerospace applications. *Materials Science and Engineering A*, 797, 140254, (2020).
- [6] Wohlers, T., & Gornet, T., History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 118, (2014).
- [7] Guler, S., Serindag, H.T., & Çam, G., Wire arc additive manufacturing (WAAM): Recent developments and prospects, *Engineer and Machinery*, 63(706), 82-116, (2022). <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1085716>.
- [8] Cam, G., Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM), *Mater Today Proc*, 62(1), 149-198 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>.
- [9] Ozer, G., A review on additive manufacturing technologies, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 606-621, (2020). <https://hdl.handle.net/11352/3583>.
- [10] Graybill, B., Li, M., Malawey, D., Ma, C., Alvarado-Orozco, J. M., & Martinez-Franco, E., Additive manufacturing of nickel-based superalloys. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Vol. 51357, s. V001T01A015. American Society of Mechanical Engineers (2018). <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6666>.
- [11] Çavdar, F., Günen, A., Kanca, E., Er, Y., Gök, M. S., Campos-Silva, I., & Olivares-Luna, M., An experimental and statistical analysis on dry sliding wear failure behavior of Incoloy 825 at elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-24, (2022). <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07381-4>.
- [12] Cam, G., Fischer, A., Ratjen, R., dos Santos, J.F., Kocak, M., Properties of Laser Beam Welded Superalloys Inconel 625 and 718. *in Proc. of 7th European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT '98*, September 21-23, 1998, Hannover, Germany, ed. B.L. Mordike, pub. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, pp. 333-338, (1998).
- [13] Çam, G., Koçak, M., Progress in joining of advanced materials - Part II: Joining of metal matrix composites and joining of other advanced materials. *Sci Technol Weld Join*, 3 (4), 159-175, (1998). <https://doi.org/10.1179/stw.1998.3.4.159>.
- [14] Çam, G., Koçak, M., Progress in joining of advanced materials. *Int Mater Rev*, 43(1), 1-44, (1998). <https://doi.org/10.1179/imr.1998.43.1.1>.
- [15] Ceritbinmez F., Günen A., Gürol U., Çam G., A comparative study on drillability of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 150-169 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.072>.
- [16] Günen A., Gürol U., Koçak M., Çam G., Investigation into the influence of boronizing on the wear behavior of additively manufactured Inconel 625 alloy at elevated temperature, *Progress in Additive Manufacturing*, (2023). <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00398-8>.
- [17] Wu, C. Li, X. Xia, H. Liang, Q. Qi, Y. Liu, Precipitate coarsening and its effects on the hot deformation behavior of the recently developed γ' -strengthened superalloys, *J. Mater. Sci. & Tech.*, 67, 95-104, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.025>.
- [18] Hu, Y., Lin, X., Li, Y., Ou, Y., Gao, X., Zhang, Q., Li, W., Huang, W., (2021). Microstructural evolution and anisotropic mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by directed energy deposition, *J. Alloy. Compd.*, 870, 159426, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159426>.
- [19] Luo, J., Yu, W., Xi, C., Zhang, C., Ma, C., Preparation of ultra fine-grained GH4169 superalloy by high-pressure torsion and analysis of grain refinement mechanism, *J. Alloy. Compd.*, 777, 157-164, (2019). <https://doi.org/10.1016/>

- j.jallcom.2018.10.385.
- [20] Shahwaz, M., Nath, P., & Sen, I., A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based superalloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 164530, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164530>.
- [21] Soydan, O., Göv, K., Eyerciöglü, Ö., Surface finishing of aerospace materials. *El-Cezeri*, 7, 700-709, (2020). <https://doi.org/10.31202/ecjse.691548>.
- [22] Karataş, M.A., & Gökaya, H., A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>.
- [23] Parida, A.K., & Maity, K., Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3), 364-370, (2018).
- [24] Waghmode, S.P., & Dabade, U.A., Optimization of process parameters during turning of Inconel 625. *Materials Today: Proceedings*, 19, 823-826, (2019).
- [25] Datta, S., Biswal, B.B., & Mahapatra, S.S., Machinability analysis of Inconel 601, 625, 718 and 825 during electro-discharge machining: on evaluation of optimal parameters setting. *Measurement*, 137, 382-400, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.065>.
- [26] Günen, A., Ceritbinmez, F., Patel, K., Akhtar, M. A., Mukherjee, S., Kanca, E., & Karakas, M.S., WEDM machining of MoNbTaTiZr refractory high entropy alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 547-559, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.021>.
- [27] Mishra, D.K., Rahul, Datta, S., Masanta, M., & Mahapatra, S.S., Through hole making by electro-discharge machining on Inconel 625 super alloy using hollow copper tool electrode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), 348-370, (2019). <https://doi.org/10.1177/0954408918784701>.
- [28] Ceritbinmez, F. & Kanca, E., The effects of cutting parameters on the kerf and surface roughness on the electrode in electro erosion process. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2), 335-346, (2021). <https://doi.org/10.29109/gujsc.913417>.
- [29] Choudhary, S.K., Jadoun, R.S., & Singh, P., Optimization of EDM process parameters for TWR on machining of Inconel 600 superalloy using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2281-2288, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.059>.
- [30] Sahoo, S.K., Thirupathi, N., & Saraswathamma, K., Experimental investigation and multi-objective optimization of die sink EDM process parameters on inconel-625 alloy by using utility function approach. *Materials Today Proceedings*, 24, 995-1005, (2020).
- [31] Singh, B., & Singh, M., Performance of different electrode materials in Electric Discharge Machining (EDM) Inconel 600. *In Proceedings of 12th IRF International Conference*, 29th June-2014, Pune, India, pp. 68-71, (2014).
- [32] Urtekin, L., Bozkurt, F., Özerkan, H., Çoğun, C. & Uslan, İ., Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ile işleminde elektrolitik Cu ve CuBe takım elektrotlarının performansının karşılaştırılması. *El-Cezeri*, 8 (3), 1455-1461, (2021). <https://doi.org/10.31202/ecjse.946472>.
- [33] Opoz, T., Yasar, H., Murphy, M., Ekmekci, N. & Ekmekci, B., Ti6Al4V Surface modification by hydroxyapatite powder mixed electrical discharge machining for medical applications. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, Özel Sayı 1, 1-10, (2019). <https://doi.org/10.7240/jeps.450383>.
- [34] Yuvaraj, N., Raja, R.A., Palanivel, P., & Kousik, N.V., EDM process by using copper electrode with Inconel 625 material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 811(1), 012011, (2020).
- [35] Akıncıoğlu, S., Taguchi metodu ve gri ilişkisel analizi kullanılarak 1,2316 paslanmaz çeliğin (R65) mikro-elektro erozyon delme kabiliyetinin değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (2), 646-660, (2021). <https://doi.org/10.29130/dubited.833720>.
- [36] Ji, R., Liu, Y., Diao, R., Xu, C., Li, X., Cai, B., & Zhang, Y., Influence of electrical resistivity and machining parameters on electrical discharge machining performance of engineering ceramics. *PLoS One*, 9(11), e110775, (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110775>.
- [37] Ahmed, A., Tanjilul, M., Rahman, M., & Kumar, A.S., Ultrafast drilling of Inconel 718 using hybrid EDM with different electrode materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 106(5), 2281-2294, (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04769-w>.

RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Numerical Optimization of Gas Cooler Geometry in Transcritical Refrigeration Cycles

Transkritik Soğutma Çevrimlerinde Gaz Soğutucu Geometrisinin Sayısal Optimizasyonu

Ahmet Furkan URKUT¹, Efe Oğuzhan KARCI², Mehmed Rafet ÖZDEMİR¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Marmara University, 34854, İstanbul, Turkey

² Department of Mechanical Engineering, Boğaziçi University, 34342, İstanbul, Turkey

Abstract

Traditional halocarbon – based refrigerants tend to considerably increase global warming and ozone depletion factors. Therefore, CO₂ is fast becoming a key instrument as a natural refrigerant which was widely applied and attracted the consideration of the research community. The gas cooler is a critical component in the CO₂ transcritical refrigeration system and plays a major role in the performance due to the determination of operating pressure consequently power consumption. In this research, the performance characteristics of a CO₂ gas cooler having wavy fin geometry, which is currently employed in industries including air conditioning, automotive and aviation, was determined experimentally in a calorimetric test room. The experimental results was used as benchmark data to validate the three – dimensional numerical model. Laminar model and realizable k - ε turbulent model were employed for analyses. Moreover, the second order upwind scheme was considered to discretize momentum and energy equations. Accordingly, a multi-objective optimization process has been performed employing Response Surface Method (RSM) to determine the optimum wavy fin geometry in CO₂ transcritical refrigeration system. Four geometrical parameters namely longitudinal pitch, half transverse pitch, tube outer diameter, and fin pitch of the gas cooler were optimized. According to results, the new optimized CO₂ gas cooler exhibited lesser pressure drop and higher heat transfer capacity in comparison with the tested gas cooler geometry used in the industry. It was appeared that the overall heat transfer coefficient enhancement is between 5.4 – 12.2 % while pressure drop decreases about 175.08 – 188.58 % for three different inlet velocities.

Keywords: natural refrigerants, heat transfer coefficient, gas cooler, optimization, wavy fin

Öz

Geleneksel halokarbon bazlı soğutucu akışkanlar, küresel ısınmayı ve ozon tabakasını inceltme faktörlerini önemli ölçüde artırma eğilimindedir. Bu nedenle, araştırma topluluğunun dikkatini çeken ve hızla yaygın olarak uygulanan doğal bir soğutucu olarak CO₂ önemli bir araç haline gelmektedir. Gaz soğutucu, CO₂ transkritik soğutma sisteminde önemli bir bileşendir ve çalışma basıncının ve dolayısıyla güç tüketiminin belirlenmesi nedeniyle performansta önemli bir rol oynar. Bu çalışmada, günümüzde iklimlendirme, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde kullanılan dalgalı kanatçık geometrisine sahip bir CO₂ gaz soğutucunun performans özellikleri kalorimetrik bir test odasında deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, üç boyutlu sayısal modeli doğrulamak için ölçüt olarak kullanılmıştır. Analizler için laminer model ve realizable k - ε türbülanslı model kullanılmıştır. Ayrıca momentum ve enerji denklemlerini ayırklaştırmak için second order upwind şeması kullanılmıştır. Buna göre, CO₂ transkritik soğutma sisteminde optimum dalgalı kanatçık geometrisini belirlemek için Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM) kullanılarak çok amaçlı bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Gaz soğutucunun boyuna hatvesi, yarım enine hatvesi, boru dış çapı ve kanatçık hatvesi olmak üzere dört geometrik parametre optimize edilmiştir. Sonuçlara göre, yeni optimize edilmiş CO₂ gaz soğutucusunun, endüstride kullanılan test edilmiş gaz soğutucu geometrisine kıyasla daha az basınç düşüşü ve daha yüksek ısı transfer kapasitesi sergilediği görülmüştür. Üç farklı giriş hızı için ortalama ısı transfer katsayısı iyileşmesinin %5,4 – 12,2 arasında olduğu, basınç düşüşünün ise % 175,08 – 188,58 oranında azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: doğal soğutucular, ısı transferi katsayısı, gaz soğutucu, optimizasyon, dalgalı kanatçık

I. INTRODUCTION

Development of the industry has considerably increased environmental pollution and global warming issues over the past decades. With the Montreal and Kyoto protocols, industries and developing countries have adopted a number of legal regulations. Until these protocols, the selection of refrigerants used in the refrigeration systems was based on economic and efficiency factors while concerns about environment were not seriously considered. On the other hand, the ozone depletion and global warming factors of halocarbon – based refrigerants are very high. For instance, global warming potential of Halocarbon based refrigerant R23 is 11700 times higher than natural refrigerant Carbon dioxide (CO₂) [1]. When awareness over the environmental damage of these halocarbon-based refrigerants like Chlorofluorocarbon and Hydrochlorofluorocarbon (CFCs, HCFCs) arose in the 1990s, natural refrigerants such as CO₂ were reintroduced to the industry. However, most of these natural refrigerants cannot satisfy the performance and safeness criteria [2]. For instance, ammonia is flammable and toxic, thereby, not qualified for certain operations [3]. Another natural refrigerant example can be regarded as water. It is easily available and non-toxic but it has low operating pressure and density, henceforth water is not a good nominee for vapour compression refrigeration systems [4]. Also, water may not be considered cost-effective because of its low heating coefficient of performance (COP) [5]. CO₂ is one of the non – flammable and non – toxic natural refrigerant [3]. Also, CO₂ can be discharged to the atmosphere and it doesn't need to be retrieved. Furthermore, CO₂ has no ozone depletion potential and therefore the governmental regulations don't be applied to it. Besides, CO₂ has higher density, thermal conductivity, latent heat and specific heat, and smaller viscosity as against Hydrofluorocarbons (HFCs) which are widely used today. Moreover, thanks to its negligible global warming potential and environmentally friendly features, CO₂ is not tend to be phased out unlike HFCs [6]. The use of CO₂ in refrigeration systems is cost – effective since exists aplenty in the atmosphere [2]. Moreover, CO₂ can be considered as a safe refrigerant according to the safety standards of ISO 5149 and ASHRAE 15 and 34 [3]. In consequence, the leakage into the atmosphere of CO₂ is regarded as very minimum.

The CO₂ refrigerated cooling systems have been used in various applications such as ice cream freezers, cold beverage vending machines, supermarket refrigeration systems, heat pumping units and food retailing [6,7]. For a more sustainable life, this kind of environmentally friendly cooling systems need to be developed and widely employed. In refrigeration systems, CO₂ gas in the transcritical

zone forces the system to operate in single phase. Since two-phase condensation does not occur, the system has gas cooler rather than the condenser. Therefore the gas cooler is the responsible equipment for the heat transfer to the ambient. The COP of the system is augmented with the presence of the additional internal heat exchanger in the cycle. The temperature gradient in the gas cooler directly affects the COP value [8]. In this context, the gas cooler can be considered very important equipment in the CO₂ transcritical cooling cycle. Therefore, the relevant literature has been examined below to present the knowledge about the impacts of gas cooler fin geometry and fin arrangement on heat transfer and pressure drop behaviours.

Jang and Chen [9] numerically examined the heat transfer and pressure drop behaviours of a wavy finned – tube heat exchanger for various geometrical parameters including wavy heights, wavy angles and tube row numbers for Reynolds number (Re) varying from 400 to 1200. The findings revealed that wavy fin arrangement has higher Colburn factor than plain fin arrangement within a range of 63%-71% and also wavy fin arrangement has 75% to 102% higher friction factor values. When wavy height was kept constant, the pressure and average Nusselt number (Nu) raise with growing wavy angle. However, the wavy height has an adverse impact on the pressure drop and average Nu at the constant equal wavy angle. They also observed that row effect is not significant for wavy fin compared to the plain fin. In another research, Kim and Bullard [10] carried out sets of experiments in a flat tube and multi – louvered fin heat exchangers to investigate the airside pressure drop and heat transfer attributes. Experiments were performed for different pitches, flow rates and louver angles for Reynolds number ranging between 100 and 600. The friction coefficient and colburn j-factor were defined in terms of Re number function in heat exchangers of different geometric configurations. The correlation created for the friction factor showed that the most important parameter in the pressure loss is the flow depth. Besides, results showed that the heat transfer coefficient (HTC) augments substantially with air velocity and decreases with flow depth. They observed that pressure drop increases with raise in louver angle and flow depth and decreases with rise in fin pitch. Mon and Gross [11] numerically studied the effect of fin spacing in annular finned four-row tubes having in-line and staggered configurations. Analyses were executed for Reynolds number ranging between 8600 and 43000. It was reported that the pressure loss diminished with the raise in the ratio of fin spacing to height for both tube arrangements. HTC enhanced with the ratio of fin spacing to a height up to the certain value (0.32),

afterwards it was nearly constant for staggered tube arrangement. On the other hand, the HTC showed an increasing trend in the entire range for the in-line configuration. Tao et al. [12] examined the fin efficiency, heat transfer characteristics and temperature pattern on the surface of the fin in tube and wavy-fin heat exchangers using a three-dimensional numerical model for various wavy angles changing from 0° to 20° . The three-dimensional numerical analyses were carried out by employing body-fitted coordinates (BFC) methodology which considers the fin efficiency influence in the model. Findings showed that plain plate has lower fin efficiency than the wavy plate at the inlet region. They also reported that as the Reynolds number increases the impact of wavy angle on the fin efficiency and local Nusselt number become more significant. Lu et al. [13] analysed the effects of tube pitch, tube diameter, fin pitch and fin thickness on the air-side characteristics of staggered finned tube heat exchangers numerically. The results explained in terms of heat transfer rate over pressure drop. It was seen that COP of the heat exchanger declines with increasing tube diameter and fin thickness whereas it increases with increasing tube pitch. Dong et al. [14] performed experiments to analyse the thermal-hydraulic characteristics of the airside in the flat tube and wavy fin aluminium heat exchanger for different working conditions and wavy fin geometry parameters. They conducted the multiple regression method to develop pressure loss and heat transfer correlations in the heat exchanger. Furthermore, the parametric study by applying the Taguchi method was managed to examine the thermal-hydraulic performances of the wavy fins. The study indicated that the amplitude and the length of the wavy fin are very significant parameters affecting the total thermal-hydraulic performance of the heat exchanger. They reported that decrease in fin pitch and fin length would enhance the heat transfer performance. Santosa et al. [15] numerically and experimentally studied the local HTC of refrigerant and air sides of the CO_2 gas cooler with the finned tube. Studies were performed on two gas cooler designs, each with or without slit on the fins. It was observed that adding a slit between rows increases the heat transfer by preventing heat transmission among the tubes. They reported that adding slit enhances the heat rejection rate between 6% and 8%. As a consequence of this study, it was seen that computational fluid dynamics (CFD) modelling is an accurate and effective simulation tool for air and refrigerant side calculations. In another study, Zhang et al. [16] developed a three-dimensional CFD model of a flat finned tube gas

cooler. The airside model was designed with 2 fins and 54 tubes, while the refrigerant-side model was designed with 10 fins and 54 tubes. They observed that as inlet velocity increases the temperature of the refrigerant decreases. Javaherdeh et al. [17] numerically and experimentally analysed the effects of louver length, fin height and thickness of fin-tube contact on the pressure loss and heat transfer performance in a louvered fin and tube heat exchanger. Results revealed the performance of heat exchanger enhanced when the thickness of the fin-tube contact was increased until the contact thickness equals to fin thickness. However, a further increment in the thickness of the fin-tube contact did not affect the heat exchanger performance. Moreover, when the louver length was increased at a fixed fin height the performance of heat exchanger enhanced. In the study carried out by Zhang et al. [18], a three-dimensional CFD model was utilized to examine the airside pressure drop and HTC, heating capacity and inlet temperature in CO_2 finned tube gas cooler for different inlet velocity ranges of airflow. They observed that, the best performance has been achieved with uniform airflow pattern by having the largest heat capacity, the smallest pressure drop, the lowest approach temperature and the highest COP.

The aforementioned literature review shows that there are many geometric factors such as tube diameter, fin height, fin pitch, wavy angle and fin thickness affect the performance of gas cooler in CO_2 transcritical refrigeration systems. However, the number of systematic studies considering all these parameters is very scarce in the literature. Thus, further researches are needed to elaborate on the effect of geometrical parameters on the performance of gas coolers in CO_2 transcritical refrigeration systems. This particular study presents a numerical CFD research on optimization of the gas cooler geometry considering longitudinal pitch (P_L), half transverse pitch ($P_T/2$), fin collar outside diameter (D_c) of tube and fin pitch (F_P) and investigates effects of these parameters on heat transfer capacity of the gas cooler in CO_2 transcritical refrigeration systems. The numerical model has been analysed for airside of the gas cooler and validated with the experimental tests using the gas cooler geometry having wavy fin with circular tube. Thereafter, an optimization study was conducted along with the gas cooler geometry using response surface method (RSM). The heat transfer and pressure loss data of the optimized gas cooler geometry results were compared with experimental findings.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Test Rig and Experimental Investigation

The test rig was employed to validate the numerical model in the current study. The gas cooler was tested in environment-balanced type calorimetric test room according to the EN 327 [19] and EN 328 [20] standards. The gas cooler was made of aluminium fins with wavy fin type. Table 1 presents the properties of the tested gas cooler. The calorimetric test room was located in the conditioning chamber to prevent any heat exchange from the environment. The test room consists of a CO₂ refrigerant line, data acquisition system and air control unit. The temperature and humidity was adjusted with air control unit in the test room.

Figure 1 depicts the details of the CO₂ refrigerant line schematically. The CO₂ refrigerant line consists of a separated tank, evaporator, two parallel transcritical compressors with a controllable capacity (Bitzer 4HTC-15K-40P), water line, subcooler, precooler, data acquisition system (Agilent 34970A), coriolis flow meter (Krohne Optimass 1400), refrigerant control systems (Danfoss AK-PC 720, EKD 326) and ICMT high pressure valve which is a motorized valve driven by an actuator. The tank is used at medium pressure as a separator to separate the gas and liquid phases of the CO₂ refrigerant in the system. The liquid phase is collected in the lower part of the tank and it is reduced to the evaporation pressure in the expansion valve and enters the

evaporator at quality of 0.25-0.3. The liquid CO₂ evaporates according to the superheating value set by the electronic control system by withdrawing the heat of the auxiliary line water at constant pressure. The compressor suction is fed with the CO₂, which occurs at the gas phase after high-pressure throttling, and the CO₂ gas supplied from the evaporator. Thereafter, the CO₂ is compressed in the compressor (8000-9500 kPa) and delivered to the prototype gas cooler. The temperature of the CO₂ gas is reduced by discharging heat to the environment at constant air inlet temperature and constant fluid pressure.

The 18 kW heater and 36 kW chiller in the air conditioning unit were used to adjust the humidity and temperature of the inlet air using PID control system with the incoming data from the sensors. It was ensured that the system reached a steady-state before collecting the data. In steady-state condition, the test performance of the gas cooler was measured until it reaches $\pm 4\%$ of the total cooling and heating loads given to the test room. The temperature and pressure data of the CO₂ were measured at the upstream and downstream of the gas cooler. The Reynolds number (Re) was determined using the inlet velocity of air where the characteristic length is the hydraulic diameter (D_H) of the tube. The D_H and Re are defined in equation (1) and equation (2) respectively.

Table 1. Gas cooler properties

Transverse pitch (P_T)	25.4 mm
Longitudinal pitch (P_L)	22 mm
Fin pitch (F_P)	2.5 mm
Fin type/fin thickness (t)	Wavy/0.1 mm
Fin material	Aluminium
Tube material	Copper
Tube wall thickness	0.55 mm
Inner diameter of the tube (D_{in})	7.94 mm
Fin collar outside diameter (D_c)	9.04 mm
Row number	3
Total pipe number	60
Total fin number	480
Circuit number	6
Length	1200 mm
Air volumetric flow (\dot{m}_{air})	1.66 kg s ⁻¹

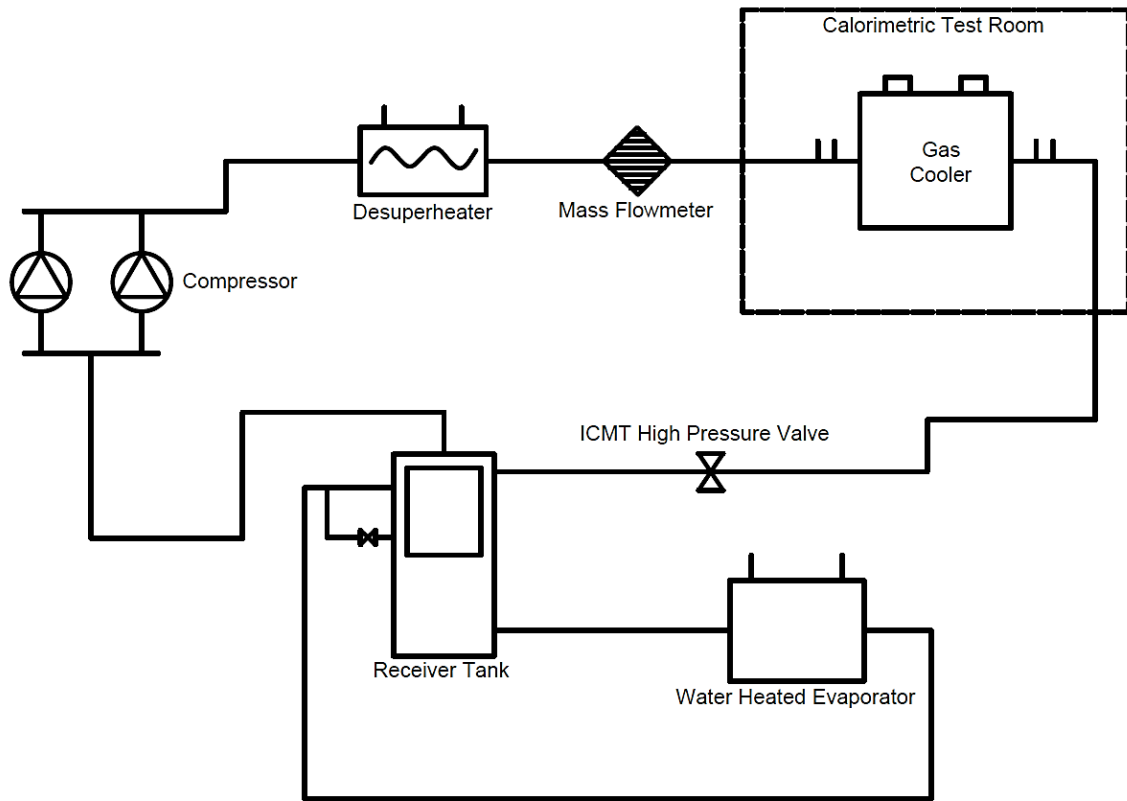


Figure 1. Schematic of the CO₂ refrigerant line

$$D_H = \frac{2F_p P_r}{F_p + P_r} \tag{1}$$

$$Re = \frac{\rho u D_H}{\mu} \tag{2}$$

Where ρ signifies the fluid density, u denotes velocity and μ represents the dynamic viscosity. The heat transfer rate, \dot{Q} and consequently the airside HTC, h_{air} in each part is computed using following equations.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{air} \times (e_i - e_o) \tag{3}$$

$$h_{air} = \frac{\dot{Q}}{A_{tot} (T_w - T_b)} \tag{4}$$

In Equation (3), e_i and e_o are inlet and outlet enthalpy of the air for the relevant temperature and pressure

respectively and \dot{m}_{air} is the mass flow rate of the air. In equation (4), A_{tot} denotes the total heat transfer surface area including collars and fins whereas T_w designates average wall temperature value which is the average of collar temperature and fin temperature. Also, T_b is the bulk air temperature which can be described as average air upstream and downstream temperature.

The propagated uncertainty analysis was also conducted during the experiments according to the method explained ref. [21]. The uncertainty values were $\pm 5.1 - 10.9\%$ for the total cooling capacity and

$\pm 3.2 - 9.1\%$ for pressure drop. The inlet velocity of the fan was considered constant during the experiments (2.55 m s^{-1}). The experiment was conducted several times to check the repeatability of the experiment and it was found that the experimental results are very well agree with each other for all cases.

Mean absolute error (MAE) was used to present the prediction capability of the numerical model for the experimental data. The MAE in percentage can be defined with the following equation. In the below equation, f_i denotes the numerical result, y_i stands for the experimental result and n is the number of data.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - y_i|}{y_i} \times 100\% \quad (5)$$

2.2. Numerical Analysis

The tested gas cooler whose properties given in Table 1 was adopted for the numerical model. Three-dimensional geometry of the tested gas cooler was sketched in computer aided design (CAD) environment. Then the CFD model of the geometry was generated by the aid of the ANSYS® Fluent commercial software package. The software is originated by finite volume principle. The laminar models with simple and coupled algorithms and realizable k- ϵ turbulent flow using the standard wall model were applied to elaborate the heat transfer and fluid flow features at various inlet velocities. The flow was considered to be steady and incompressible during the analysis. The second-order upwind model was employed to discretize the energy and momentum equations. Therefore, the pressure-based continuity and momentum equations were solved accurately by this coupled algorithm. It should be noted that this pressure-based coupled algorithm provides some benefits compared to the pressure-based segregated algorithm in terms of having more powerful and accurate solutions for steady-state flows [22]. The CFD model solves the conversation of mass, energy and momentum equations to characterize heat transfer and fluid flow in the gas cooler. Governing equations used in the simulations are shown below.

Conservation of mass (continuity):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (8)$$

Conservation of energy:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

Where τ_{ij} signifies the stress tensor, λ denotes the thermal conductivity, E indicates the total energy, P represents the pressure and T denotes the temperature; i, j and k signify subindexes of the cartesian coordinate system.

The below assumptions were applied during analysis since the complexness and computational CPU cost become very large to model the entire gas cooler.

- a- The each circuit were assumed to run as individual gas cooler interrelated with each

other in parallel as shown in Figure 2. Because the experiments indicate that the temperature and performance data of each circuit exhibited similar characteristics.

- b- The temperature of tubes was considered constant temperature of 318.15 K. This temperature value is the average temperature during experiments and reasonable since it is above the critical point of CO₂. This assumption also enables us to divide each circuit into several segments along the pipe length to simplify CFD model reasonably.

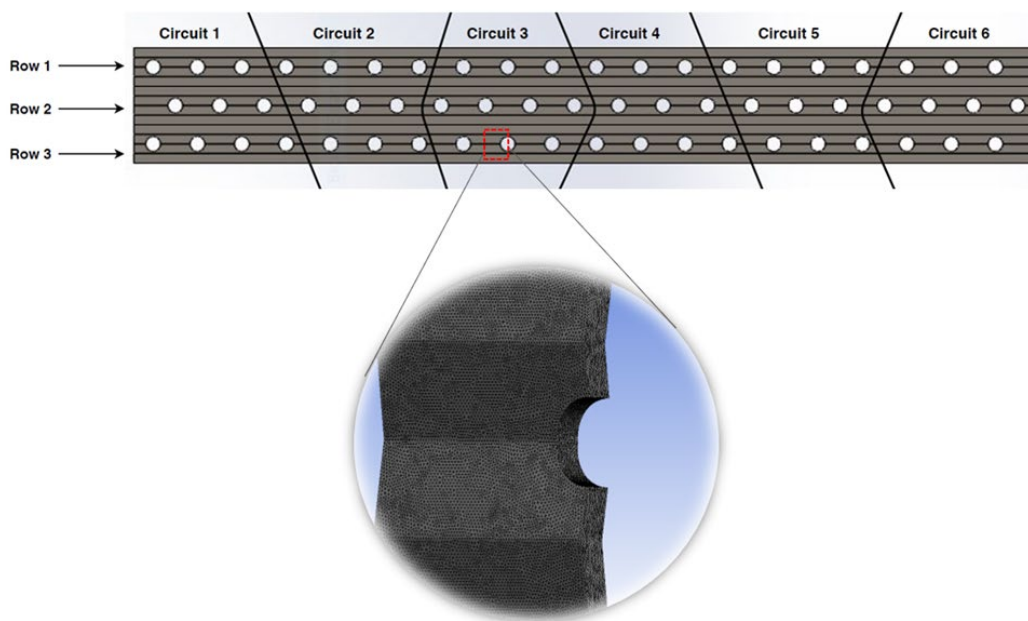


Figure 2. Top view of the CAD geometry of the gas cooler with rows and circuits and the grid structure of the model

Accordingly, the CFD domain can be regarded as in Figure 3. Moreover the domain was extended to cover input and output regions of the model to have uniform 1-D velocity profile at the entrance and to prevent backflow at the outlet of the model. This method is also very common in literature to avert from the effect of reversed flow, as encountered by the solver and widely stated in literature, see for example refs. [23-25]. In this study, the extension length was set equal to longitudinal pitch at the inlet section and two times longitudinal pitch length at the outlet section. These extension lengths were considered while calculating cooling capacity which are presented in results and discussion section. Moreover, the fins and tubes were modelled as thin

walls in the CFD model. The outlet pressure of the model was assumed as gauge pressure during the solution. In the computational solution, the fins were treated as solid and no-slip boundary condition with the periodic condition was implemented to the lower and upper walls of fins. The inlet air temperature between two fins was set to a constant temperature of 302.15 K considering the experimental conditions of tested gas cooler. Moreover, the symmetry boundary condition was assumed at the lateral surfaces of the model. The convergence criterion has been defined as 10^{-9} for momentum and energy equations whereas it was set to 10^{-6} for continuity equation. Flow chart of the numerical model was illustrated in Figure 4.

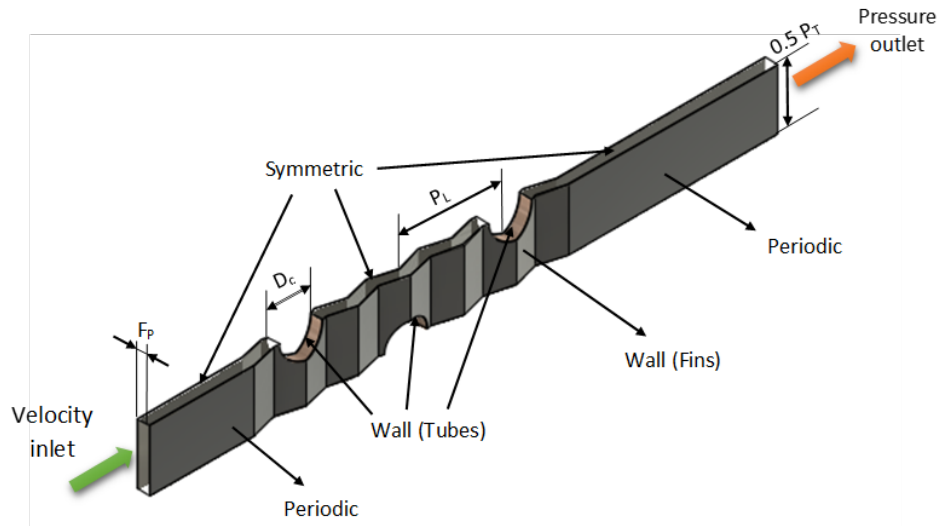


Figure 3. CFD domain of wavy fin and circular tubes

The mesh generation process is a crucial stage in CFD works since meshing could influence the reliableness, convergence and consistency of the results. The tetrahedral grid scheme was used to obstruct any potential ill-shaped cell in the CFD domain as can be seen in Figure 2. The grid scheme consists of 46957 nodes and 228724 tetrahedral elements. Moreover, the fully automatic meshing procedure was used with small element size (0.5 mm) for the faster and more accurate solution. The CFD domain was divided into several subdomains considering mesh structure and number to save computational and convergence time in the solution. The mesh quality of the computational domain is dependent on the skewness and orthogonal qualities of meshes. It was found that the average orthogonal quality of the meshes is 0.77. On the other hand, the average skewness and maximum skewness values of the meshes were 0.2 and 0.6 respectively. These values are in agreement with the results of [26-28], which stated that the average skewness value is in the range of 0.1 and 0.5 whereas the maximum skewness value varies from 0.5 to 0.75 for good quality meshes. Accordingly, different size and number of meshes were employed to perform mesh independency study and results of pressure drop and HTC are demonstrated using five different grids in Table 2 below. Table 2 presents that the difference of the overall HTC which is denoted as h_{av} and pressure drop (ΔP) values for the five meshes is insignificant. Accordingly, the medium mesh is adopted for the analysis.

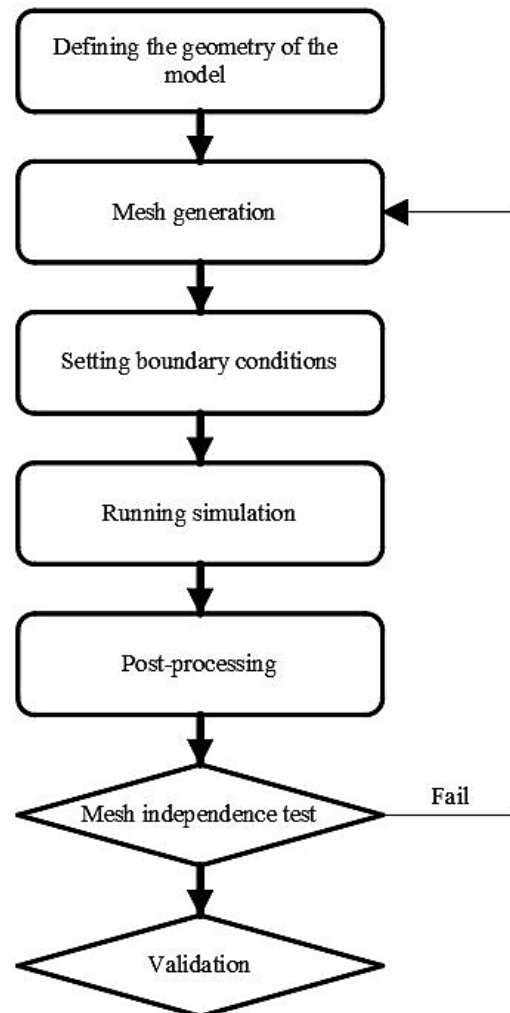


Figure 4. Flow chart of the numerical model

Table 2. Mesh independency results

Grid number [-]	h_{av} [Wm ⁻² K ⁻¹]	ΔP [Pa]
Coarse grid	12.6454	5.37741
Medium grid	12.6542	5.38201
Fine grid	12.6338	5.3824
Finer grid	12.6452	5.39427
Finest grid	12.6505	5.38792

2.3. Optimization Process

In this study, a multi-objective optimization process was integrated with the response surface method (RSM), design of experiments (DOE), multi-objective genetic algorithm (MOGA) and CFD model to design optimum gas cooler geometry in CO₂ transcritical refrigeration systems. This algorithm was conducted with regards to the different geometrical parameters of gas cooler in terms of the Non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) method [29]. This model generates 4000 samples initially, 800 samples per iteration and accordingly presents 3 candidate design points in maximum of 20 iterations. It was found that the solution converged after 12064 evaluations.

The RSM and genetic algorithm (GA) were used to carry out the optimization study. The RSM was first developed by Box and Daper [30] for designing experiments and optimizing the effect of mix parameters [31, 32]. Accordingly, the objective function of RSM algorithm can be formulated in Equation (10).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} X_i X_j + \dots \quad (10)$$

Where β_0 , β_i and β_{ij} are tuning parameters, Y is the response variable and n is the number of parameters.

In the current work, because of the non-uniformity of the HTC at the fin surface, it was very complicated to measure the local HTC on the fins, therefore the local heat flux and local fin temperature are need to be evaluated [33]. The objective functions were defined as maximum HTC through the gas cooler considering surface of the fins and surface of the tubes together, minimum pressure drop and maximum heat flux in the gas cooler which are developed a correlation function with four design variables namely longitudinal pitch, fin pitch, half of the transverse pitch and tube diameter of the gas cooler. The objective functions namely f_1 , f_2 and f_3 and constraints are defined as follows:

$$\text{Maximize } h_{local} = f_1(P_T / 2, P_L, F_p, D_c) \quad (11)$$

$$\text{Maximize } \Phi = f_2(P_T / 2, P_L, F_p, D_c) \quad (12)$$

$$\text{Minimize } \Delta P = f_3(P_T / 2, P_L, F_p, D_c) \quad (13)$$

$$\text{Constraints : } 10 \text{ mm} \leq P_T / 2 \leq 15 \text{ mm}; \quad 15 \text{ mm} \leq P_L \leq 25 \text{ mm}; \\ 2 \text{ mm} \leq F_p \leq 3 \text{ mm}; \quad 5 \text{ mm} \leq D_c \leq 12 \text{ mm}. \quad (14)$$

Where h_{local} is the local HTC and Φ is the local heat flux. The lower and upper limits of the constraints were defined for design variables considering the design limitation of the gas coolers in the industry. The design constraints can be comprehended clearly by analysing Figure 3.

After defining the objective functions and design variables, the numerical optimization problem was

solved using RSM and MOGA methods to reveal optimum geometries and arrangement. The Central Composite Design (CCD) which is an algorithm of DOE method is used to obtain sample data points. Consequently, a best combination of design variables in the range described in equation (14) leading to minimum pressure drop and maximum heat transfer was determined. The best combination was chosen as the optimum geometry and

arrangement. The optimization procedure can be summarized as follows:

- 1- Determination of objective functions and design variables.
- 2- Application of DOE method to obtain optimal arrangement of design points.
- 3- Determination of the response surface from DOE results for each output parameter.
- 4- Solution of the objective function values with CFD.
- 5- Obtaining the objective functions according to the input parameters based on multi-objective genetic algorithm method.
- 6- Obtaining the optimum geometry among candidate points.

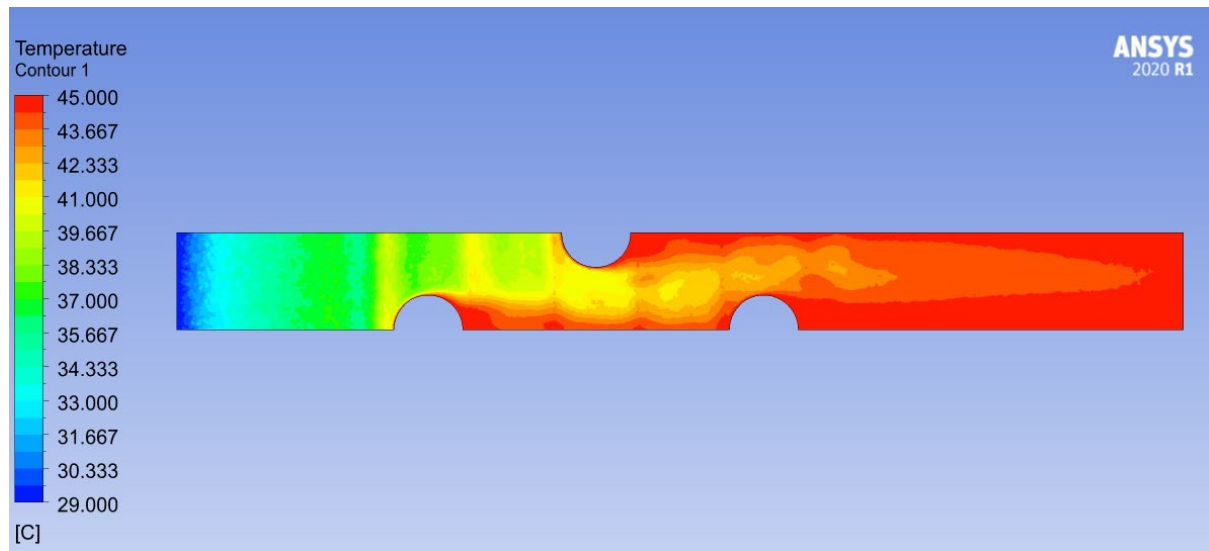


Figure 5. Temperature contour of the numerical model of the tested gas cooler at 1 m s^{-1}

III. RESULT AND DISCUSSION

The numerical model of the gas cooler was validated using current experimental data. As can be seen from Table 3, the cooling capacity of the gas cooler (\dot{Q}_{gc}) predicted well by the numerical model. Although the MAE is 9.97 % for the total heat capacity between experimental test and numerical model, all data is in experimental uncertainty range which were $\pm 5.1 - 10.9$ %. Therefore, it can be stated that the numerical model can be used to analyse the gas cooler geometry in the current CO_2 transcritical refrigeration system.

Table 3. Comparison of the numerical model with experiment at $u = 2.55 \text{ m s}^{-1}$

	\dot{Q}_{gc} [kW]
Experiment	16.446
Numerical model	14.765
MAE	9.97 %

Accordingly, the optimization process was performed for the validated numerical model. As stated in the materials and method section, the geometric parameters for the optimization process were chosen as longitudinal pitch, fin pitch, half of the transverse pitch and tube diameter of the gas cooler. The reason for choosing these geometrical parameters can be understood by analysing temperature and pressure contours of the gas cooler which was obtained via numerical model, please see Figure 5. As can be figured out from Figure 5, the temperature contours are not uniform and affected by the number of tubes, the arrangement of tubes, the spacing between tubes and diameter of tubes. These trends confirm that the abovementioned design parameters are effective in the total heat capacity and pressure drop performance of the gas cooler in the current system. Also, prior studies that have stated the importance of number of tubes consequently longitudinal pitch, fin pitch, half of the transverse pitch and tube diameter of the gas cooler greatly affect the thermal and pressure drop behaviour of the gas cooler [34-37].

The impact of each design parameter on the objective functions has been analysed separately in Figure 6 (a-h). It is worth to mention that the other design parameters were held constant to observe the

single effect through Figure 6 (a-h). As can be noticed from Figure 6 (a), the pressure loss through the gas cooler increases exponentially (~%85) and the HTC on the fin surface, $h_{local,f}$ increases slightly (~% 6) with the tube diameter was increased from 5 mm to 12 mm. On the contrary, the HTC on the tube surface, $h_{local,t}$ decreases (~% 15) with the raise in the tube diameter, see Fig. 6 (b). These findings also accord with our earlier studies, which indicated that the pressure loss rises with the tube diameter [13, 37 – 39] for plate fin and tube heat exchangers. The reason of this trend can be attributed to the enhancement of the wake region behind the tube wall as the tube diameter increases. Consequently, the air – side pressure drop increases. Furthermore, the heat transfer area and fin efficiency rises as the tube diameter enlarges which leads to higher HTC values at the fin surface. On the other hand, the HTC at the tube surface has a decreasing trend when the tube diameter was increased. This trend is expected since the growth in the tube diameter would result in shorter boundary layer development from the inlet of the fin and that results in poor heat transfer performance.

The effect of fin pitch on the pressure drop, fin surface heat transfer and tube surface heat transfer characteristics can be represented in Figure 6 (c-d). As the fin pitch was increased, the surface HTC on the tube and fin also augmented whereas the pressure loss through the fin decreased. Previous studies have also revealed that the fin pitch has significant impact on the HTC on the tube and fin similar to this study [11, 37, 40]. Because, the fin pitch distance largely affects the boundary layer development in the system. If the fin pitch becomes large, the boundary layers between the fins would diverge from each other consequently the heat transfer process becomes more effective. For smaller fin pitch values, the fluid can be utilized as trapped in the wake region so that this region cannot contribute to heat transfer process due to its small area. However, the region becomes larger as the fin pitch was enlarged and the circulation of the fluid becomes faster that results in better heat transfer rate. Romero-Méndez et al. [37] and Mon and Gross [11] stated that the heat transfer rate is higher at the larger fin pitch values due to the emergence of horseshoe type vortex. The decreasing pressure drop trend with the raise in the fin pitch distance can be attributed to the weak interactions of boundary layers between the fins as expected.

Romero-Méndez et al. [37] showed that the flow around the rear of the tube was separated with the formation of a wake region with a recirculation zone.

Figure 6 (e-h) demonstrate the effect of tube spacing, namely longitudinal and transverse pitches, on the pressure drop and HTC on the fin surface and tube surface. The pressure drop through the system slightly decreased or wasn't influenced by the increase in longitudinal pitch whereas it decreased almost linearly when the transverse pitch was increased, see Figure 6 (e, g). As the transverse pitch was decreased, the fin tip clearance becomes smaller which results in higher velocity consequently larger pressure drop. The tube arrangement has a strong effect on the airflow characteristic and consequently affects heat transfer through the tube banks. The HTC decreased as the transverse pitch rises for both tube and fin surfaces. The reason behind this trend can be explained by the fact that the effect of tubes exerted on each other is reduced by enlarging transverse pitch. In this case, the tube banks would behave like individual finned tubes that results in lower HTC compared with the closer transverse pitch case. These findings agree with those of earlier studies [11, 13, 41, 42].

The abovementioned discussions reveal that the performance of the gas cooler can be affected by several geometric parameters. Consequently, the mixed effect of these parameters should be studied to find the optimum geometry of the gas cooler with the highest thermal-hydraulic performance. As mentioned before, the RSM and MOGA techniques were used in optimization process to uncover the mixed effect of design parameters on the objective functions. Consequently, the optimum gas cooler geometry dimensions can be presented in Table 4.

Table 4. Optimum Gas cooler dimensions

Transverse pitch(P_T)/	1.26
Longitudinal pitch (P_L)	
Fin type/fin thickness (t)	Wavy/0.1 mm
Fin pitch (F_P)	3 mm
Fin collar outside diameter (D_c)	5 mm
Tube wall thickness	0.55 mm

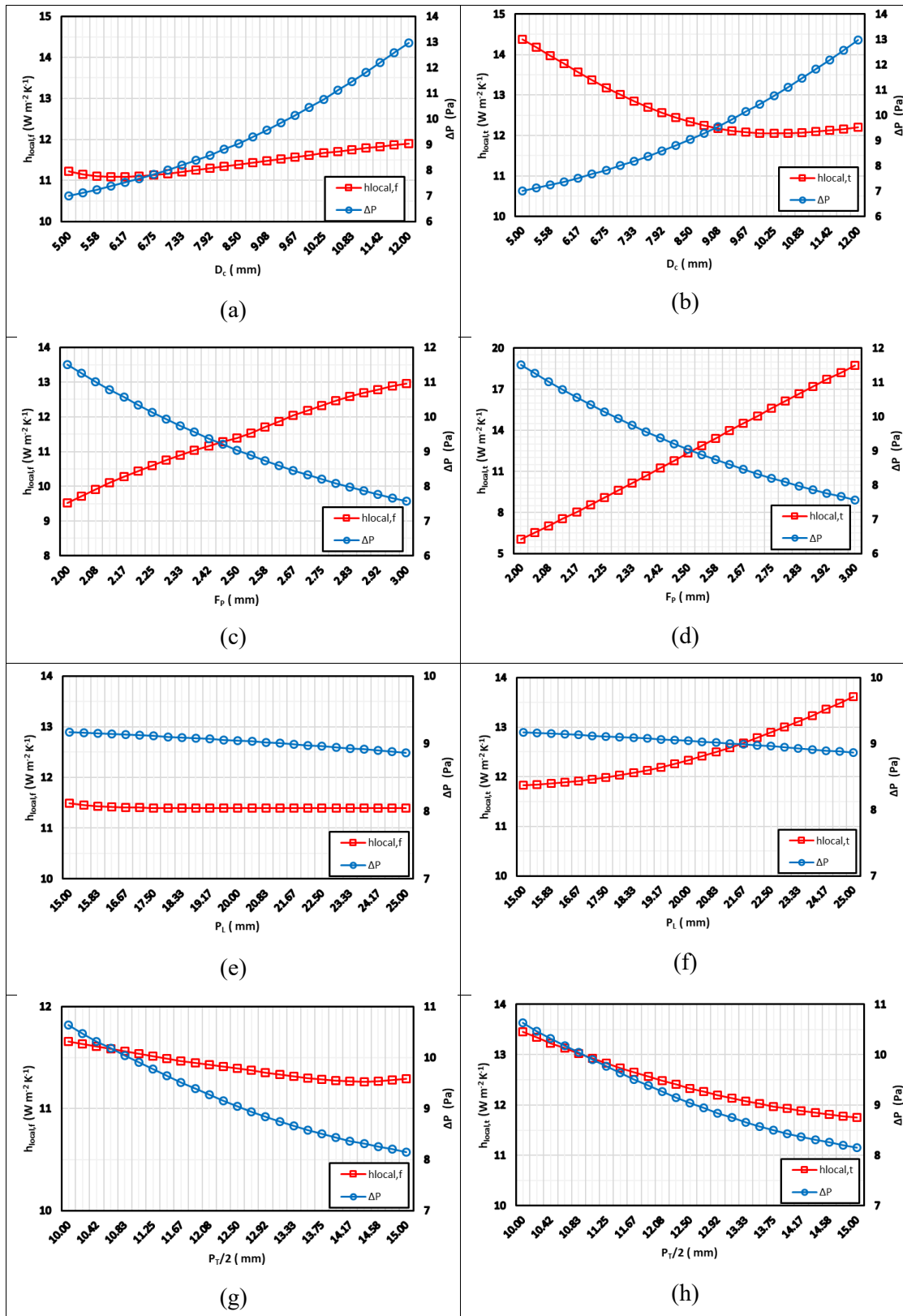
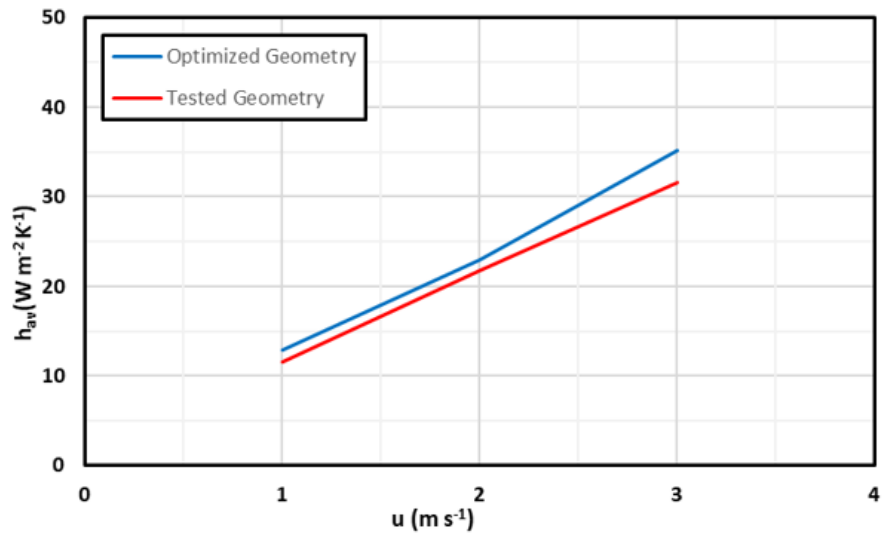
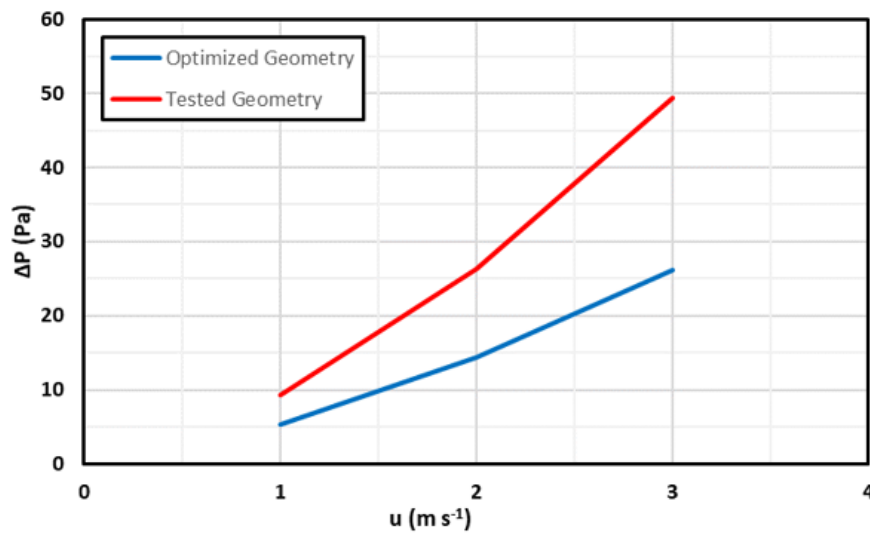


Figure 6. Effect of design parameters on the surface fin $h_{local,f}$ surface tube $h_{local,t}$ and ΔP at $u = 1 \text{ m s}^{-1}$, a,b) effect of tube diameter, c,d) effect of fin pitch, e,f) effect of longitudinal pitch and g,h) effect of half transverse pitch



(a)



(b)

Figure 7. Thermal-hydraulic performance comparison between the optimum geometry and tested geometry; a) HTC, b) Pressure drop

The thermal-hydraulic performance comparison of the tested gas cooler and optimum gas cooler is shown in Figure 7 (a-b) below with regard to the HTC and pressure drop for three different inlet velocities. As can be noticed from Figure 7 (a-b), the optimum geometry has better thermal-hydraulic performance than the tested geometry. The overall HTC improvement is between 5.4 – 12.2 % whereas the pressure drop decreases about 175.08 – 188.58 % for three different inlet velocities. Considering the test condition inlet velocity of 2.55 m s⁻¹, the optimum geometry has almost 9.3 % greater HTC

and 185 % fewer pressure drop in comparison with tested geometry.

IV. CONCLUSIONS

In this study, the geometric optimization of the wavy fin gas cooler in CO₂ transcritical refrigeration system was performed using a multi-objective genetic algorithm. The three dimensional numerical model was validated with experiments. The numerical model fairly agreed (MAE 9.97 %) with

the experimental results in terms of total cooling capacity. Accordingly, four geometrical parameters longitudinal pitch, tube outer diameter, half of transverse pitch and fin pitch were optimized to have maximum cooling capacity and minimum pressure drop. The impact of each geometrical parameters on the surface HTC on the tubes and fins and pressure drop through the gas cooler was examined in details. The results evinced that the pressure loss and surface HTC on the fins and tubes are strictly related with these geometrical parameters. In this way, the geometry of the optimum gas cooler has obtained. It was found that the optimum gas cooler geometry exhibited greater HTC and lower pressure drop compared to tested geometry.

In this particular study four geometrical parameters are taken into account for optimization process since introducing more parameters to the simulation requires more powerful computers and causes excess computation time. For further investigations it is recommended that parameters such as wave inclination angle, wave amplitude and tube wall thickness should be taken into consideration in the optimization process.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank FRITERM Thermal Devices Inc. for their technical support.

REFERENCES

- [1] Bolaji, B. O., & Huan, Z. (2013). Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 49-54.
- [2] Rony, R. U., Yang, H., Krishnan, S., & Song, J. (2019). Recent advances in transcritical CO₂ (R744) heat pump system: a review. *Energies*, 12(3), 457.
- [3] ASHRAE. 15 & 34 Safety Standard for Refrigeration Systems and Designation and Classification of Refrigerants ISO 5149 Mechanical Refrigerating Systems Used for Cooling and Heating—Safety Requirements.
- [4] Lachner Jr, B. F., Nellis, G. F., & Reindl, D. T. (2007). The commercial feasibility of the use of water vapor as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 30(4), 699-708.
- [5] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2014). ASHRAE Position Document on Natural Refrigerants. Inc., Atlanta, GA, USA.
- [6] Gullo, P., Hafner, A., & Banasiak, K. (2018). Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives. *International Journal of Refrigeration*, 93, 269-310.
- [7] Cecchinato, L., & Corradi, M. (2011). Transcritical carbon dioxide small commercial cooling applications analysis. *International Journal of Refrigeration*, 34(1), 50-62.
- [8] Kılıç, B. (2018). Thermo-Economic Analysis of Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (14), 152-156.
- [9] Jang, J. Y., & Chen, L. K. (1997). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in a three-dimensional wavy-fin and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(16), 3981-3990.
- [10] Kim, M. H., & Bullard, C. W. (2002). Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin aluminum heat exchangers. *International Journal of Refrigeration*, 25(3), 390-400.
- [11] Mon, M. S., & Gross, U. (2004). Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(8-9), 1953-1964.
- [12] Tao, Y. B., He, Y. L., Huang, J., Wu, Z. G., & Tao, W. Q. (2007). Numerical study of local heat transfer coefficient and fin efficiency of wavy fin-and-tube heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(8), 768-778.
- [13] Lu, C. W., Huang, J. M., Nien, W. C., & Wang, C. C. (2011). A numerical investigation of the geometric effects on the performance of plate finned-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*, 52(3), 1638-1643.
- [14] Dong, J., Su, L., Chen, Q., & Xu, W. (2013). Experimental study on thermal-hydraulic performance of a wavy fin-and-flat tube aluminum heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), 32-39.
- [15] Santosa, I. M., Gowreesunker, B. L., Tassou, S. A., Tsamos, K. M., & Ge, Y. (2017). Investigations into air and refrigerant side heat transfer coefficients of finned-tube CO₂ gas coolers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 168-180.
- [16] Zhang, X., Ge, Y., Sun, J., Li, L., & Tassou, S. A. (2019). CFD Modelling of Finned-tube CO₂ Gas Cooler for Refrigeration Systems. *Energy Procedia*, 161, 275-282.

- [17] Javaherdeh, K., Vaisi, A., & Moosavi, R. (2018). The effects of fin height, fin-tube contact thickness and louver length on the performance of a compact fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Technology*, 36(3), 825-834.
- [18] Zhang, X., Ge, Y., & Sun, J. (2020). CFD performance analysis of finned-tube CO₂ gas coolers with various inlet air flow patterns. *Energy and Built Environment*, 1(3), 233-241.
- [19] European Committee for Standardization, (2014), Heat exchangers - Forced convection air cooled refrigerant condensers - Test procedures for establishing performance (CSN EN 327), Retrieved from <https://www.en-standard.eu/csn-en-327-heat-exchangers-forced-convection-air-cooled-refrigerant-condensers-test-procedures-for-establishing-performance/>
- [20] European Committee for Standardization, (2014) Heat exchangers - Forced convection unit air coolers for refrigeration - Test procedures for establishing the performance (CSN EN 328), Retrieved from <https://www.en-standard.eu/csn-en-328-heat-exchangers-forced-convection-unit-air-coolers-for-refrigeration-test-procedures-for-establishing-the-performance/>
- [21] Coleman, H. W., & Steele, W. G. (2018). Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- [22] Fluent, A. (2009). Ansys Fluent 12.0 Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- [23] Menéndez-Pérez, A., Pita-Cantos, M. T. L., & Borrajo-Pérez, R. (2019). Determination of the optimum louver angle of a louvered fin with elliptical tubes. *Ingeniería Mecánica*, 22(1), 07-13.
- [24] Gupta, A., Roy, A., Gupta, S., & Gupta, M. (2020). Numerical investigation towards implementation of punched winglet as vortex generator for performance improvement of a fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119171.
- [25] Bilir, L., Ozerdem, B., Erek, A., & Ilken, Z. (2010). Heat transfer and pressure drop characteristics of fin-tube heat exchangers with different types of vortex generator configurations. *Journal of Enhanced heat transfer*, 17(3).
- [26] Okbaz, A., Pınarbaşı, A., Olcay, A. B., & Aksoy, M. H. (2018). An experimental, computational and flow visualization study on the air-side thermal and hydraulic performance of louvered fin and round tube heat exchangers. *International Journal of heat and Mass Transfer*, 121, 153-169.
- [27] Balkanlı, B., Yurddaş, A., & Aksoy, Y. (2020). Split klimalarda kullanılan ısı değiştiricilerinde kanatçık etkisinin sayısal analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 689-699.
- [28] Yeşil, Ç. (2007). Kanatlı borulardaki dış akış ve konjuge ısı transferi mekanizmasının sayısal olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- [29] Damavandi, M. D., Forouzanmehr, M., & Safikhani, H. (2017). Modeling and Pareto based multi-objective optimization of wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers using CFD and NSGA-II algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 111, 325-339.
- [30] Box, G. E., & Draper, N. R. (1987). Empirical model-building and response surfaces. John Wiley & Sons.
- [31] Kumari, M., & Gupta, S. K. (2019). Response surface methodological (RSM) approach for optimizing the removal of trihalomethanes (THMs) and its precursor's by surfactant modified magnetic nanoadsorbents (sMNP)-An endeavor to diminish probable cancer risk. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11.
- [32] Tang, S. Z., Wang, F. L., He, Y. L., Yu, Y., & Tong, Z. X. (2019). Parametric optimization of H-type finned tube with longitudinal vortex generators by response surface model and genetic algorithm. *Applied Energy*, 239, 908-918.
- [33] Chavan, V., & Arakerimath, R. R. (2016). CFD Based Heat Transfer analysis of various Wavy Fin-and-Tube Heat Exchanger. *International Journal of Current Engineering and Technology*, (5), 258-261.
- [34] Yin, J. M., Bullard, C. W., & Hrnjak, P. S. (2001). R-744 gas cooler model development and validation. *International Journal of Refrigeration*, 24(7), 692-701.
- [35] Erek, A., Özerdem, B., Bilir, L., & Ilken, Z. (2005). Effect of geometrical parameters on heat transfer and pressure drop characteristics of plate fin and tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 25(14-15), 2421-2431.
- [36] Bhuiyan, A. A., Amin, M. R., Naser, J., & Islam, A. K. M. (2015). Effects of geometric parameters for wavy finned-tube heat exchanger in turbulent flow: a CFD modeling. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 6(1).

[37] Romero-Méndez, R., Sen, M., Yang, K. T., & McClain, R. (2000). Effect of fin spacing on convection in a plate fin and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(1), 39-51.

[38] Torikoshi, K., & Xi, G. N. (1995). A Numerical Steady of Flow and Thermal Fields in Finned Tube Heat Exchangers (Effect of the Tube Diameter). IMECE Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 317(1), 453-457.

[39] Tutar, M., & Akkoca, A. (2004). Numerical analysis of fluid flow and heat transfer characteristics in three-dimensional plate fin-and-tube heat exchangers. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 46(3), 301-321.

[40] Watel, B., Harmand, S., & Desmet, B. (1999). Influence of flow velocity and fin spacing on the forced convective heat transfer from an annular-finned tube. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 42(1), 56-64.

[41] Sparrow, E. M., & Samie, F. (1985). Heat transfer and pressure drop results for one-and two-row arrays of finned tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28(12), 2247-2259.

[42] Nir, A. (1991). Heat transfer and friction factor correlations for crossflow over staggered finned tube banks. *Heat Transfer Engineering*, 12(1), 43-58.

RESEARCH ARTICLE / ARAŞTIRMA MAKALESİ

Elektrikli Araçlarda Hava Giriş Konumu ve Hızının Batarya Soğutma Performansına Etkisinin Araştırılması

Investigation of the Effect of Air Inlet Position and Velocity on Battery Cooling Performance in Electric Vehicles

Hasan UZAL¹ , Ramazan ŞENER² , Hasan OKTAY³ 

¹ Şırnak Üniversitesi, Şırnak MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü, Şırnak, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

³ Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, hava giriş konumu ve hızının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları kullanılarak elektrikli araçlarda nikel-metal hidrür (Ni-MH) batarya paketinin soğutma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elektrikli araçlara olan talebin artması, araçların güvenliğini sağlamak için gelişmiş batarya soğutma performansına ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Ni-MH batarya takımının soğutma performansı, batarya takımının 0 ila 60 mm arasında değişen giriş konumları ve sabit çıkış konumu ile hem U hem de Z kanalı geometrilerinde analiz edilmiştir. Hava giriş hızları 2 ila 6 m/s arasında değişmektedir. Sonuçlar, hava giriş konumu arttıkça sıcaklık değerlerinin düştüğünü, ancak 30 mm'lik giriş konumundan sonra düşüşün önemsiz hale geldiğini göstermektedir. Bu, hava akışını batarya takımını tamamen dolaştırmaya ve ısı transfer hızını artırmaya yönlendirmenin, hızı arttırmaktan daha etkili olduğunu göstermektedir. En iyi soğutma performansının sırasıyla 316,86-327,75 K ve 316,27-317,46 K sıcaklık değerleri ile hem U hem de Z tipi kanallar için, 30 ve 60 mm giriş konumunda ve 6 m/s hızında olduğu bulunmuştur. Ek olarak, Z-tipi kanalın U-tipi kanaldan yaklaşık %6 daha fazla ısıyı dağıttığı görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, elektrikli araçlarda batarya ısı yönetim sistemlerinin (BIYS) enerji verimliliğini artırmak için kullanılabilir. Havayı daha düşük hızlarda yönlendirerek, soğutma sisteminin enerji tüketimi azaltılabilir ve gerekli soğutma performansı korunabilir. Bu durum, elektrikli araçların menzilin artmasına ve performansının gelişmesine yol açacaktır. Böylelikle, çalışma aynı zamanda elektrikli araçlarda soğutma performansını optimize etmek ve araçların genel enerji verimliliğini artırmak için kullanılacak batarya paketi düzeninin tasarımı hakkında da fikir vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Batarya ısı yönetim, elektrikli araç, HAD, soğutma performansı

Abstract

This study examines the effect of air inlet location and velocity on the cooling performance of a nickel-metal hydride (Ni-MH) battery pack in electric vehicles (EVs) using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The increasing demand for EVs has led to a need for improved battery cooling performance in order to ensure the safety of the vehicles. The cooling performance of the Ni-MH battery pack was analyzed in both U- and Z-channel geometries, with varying input positions of the battery pack from 0 to 60 mm and constant output positions. The air intake velocities were also varied between 2 and 6 m/s. The results show that as the air intake position increases, the temperature values decrease, but the decrease becomes insignificant after the 30 mm position. This suggests that directing the air flow to fully circulate the battery pack and increase the heat transfer rate is more effective than increasing the velocity. The best cooling performance was found to be at 30- and 60-mm inlet position and 6 m/s velocity for both U- and Z-type channels, with temperature values of 316.86-327.75 K and 316.27-317.46 K respectively. Additionally, the Z-type channel was found to dissipate approximately 6% more heat than the U-type channel. The study's results can be used to improve the energy efficiency of battery thermal management systems (BTMS) in EVs. By directing the air at lower velocities, the energy consumption of the cooling system can be reduced while still maintaining the required cooling performance. This will ultimately lead to the extended range and improved performance of EVs. Additionally, the study also provides insight into the design of the battery pack layout in EVs, which can be used to optimize the cooling performance and improve the overall energy efficiency of the vehicles.

Keywords: Battery thermal management, Electric vehicles, CFD, Cooling performance

I. GİRİŞ

Ulaşımında fosil yakıt kullanımına bağlı olarak, giderek artan çevre kirliliği, sera gazı emisyonları gibi sebeplerden dolayı elektrikli ve hibrit elektrikli araç kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır [1,2]. Elektrikli araçlarda Lityum-iyon, Nikel-Kadmium ve Nikel-Metal Hidrür (Ni-MH) gibi batarya grupları güç kaynağı olarak kullanılmaktadır [3-5]. Batarya hücreleri birbirlerine küçük boşluklarda modüler formatta

bağlanarak batarya paketi oluşturulmakta ve araç içerisinde kullanılmaktadır [6]. Bataryaların şarj ve deşarjı esnasında kimyasal reaksiyonlardan dolayı ortaya ısı üretimi çıkmakta ve bu ısı elektrikli aracın çalışması esnasında dağıtılmazsa, bataryanın performansını ve ömrünü etkilemektedir [7–9]. Bu nedenle batarya paketinin etkin olarak soğutulması gerekmektedir.

Batarya soğutma yöntemleri genel olarak hava soğutma ve sıvı soğutma olarak ikiye ayrılmaktadır [6]. Hava soğutması düşük maliyeti ve güvenilirliği açısından yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Doğal ve basınçlı hava ile soğutma olarak ikiye ayrılmakta ve basınçlı hava ile soğutma yöntemi yaygın olarak bataryaların soğutulmasında kullanılmaktadır [11–13]. Li ve ark. [14], deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile lityum-iyon pillerin soğutma performanslarını çeşitli hızlarda inceleyerek, bataryaların yerleştirilme durumuna göre çoklu optimizasyonun batarya paketinin sıcaklık farkını düşüreceğini belirtmiştir. Jiaqiang ve ark. [15], 60 hücreden oluşan Li-iyon batarya grubunun hava giriş ve çıkışlarına bağlı olarak en iyi soğutma performansını HAD yöntemi ile tek yığın hücre modeli kullanarak araştırmış ve hava akış hızlarında giriş ve çıkış konumlarına bağlı olarak bölme kullanılmasının soğutma performansını artırdığını belirtmiştir. Sefidan ve ark. [16], geliştirdikleri nanoakışkan temelli soğutma ile silindirik lityum-iyon bataryanın hava ile soğutulması ile hücrelerin etkili bir şekilde maksimum sıcaklığını düşüğünü deneysel ve HAD yöntemi ile belirtmiştir. Behi ve ark. [17], oluşturduğu hibrid sistemle, piller arası mesafe, ortam sıcaklığı ve hava giriş hızının etkilerini silindirik lityum-iyon pilleri için deneysel ve HAD yöntemi ile belirlemiştir. Xu ve ark. [10], U-biçimli bir kanal içerisinde bulunan batarya grubunun çeşitli giriş konumlarına ve hızlarına göre soğutma performansını HAD yöntemi ile incelemiştir. Hong ve ark. [18], Z- tipi kanal içerisine yerleştirilen pil grubunun soğutma performansını HAD yöntemi ile incelediğinde, ikinci hava çıkışının sıcaklığı önemli ölçüde düşüğünü bildirmişlerdir. Chen ve ark. [3], Z biçimli kanal içerisine yerleştirilmiş batarya grubunda piller arası mesafenin dağılımının soğutma performansına olan etkisini araştırmışlardır. Shen ve ark. [19], Z- biçimli kanal içerisine yerleştirilen prizmatik pil gruplarının çeşitli açılarda soğutma performansını HAD yöntemiyle araştırmışlar ve pil açısı değiştiğinde, hava hızının arttığı ve sıcaklığın üniform olarak dağıldığını belirtmişlerdir. Park [20], çalışmasında hava soğutmalı Li-iyon batarya grubunun U ve Z tipi kanallar için çeşitli hava dağılımlarında hava soğutma performansını HAD yöntemi ile araştırarak, ısı verimliliğini basınç ve giriş konumunu değiştirerek karşılaştırmıştır. Xun ve ark. [21], Li-iyon batarya paketinin düz tabaka ve silindirik yığınlarının ısı performansını HAD yöntemi ile incelemiş ve karşı akış veya ortak akış düzenlemesi

ile akış yönünün periyodik olarak değiştirilmesinin termal yönetimi iyileştirebileceğini önermektedir. Yang ve ark. [22], silindirik pillerin, çeşitli konfigürasyonlarında soğutma performansını HAD yöntemi ile incelemiştir. Li ve ark. [23], U- tipi kanal geometrisine sahip batarya grubunda, pillerin konumunun soğutma performansına olan etkisini HAD yöntemi ile araştırmış ve kanal akış hızı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Liu ve Zhang [24], Z ve U- tipi kanal tipinden elde ettiği J-biçimli kanalı tasarlamışlardır. Sonuçlar, U-, Z- ve J-tipi için sıcaklık artışında sırasıyla %35,3, %46,6 ve %31,18 azalma olduğunu göstermiştir. Sabit konstrüksiyonlu U-tipi ve Z-tipi soğutma yönteminin, küçük batarya paketlerinin ihtiyaçlarını karşılayabildiği, U-tipi soğutma yönteminin sıcaklığa duyarlı durumlar için daha uygunken, Z tipinin enerji verimliliğine duyarlı durumlar için daha uygundur. J-tipi BTMS, soğutma gereksinimlerine göre ayarlanabilen büyük pil takımı için daha esnek ve daha uygun olduğu ancak yüksek enerji tüketimine sahip olduğu bildirilmiştir.

Elektrikli araçlarda batarya ısı yönetim sistemleri (BIYS), aracın performansını ve sürüş menzilini etkilemesinin yanı sıra bataryanın ömrünü etkileyen en önemli parametredir. Batarya soğutma veriminin iyileştirilmesi, yüksek sıcaklıktan dolayı patlama riskini azaltmak ve batarya ömrünü artırmak için hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle BIYS konusunda çeşitli araştırmalar ve çalışmalar mevcuttur. İlgili literatür incelendiğinde yapılan çalışmalar, farklı şekiller üzerinde çeşitli hava giriş ve çıkış konumuna bağlı olarak çeşitli geometriler üzerinde yapılmıştır. Giriş konumunun değiştirilerek, çeşitli hızlarda soğutma performansına olan etkisi ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Çeşitli giriş konumu yüksekliğinde, hava giriş hızının soğutma performansını araştırmak için çalışmamızda; U- ve Z-biçiminde kanal içerisine yerleştirilmiş 24 adet Ni-MH pil grubundan oluşan batarya takımının soğutma performansı nümerik olarak incelenmiştir. U- ve Z-biçimli kanal içerisinde bulunan batarya grubunun çeşitli hava giriş konumu ve hızına göre soğutma performansı incelenmiş ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu giriş konumunun yerden yüksekliği arttıkça sıcaklık değerlerini değiştirdiği gözlemlenmiştir.

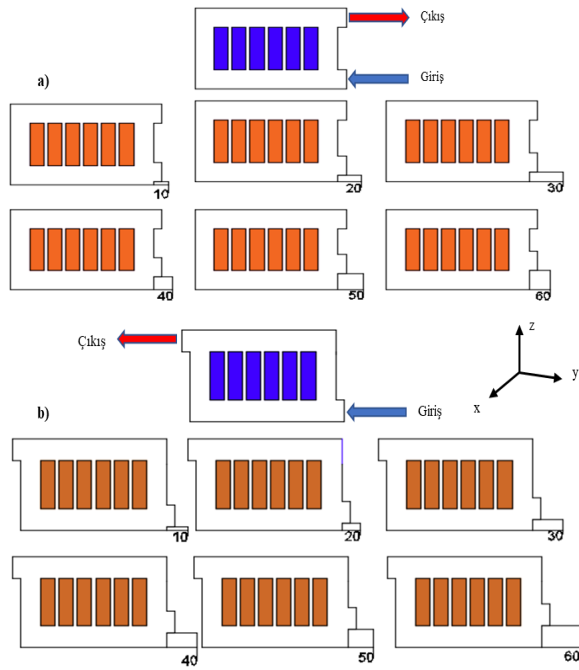
II. SAYISAL YÖNTEM

2.1 Kanal Geometrisi

U- ve Z- tipi kanalların ölçüleri Tablo 1 ve 2'de verilmektedir. Şekil 1'de hava giriş ve çıkışları gösterilmektedir. Giriş ve çıkış ölçüleri 20 mm×210 mm×60 mm, hava giriş konumu yüksekliği 0-60 mm arasında değişmekte, çıkış kısmı ise sabit kalmaktadır. Batarya ve duvarlar arası boşluklar x, y ve z yönlerinde sırasıyla 20 mm, 40 mm ve 60 mm'dir.

Tablo 1. U- ve Z- tipi kanal ölçüleri

Ölçüler	Değer (mm)
Uzunluk	360
Genişlik	210
Yükseklik	250
Giriş uzunluğu	20
Giriş yüksekliği	60
Giriş genişliği	210
Çıkış uzunluğu	20
Çıkış yüksekliği	60
Çıkış genişliği	210

**Şekil 1.** a) U- tipi b) Z- tipi kanal geometrisi ölçüleri**Tablo 2.** Batarya ölçüleri

Ölçüler	Değer (mm)
Pil çapı	35
Yükseklik	130
Batarya arası boşluk	10

2.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

HAD analizi, ısı ve akışkanlar alanında önemli bir araştırma alanıdır. Analiz ve deney yoluyla doğrulama yöntemi olarak [25], zaman ve paranın yanı sıra çok fazla deneme yanılma ile optimum çalışma şartlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Soğutma veriminin hesaplanabilmesi için öncelikle hız ve sıcaklık dağılımları belirlenmelidir. Bu çalışmada ANSYS Fluent yazılımı HAD analizi için kullanılmıştır. HAD uygulamalarında, hava, belirli bir hız değerine kadar sıkıştırılmaz olarak kabul edilebilmektedir. Türbülans akışı hesaplamak için Navier-Stokes denklemleri ile k-ε türbülans modeli kullanılmıştır ve benzer problemler için k-ε türbülans

modeli yaygın olarak kullanılmaktadır [26,27]. Batarya ısı üretim oranı, pillerin şarj/deşarj oranı, hücre sıcaklığı, şarj durumu ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Süreklilik denklemi [18,28];

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi [18,28];

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

Türbülans k-ε modeli [18,28];

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{\mu_1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\mu_1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_1 = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Burada k ve ε türbülans kinetik enerjisi ve enerji dağıtım oranı olarak geçmektedir. μ ve μ_t moleküler dinamik viskozite ve türbülans dinamik viskozite katsayılarıdır. σ_k, σ_ε, σ_T ve C_μ k-ε türbülans modeli parametreleridir. Yaygın olarak kullanılan değerler; C_μ = 0,09, C₁ = 1,4, C₂ = 1,92, σ_k = 1,0, σ_ε = 1,3, σ_T = 0,85 olarak kullanılmaktadır [3]. Hava ve batarya bölgesi için enerji denklemleri;

$$\rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda_a + \frac{\mu_1}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_b \frac{\partial T_b}{\partial x_j} \right) + \varphi_b = 0 \quad (7)$$

olarak verilebilir [18]. Burada ρ, c_p ve T değerleri havanın yoğunluk, özgül ısı ve sıcaklık değerlerini temsil etmektedir. λ_b, T_b, φ_b değerleri ise bataryanın ısı iletkenlik katsayısı sıcaklık ve toplam ısı üretim oranını göstermektedir. Pillerde aşırı gerilimden dolayı meydana gelen ısı üretimi Q₁, elektrokimyasal reaksiyonlardan dolayı entropi değişimi Q₂ ve Ni-MH bataryada şarj vedeşarj işlemi boyunca meydana gelen H₂-O₂ reaksiyonu boyunca açığa çıkan entalpi değişimi Q₃ aşağıdaki denklemleri ile ifade edilmektedir [29,30];

$$Q_1 = I^2 R \quad (8)$$

$$Q_2 = \sum_i T_b \frac{\Delta S_i}{N_i F} J_i \quad (9)$$

$$Q_3 = \sum_k \frac{\Delta H_k}{N_k F} I_k \quad (10)$$

$$\varphi_b = \frac{4(Q_1 + Q_2 + Q_3)}{\pi d^2 h} \quad (11)$$

Burada I şarj veya deşarj akımı, T_b batarya sıcaklığı, ΔS_i entropi değişimi, ΔH_j entalpi değişimi, I_j ve I_k , i ve j yönlerinde meydana gelen reaksiyon akımlarını, φ_b bataryada meydana gelen ısı üretimini belirtmektedir.

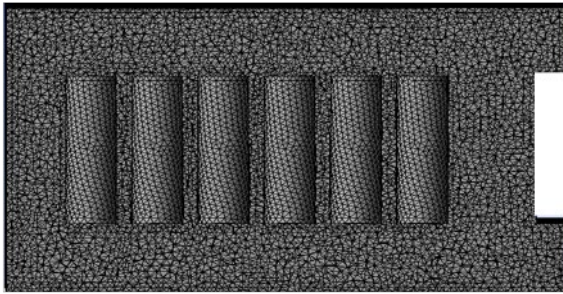
2.3 Çözüm Ağı ve Çözüm Metodu

Çözüm ağı (mesh) işlemi için baskın hesaplama tetrahedral metodu seçilmiştir. U- ve Z- tipi kanal için çözüm ağı Şekil 2'de görülmektedir. Hız girişi, basınç çıkışı ve adyabatik duvar koşulları, hava-batarya arayüzü için ise birleştirilmiş duvar koşulları belirlenmiştir. HAD (ANSYS Fluent) ile giriş konumu ve giriş havası hızının soğutma performansına olan etkisini araştırmak için kararlı durum sayısal simülasyonu kullanılmıştır. Basınç-hız bağlantı şeması SIMPLE, yönetim denklemlerinin difüzyon ve konveksiyon terimleri second-order upwind olarak seçilmiştir. İlgili değerler giriş hızları çıkış ve duvar değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

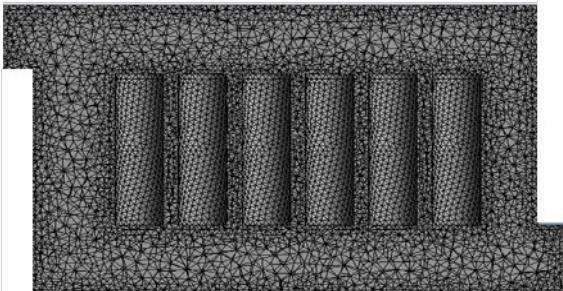
Tablo 3. Sınır Koşulları

Tipi	Değerler
Giriş	Hız: 2-6 m/s Sıcaklık: 298 K Türbülans yoğunluğu: %5 Türbülans viskozitesi oranı: %10
Çıkış	Çıkış basıncı: 1 atm
Duvar	Isı akısı: sıfır
Batarya ısı üretimi	551 W/m ³
Batarya ısı akısı	280 W/m ²

a) U- tipi kanal



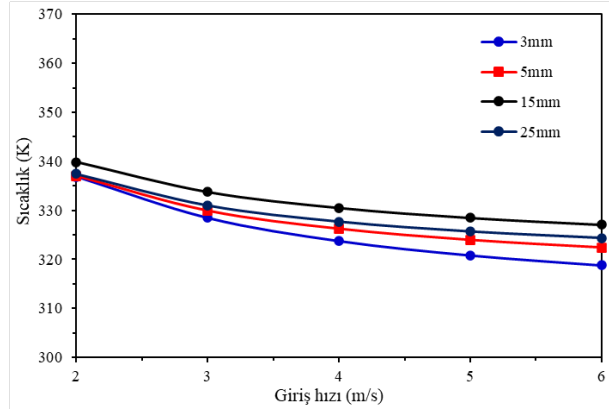
b) Z- tipi kanal



Şekil 2. a) U- ve b) Z- tipi kanalda çözüm ağı yapısı

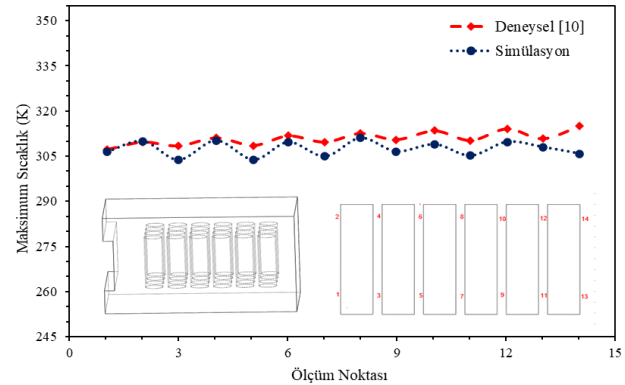
2.4 Çözüm Ağı Doğrulama İşlemi

Çözüm ağı oluşturma aşamasında baskın hesaplama metodu tetrahedral metodu seçildikten sonra, hücre boyutu çeşitli ölçülerde alınarak, elde edilen ölçümler değerlendirilmiş ve gerçek değerlere en yakın değerler seçilmiştir. Mesh işleminde hücre boyutu değeri 3, 5, 15 ve 25 mm değerleri alınarak U- tipi kanal içerisinde 2 ila 6 m/s hızlarda sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Şekil 3'te belirtilen değerlere göre 3 m/s hızında 3 mm ve 5 mm hücre boyutu değerleri arasındaki sıcaklık farkı 1,43 K ve 6 m/s hızındaki hata payı %1,11 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle HAD işlemleri 5 mm hücre boyutu değeri baz alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. Hücre boyutuna göre sıcaklık değerleri

U- tipi kanal için 3 m/s hızında Tablo 3 ve 4'te verilen sınır koşulları ve ısıl fiziksel özelliklere göre yapılan çalışma sonucu deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir [10]. Deneysel olarak elde edilen veriler ile maksimum sıcaklık değişimi 307-314,76 K arasında iken, simülasyon sonuçlarımıza göre farklı ölçüm noktalarından alınan sıcaklık değerleri 303,74-311 K arasında değişmektedir (Şekil 4). Deneysel sonuçlara göre bağıl hata %1-1,17 arasında değişmekte ve simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Deneysel uygulamalarda şarj ve deşarj esnasında batarya paketinin ısı üretimi artmaktadır. Simülasyonda ise ısı üretim miktarı sabit bir değer olarak alındığı için, simülasyon sıcaklığı, deneysel sonuçlara göre biraz daha düşük çıkabilmektedir [10].



Şekil 4. Çeşitli noktalardan alınan deneysel ve simülasyon sıcaklık değerleri

Tablo 4. Termofiziksel özellikler

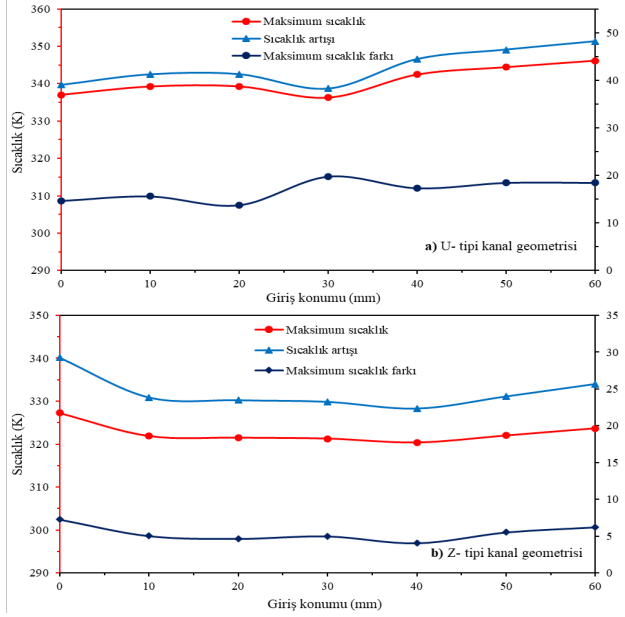
	Hava	Batarya	Batarya Kutusu
Yoğunluk (kg/m ³)	1,225	1958,7	7930
Özgül ısı (J/kg·K)	1006,43	733	500
Isı iletkenlik katsayısı (W/m·K)	0,0242	1,5	16,3
Dinamik viskozite (kg/m·s)	1,7894 × 10 ⁻⁵	-	-

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

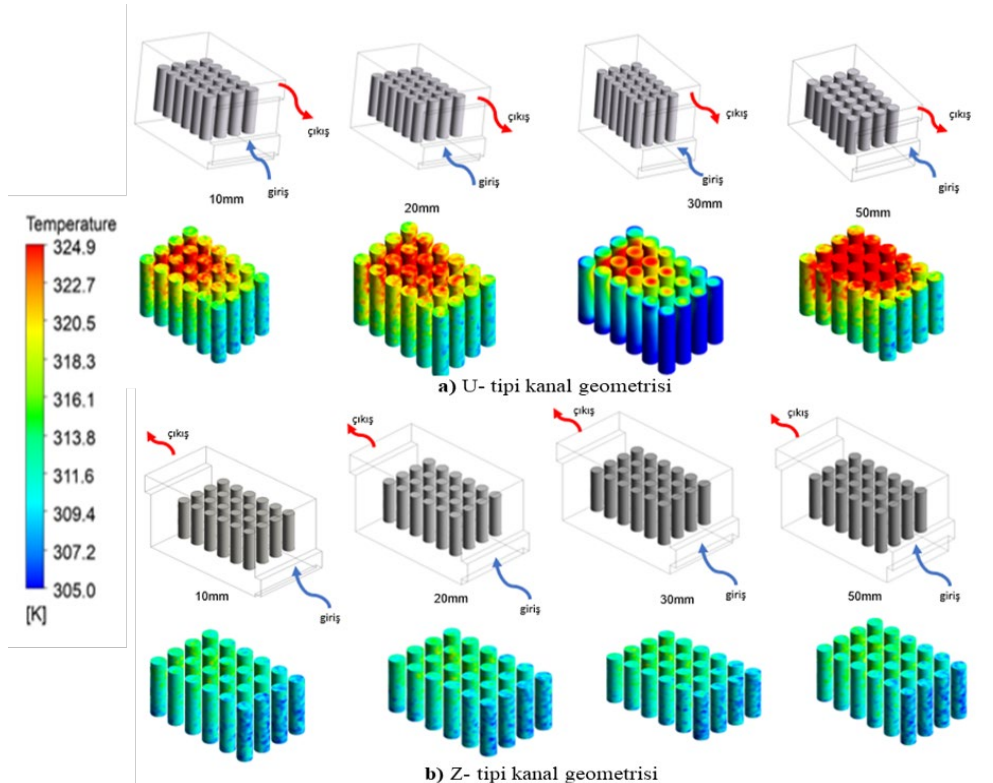
3.1 Giriş konumunun batarya soğutmasına olan etkisi

U- ve Z- tipi hava soğutma kanalının giriş kısmı 0-60 mm giriş kısmından soğutma performansına olan etkisi Şekil 5'te verilmektedir. Maksimum sıcaklık giriş konumuna göre çeşitli hızlarda (2-6 m/s) elde edilen en yüksek sıcaklık değerini, sıcaklık artışı ilk sıcaklık değerine göre farkı ve maksimum sıcaklık farkı ise en yüksek ve en düşük sıcaklık farkı ifadelerini temsil etmektedir. Şekil 6'da giriş konumlarına göre, batarya paketinde pillerin sıcaklık dağılımları verilmektedir. Sıcaklık değerleri U- tipi kanal akışında genel olarak önce artış, azalış ve daha sonra tekrar artış şeklinde meydana gelmektedir. Şekil 5 ve 6-a'da görüldüğü gibi, dairesel silindirlerin etrafındaki akışın neden olduğu hava akış hızı, batarya takımının ikinci yarısında küçülmekte ve maksimum sıcaklıkta bir artışa ve sıcaklık homojenliğinde bir azalmaya neden olmaktadır. Xu ve ark. [10] tarafından bildirilen referansta batarya takımının ikinci yarısında

sıcaklığın arttığı belirtilmiştir. Giriş konumu 30 mm'den yüksek olduğunda, giriş konumunun artmasıyla maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı hızla artmaktadır. 60 mm giriş konumu için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla 346,16 K, 23,36 K ve 48,16 K'dir. Bunun sebebi, havanın pillerin altından yukarı doğru akması ve termal doygunluğa ulaşması için ısıyı soğurmasıdır. Termal doygunluk, giriş konumunun artması ile artmakta ve bu da hava ve pil arasındaki ısı transferini bozarak sıcaklık farkını azaltmaktadır [10,31].



Şekil 5. Giriş Konumlarına göre sıcaklık farkı değerleri



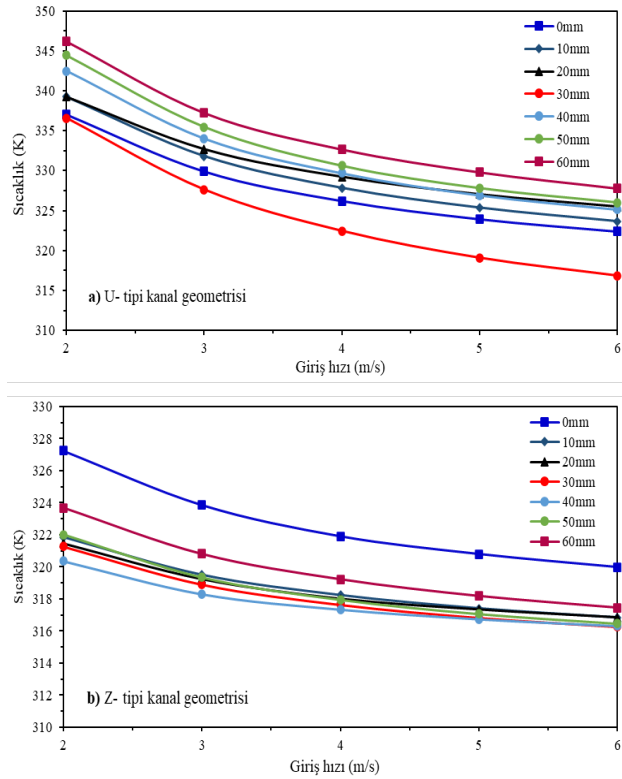
Şekil 6. 3 m/s hızında hava sıcaklık dağılımları

Şekil 5 ve 6-b'de Z- tipi kanal için sıcaklık farkları ve sıcaklık dağılımları giriş konumlarına göre verilmektedir. Sıcaklık değerleri hava giriş konumu değiştikçe belirgin şekilde düşüş göstermekte ve 50 mm giriş konumundan sonra artış göstermeye başlamıştır. 60 mm giriş konumu için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla 323,69 K, 6,23 K ve 25,69 K'dir. Sıcaklık dağılımı incelendiğinde, batarya takımının ikinci yarısından itibaren sıcaklık değerleri artmaktadır. Sıcaklık artışının belirli bir konumdan sonra artmasının temel nedeni, havanın giriş konumunda bulunan akış kanalına girmesinin zor olması ve çıkışa en yakın noktadan kanalı terk etmeye çalışması olarak belirtilebilir [19]. 30 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi şekiller için maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklık farkı ve sıcaklık artışı değerleri sırasıyla; 336,25 K, 19,71 K, 38,25 K ve 321,26 K, 4,99 K, 23,26 K olarak ölçülmüştür. Sıcaklık farkı düşüşü U- tipi kanaldan Z- tipi kanala göre maksimum sıcaklık değeri için %4 olarak gerçekleşmiştir.

3.2 Giriş hızının batarya soğutmasına olan etkisi

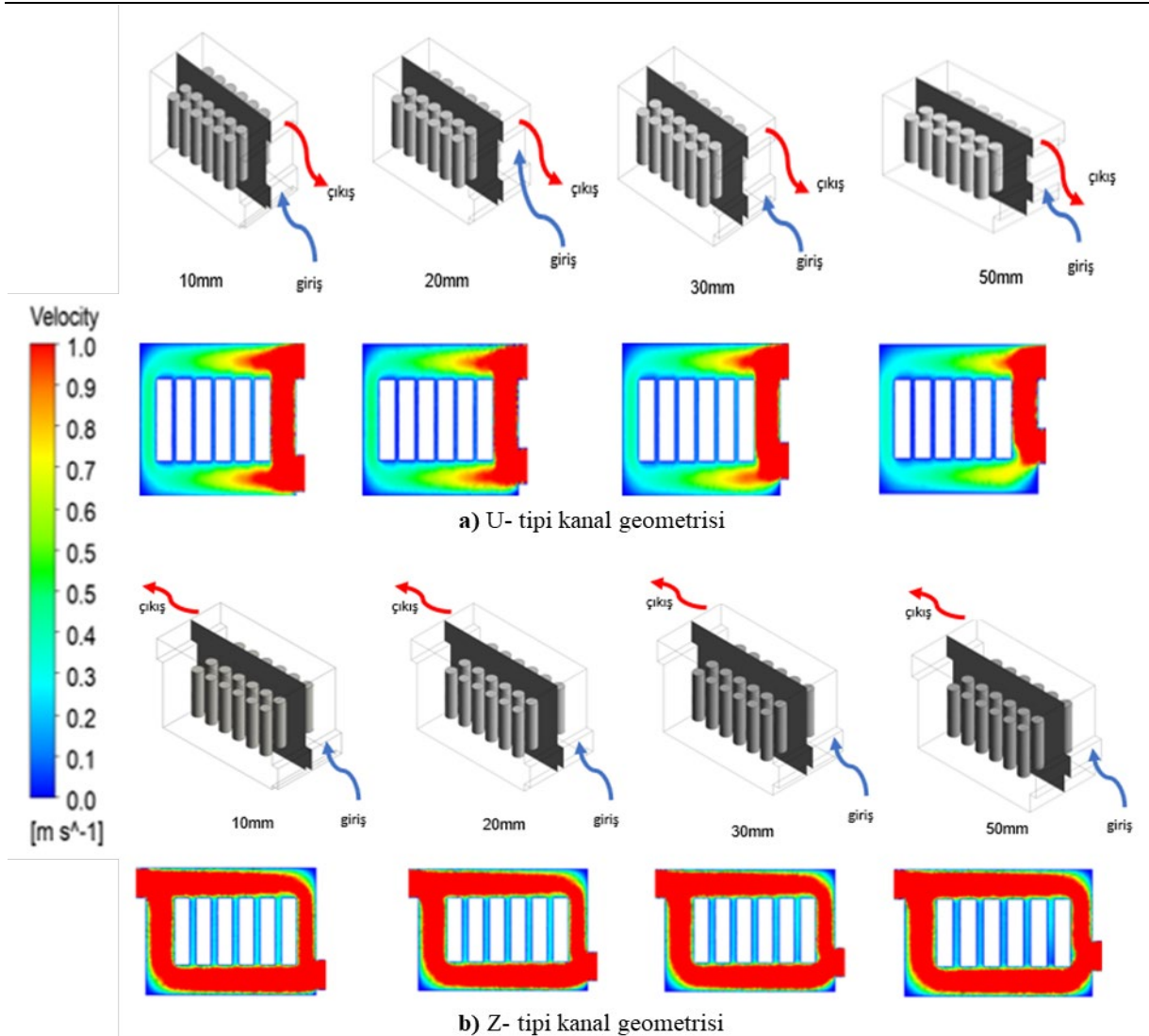
U- ve Z- tipi kanallar için sıcaklığın giriş hızına göre değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Giriş hızları 2 m/s'den 6 m/s 'ye doğru arttıkça batarya sıcaklığının düştüğü açıkça görülmektedir. U- tipi kanal için 0 ve 60 mm giriş konumunda sıcaklık değerleri 337-322,37 K ve 346,16-327,75 K arasında değişirken, 30 mm giriş konumunda bu değer 336,57-316,86 K olarak ölçülmüştür. Literatür incelendiğinde benzer eğilimler görülmektedir [3,10,23]. Giriş hızının artmasına bağlı olarak, hava ile piller arasındaki etkin ısı transferinin artması, sıcaklık düşüşüne yol açabilmektedir [10]. Şekil 7-a incelendiğinde U- tipi kanal için 30 mm giriş konumunda en düşük sıcaklık farkı oluşmuştur. Bu durum havanın ideal davranışı ile uygun giriş hızı ve konumunun eşleşmesi dolayısı ile ısı transfer mekanizmasına olumlu katkı sağlaması olabilir. Giriş hızı 3 m/s 'den sonraki artan hız aralığında, sıcaklık değerleri düşmeye başlamaktadır. Bu durum, hava giriş hızının artması ve uygun konum eşleşmesi ile bataryanın soğutulması sürecinde, ısı transferinin geliştirilmesinde olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Z- tipi kanal için giriş konumuna göre sıcaklık değişimi Şekil 7-b'de gösterilmektedir. 0 ve 60 mm giriş konumunda sıcaklık değerleri 327,6-319,97 K ve 323,69-317,46 arasında değişmektedir. 30 mm giriş konumunda en düşük sıcaklık farkına ulaşmıştır. U- tipi kanala göre 30 mm giriş konumunda %4,5 sıcaklık düşüşü meydana gelmektedir. Sıcaklık değerleri giriş konumunun değişmesine paralel olarak belirgin şekilde düşmüş, belirli bir hızdan sonra benzer sıcaklıklarda seretmeye başlamıştır. Hava giriş hızı 4 m/s'den sonraki hızlarında, sıcaklık değerleri değişim miktarı çok fazla değişmemiştir. Bunun nedeni havanın batarya grubunun ikinci yarısında termal doygunluk bölgesine ulaşması ve ısı transfer sürecinin stabil kalmasına

bağlanabilir. Buda Z- tipi bataryaların havanın yönlendirilmesinde, daha düşük hızlarda ve uygun giriş konumunda daha az enerji harcanarak soğutma gerçekleştirileceğini göstermektedir [24].



Şekil 7. Giriş hızlarına göre sıcaklık değişimleri

Şekil 8'de U- ve Z- tipi kanallara ait çeşitli konumlarda hız dağılımları verilmektedir. Şekil 8-a incelendiğinde U- tipi kanal için, giriş konumunun artmasıyla, düşük hızlarda hava ile pil grubu arasındaki soğutma performansı düşmekte ve pillerin sıcaklığı artmaktadır. Düşük giriş konumu ve hızlarında hava akışının batarya grubunu tam dolaşmasıyla piller arasındaki akış etkisi ve yüksek ısı transfer mekanizması oluşmakta ve batarya sıcaklığı düşmektedir. 30 mm giriş konumunda, ideal eşleşme gerçekleşerek hava akış hızının, ısı transferini artırarak sıcaklık değerini azalttığı görülmektedir. Şekil 8-b'de Z- tipi kanal çıkışında basınçlı hava, batarya takımının tamamında dolaşımı sağlamakta ve U- tipi kanala göre yüksek ısı transfer mekanizması gerçekleşmektedir. Giriş konumu 40 mm'den sonraki koşullarda, basınçlı havanın girişi zorlanmasıyla, uygun eşleşme gerçekleşmemekte ve batarya takımının sıcaklığında artışa neden olmaktadır.



Şekil 8. Çeşitli konumlarda hava giriş hızı dağılımları

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada U- ve Z- tipi kanallara ait batarya grubunun çeşitli hava giriş hızlarında ve konumlarında batarya soğutma performansı incelenmiştir. Bunun için 24 adet Ni-MH pil grubundan oluşan batarya grubu seçilmiş ve hesaplama için HAD yöntemi kullanılmıştır. Kanal giriş kısımlarının yerden yükseklikleri sırası ile 0-60 mm arasında ve hava giriş hızları 2-6 m/s olarak incelenmiştir. Hava giriş hızının artmasıyla, sıcaklık değerleri azalmıştır. Giriş konumu değerleri artmasıyla sıcaklık değerleri 30 mm giriş konumuna kadar azalmış, sonrasında artmaya başlamıştır. Hava giriş hızı 2-5 m/s arasında, 30 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi kanal sıcaklık artış değerleri, 39,13-22,1 K ve 22,3-20 K olarak gerçekleşmiştir. 40 mm giriş konumunda U- ve Z- tipi kanal için maksimum sıcaklık değerleri 342,44 ve 320,35 K olarak gerçekleşmiştir. Buda Z- tipi kanal çeşidinin %6 daha fazla soğutma performansına sahip olduğunu göstermektedir. Z- tipi kanal soğutma sisteminde, uygun eşleşme ve ideal hava akışı

eşleşmesi ile, ısı transfer mekanizmasının arttığı ve sıcaklık değerlerinin düştüğü söylenebilir. Daha düşük enerji akışı istenilen durumlarda, Z- tipi akış mekanizması kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Elektrikli araçlarda, batarya ömrünü belirleyen en önemli etken batarya verimidir. Etkili verim için soğutma performansının en ideal şartlara göre ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada batarya giriş konumları ve hızlarının sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiş ve elde edilen bulgular yorumlanmıştır. Gelecekteki araştırmalar için, hava çıkış konumunun soğutma performansına olan etkisinin incelenmesi ve çok amaçlı bir optimizasyonun yapılmasına katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Xie, J., Ge, Z., Zang, M., & Wang, S., Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air-cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 126, 583–593. (2017).

- [2] Gupta, A. & Kumar, H., Multi-dimensional perspectives on electric vehicles design: A mind map approach. *Cleaner Engineering & Technology*, 8 100483. (2022).
- [3] Chen, K., Chen, Y., Li, Z., Yuan, F., & Wang, S., Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 393–401. (2018).
- [4] Cengiz, M., Oh, H., & Lee, S.-H., Lithium Dendrite Growth Suppression and Ionic Conductivity of $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5\text{-P}_2\text{O}_5$ Glass Solid Electrolytes Prepared by Mechanical Milling. *Journal of The Electrochemical Society*, 166 (16), A3997–A4004. (2019).
- [5] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M., A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226, 272–288. (2013).
- [6] Kim, Y.T. & Han, S.Y., Cooling channel designs of a prismatic battery pack for electric vehicle using the deep Q-network algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119610. (2023).
- [7] Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C., Thermal runaway caused fire and explosion of lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210–224. (2012).
- [8] Rao, Z. & Wang, S., A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (9), 4554–4571. (2011)
- [9] Wang, Y.F. ve Wu, J.T., Performance improvement of thermal management system of lithium-ion battery module on purely electric AUVs. *Applied Thermal Engineering*, 146, 74–84. (2019).
- [10] Xu, Z., Yu, G., Zhang, T., & Wang, R., Cooling performance of battery pack as affected by inlet position and inlet air velocity in electric vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102382. (2022).
- [11] Xu, X.M. & He, R., Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling. *Journal of Power Sources*, 240, 33–41. (2013).
- [12] Mahamud, R. & Park, C., Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5685–5696. (2011).
- [13] Tran, T.H., Harmand, S., & Sahut, B., Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 265, 262–272. (2014).
- [14] Li, X., He, F., & Ma, L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395–402. (2013).
- [15] Jiaqiang, E., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., et al., Effects of the different air-cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Applied Thermal Engineering*, 144, 231–241. (2018).
- [16] Sefidan, A.M., Sojoudi, A., & Saha, S.C., Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 44–58. (2017).
- [17] Behi, H., Karimi, D., Behi, M., Ghanbarpour, M., Jaguemont, J., Sokkeh, M.A., et al., A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115280. (2020).
- [18] Hong, S., Zhang, X., Chen, K., & Wang, S., Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1204–1212. (2018).
- [19] Shen, X., Cai, T., He, C., Yang, Y., & Chen, M., Thermal analysis of modified Z-shaped air-cooled battery thermal management system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 58, 106356. (2023).
- [20] Park, H., A design of air flow configuration for cooling lithium-ion battery in hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 239 30–36. (2013)
- [21] Xun, J., Liu, R., & Jiao, K., Numerical and analytical modeling of lithium-ion battery thermal behaviors with different cooling designs. *Journal of Power Sources*, 233 47–61. (2013).
- [22] Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D., Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*, 80 55–65. (2015).
- [23] Li, M., Liu, Y., Wang, X., & Zhang, J., Modeling and optimization of an enhanced battery thermal management system in electric vehicles. *Front. Mech. Eng*, 14(1), 65–75. (2019).
- [24] Liu, Y. & Zhang, J., Design a J-type air-based battery thermal management system through surrogate-based optimization. *Applied Energy*, 252, 113426. (2019).
- [25] Calzolari, G. & Liu, W., Deep learning to replace, improve, or aid CFD analysis in built environment applications: A review. *Building and Environment*, 206, 108315. (2021).
- [26] Şener, R. Experimental and Numerical Analysis of a Waste Cooking Oil Biodiesel Blend used in a CI Engine. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33 (2), 299–307. (2021).
- [27] Sahbaz, M., Kentli, A., & Koten, H., Thermal Analysis and Optimization of High Power Led

-
- Armature. *Thermal Science*, 23 (2A), 637–646. (2019).
- [28] Zhang, J., Wu, X., Chen, K., Zhou, D., & Song, M. Experimental and numerical studies on an efficient transient heat transfer model for air-cooled battery thermal management systems. *Journal of Power Sources*, 490, 229539. (2021).
- [29] Sato, N. & Yagi, K., Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles. *JSAE Review*, 21(2), 205–211, (2000).
- [30] Araki, T., Nakayama, M., Fukuda, K., & Onda, K., Thermal Behavior of Small Nickel/Metal Hydride Battery during Rapid Charge and Discharge Cycles. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(6), A1128, (2005).
- [31] Xu, Z., Heat transfer performance of the rectangular heat sinks with non-uniform height thermosyphons for high power LED lamps cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 101013. (2021).

Improving the Performance of Sentiment Analysis by Ensemble Hybrid Learning Algorithm with Nlp and Cascaded Feature Extraction

Ayşe Berna ALTINEL GİRĞİN¹ , Sema ŞAHİN² 

^{1,2} *Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

Abstract

Sentiment analysis is a challenging problem in Natural Language Processing since every language has its own character within several difficulties such as ambiguity, synonymy, negative suffixes...etc. Since words with ambiguity can have different sentiment scores depending on the meaning they have in their corresponding context, we accomplished a study on Turkish language to determine whether the polarity scores of these polysemous words may differ according to their meaning. For a word with ambiguity, we first made a polarity calculation module to calculate its polarity score. This way, we calculated the polarity scores of 100 Turkish polysemous words. Then, since negation directly affects the correct meaning of the word in the sentiment analysis, a negation handler module is also implemented. After that, we prepared a sentiment polarity corpus which consists of 159,876 Turkish words including 100 Turkish polysemous words. Actually, the main purpose of this study is to detect sentiment polarity of Turkish texts by considering and building a specialized module for polysemous words. In short, we built a system for Turkish sentiment polarity detection task including these modules: Pre-processing, Polarity Calculation Module, Negation Handling Module, Feature Generation Module, and Classification Module. According to our knowledge, this is the first study which includes all of these modules in one Turkish sentiment analysis task. Finally, we conducted this corpus using an ensemble hybrid regularized learning algorithm on two self-collected Twitter-datasets. Experimental results show that the suggested approach improves the classification performance on Turkish sentiment analysis task.

Keywords: Sentiment analysis, word ambiguity, machine learning, hybrid learning algorithm, LSTM

I. INTRODUCTION

A natural language may contain semantic confusion in words due to its nature. Polysemous words can have different meanings depending on their intentional usage in the context. The purpose of the Word Sense Disambiguation (WSD) [1,2] problem is to determine the sense of a word with ambiguity in a sentence. The problem of ambiguity, which people solve with the help of their cognitive processes while communicating, is one of the important and current issues discussed in the field of NLP so that machines can solve it with algorithms.

While the studies on WSD problem were mostly done in English, we conducted this study for Turkish language, which is harder to study due to the complexity of Turkish morphology, syntactic structure, and being an agglutinative language. In the literature, there are some studies on WSD for Turkish language, for example: Açıkgöz et al. [3] studied on semantic ambiguity for Turkish language and measured the performance of the given features for different classification algorithms. Orhan and Altan [4], conducted experiments to find effective features to eliminate the ambiguity of meaning in Turkish verbs and summarized the results.

Sentiment analysis (SA) goals to determine the sentiment polarity of a word as positive or negative with the help of some outer resources such as corpus, dictionary and by using algorithms. It is known that words with multiple meanings, for instance, polysemous words, may have different sentiments (i.e., positive, negative) depending on the meaning they have. According to the studies in the literature, it is seen that polysemous words are often not taken into account or the average of the sentiment values of all meanings of ambiguous words is calculated as the sentiment value of that word [5].

Negation is an essential concept in NLP. In SA, finding the correct meaning of the word is crucial and since negation directly affects the sentiment, it should be detected prior to the analysis. In Turkish, negation usually appears in two forms. It can appear either in a word form or can appear in a suffix form.

Corresponding Author: Ayşe Berna ALTINEL GİRĞİN, Tel: 0216 777 3813, e-posta: berna.altinel@marmara.edu.tr

Submitted: 09.02.2023, **Accepted:** 28.02.2023

The preprocessing phase of the NLP process includes a stemming step. When stemming is applied to the word that includes negation, the meaning of the word is lost. To prevent these types of situations, negation must be handled before the stemming is applied to preserve the negated meaning of the word that includes negation. Although the studies for Turkish are few, it is seen that in most of the studies, the words are stemmed directly from the root and the sentiment polarity values of these roots are found. It is observed that there are very few studies which handle negation in the sentiment polarity classification task [5-6].

By considering that there is a lack of studies in literature, the purpose of this study is to make a preliminary study on whether the polarity values of Turkish words with ambiguity differ according to their meanings and to prepare a negation handler module, so that we have taken into account both forms of negation of Turkish language in the polarity classification.

Actually, the main purpose of this study is sentiment analysis of Turkish texts by considering and building a specialized module for polysemous words. Since words with ambiguity can have different sentiment scores depending on the meaning they have in their corresponding context, we accomplished a sub-module in our sentiment analysis system on Turkish language to determine whether the polarity scores of these polysemous words may differ according to their meaning. We think that this is very important since the polarity scores of polysemous words could change from their con-text to context meanwhile they can have different meanings in different contexts; which directly have the capability of changing the polarity score of the text.

Our contributions in this work are as follows:

- One of the most important purposes of this study is to show that polysemous words, which have the capability of having different meanings based on their context, could have different sentiment polarity scores according to their context. As far as we know, this is the first effort for Turkish language. By making statistical calculations and morphological analysis, we calculated different scores for the corresponding different meanings of about 100 Turkish polysemous words. This study contributes to the literature due to its unique property to be the first in kind.
- We prepared Turkish sentiment polarity corpus based on some statistical calculations instead of using translated dictionaries. This extended dictionary consists of 159,876 words including 100 polysemous words and publicly available for other researchers upon their

request. As far as we know, this study again is the first attempt on building such a dictionary for Turkish which has sentiment scores of polysemous words. As we see from the literature, there is no such dictionary including different scores for ambiguous words.

- We extracted features $\{F_1-F_{10}\}$ extracted from the extended GDEL based dictionary, which clearly seems to have an improvement on the classification task in comparing to using features extracted from conventional TF. As far as we know, there is very little effort for such a comprehensive feature extraction module for Turkish sentiment analysis task.
- We built a system for Turkish sentiment polarity detection task including these modules: 1) Pre-processing, 2) Polarity Calculation Module, 3) Negation Handling Module, 4) Feature Generation Module, and 5) Classification Module. According to our knowledge, this is the first study which includes all of these modules in one Turkish sentiment analysis task.
- The suggested algorithm in this study also includes an ensemble-based architecture, which is very valuable since there is very little effort on using ensemble-based learning algorithms for Turkish SA problem.
- By conducting several experiments in our experimental environment, we tried to show the effectiveness of the proposed algorithm over the state-of -the-arts algorithms on the sentiment polarity detection task. By using the proposed algorithm, we observed a very promising performance on Turkish sentiment analysis, which is very appreciated since there are rare significant results on Turkish sentiment analysis.
- All materials in this study (i.e., the extended dictionary, datasets and implementation) are publicly available for other researchers upon their request. This is a great advance for Turkish, since there is very little publicly available source for Turkish language.

The remainder of the paper is organized as follows: Section 2 presents related work on WSD and sentiment analysis for Turkish language. The proposed methodology, including polarity calculation, feature generation module, and negation handler module are explained in Section 3. The experimental setup, dataset, polarity calculation analysis results for polysemous words, and the corresponding experimental results of the sentiment polarity detection task are presented in Section 4. Finally, Section 5 gives the conclusion and future directions.

II. RELATED WORK

2.1 Related Work About Word Sense Disambiguation

Açıkgöz et al. [3] studied on semantic ambiguity for Turkish language and aimed to measure the effect of the performance of the given features for different classification algorithms. A randomly obtained dataset from Penn Treebank Corpus was translated into Turkish, and there were 1400 sentences in the translated dataset. C4.5, k-nearest neighbors (KNN), Random Forests(RF), Naive Bayes(NB), multilayer Perceptron, Rocchio, and Linear classification algorithms were used. In addition, SkipGram and Continuous Bag of Words (CBOW) models were used. According to their experimental results, there were some important observations: 1) SkipGram generally outperformed CBOW. 2) Increasing the window size does not increase the model performance. 3), increasing or decreasing the vector size, or increasing the corpus size did not have a remarkable effect on the success of the model.

Orhan and Altan [4], implemented some algorithms and conducted experiments to find effective features to eliminate the ambiguity of meaning in Turkish verbs. METU-Sabancı Turkish Tree Bank was used in this study. The verb "gelmek (English translation: come)" was used in the experiments and its meanings were examined gradually. By using WEKA tool, AODE, IBk, and J48 algorithms were run on the dataset. Experimental results reported in this study show that there was only a slight difference between the classification performance of the used algorithms. Moreover, it has been deduced that feature selection has a significant effect on the experiment results.

Çetiner, Yıldırım, Onay and Öksüz [7] studied on resolving the ambiguities of multiple-sense words that have the same morphological structure. Turkish KeNet word network was used to capture the meaning of the words. Segmentation of sentences was provided by Turkish BERT segmentation model. First of all, word representation vectors of BERT were created for each term in the corpus. After that, the vectors obtained from KeNet are selected according to their cosine similarity scores, and then the related term is associated with the relevant meaning in KeNet and indexed. The study was conducted on a corpus of 130 thousand news, the results of 4 queries were given as an example. The queries were performed without using the WSD module and according to the experimental results, there was no difference observed in direct indexing. A noticeable increase was detected in the queries made using the WSD module.

Mert and Dalkılıç [8] adapted Lesk and Simplified Lesk algorithms to Turkish in order to solve Turkish WSD problem. While Lesk method compares the definitions of the indefinite word and the definitions of other words in the sentence in order to remove ambiguity of the words; on the other hand, Simplified Lesk method compares the stems or roots of the words in the sentence with the definitions of the indefinite word, instead of comparing the definitions of all words. These methods were tested with 10 sample sentences and the average of those 10 runs were reported as the success rate of the model. As a result, it was seen that Lesk-like methods produced better classification results in comparing to the simplified lesk-like methods.

Aslan, Arıcan, Bayrak, Özbek, and Yıldız [9] aimed to prepare the most accurate corpus of manual tagging for tourism domain by using a large amount of Turkish data. The data set was created by selecting 14,000 comments had written by the customers on the internet, and a total of 20,000 sentences were processed with an unsigned data set. While marking the words and word groups, they were first processed according to the tourism dictionary, and the words that did not have a meaning were marked with their meanings in the general Turkish word network (KeNet). Experimental results in this study show that; 93,653 words out of 20,000 sentences were marked semantically, 1737 of the meanings came from the general Turkish word network, while the remaining 111 meanings came from the tourism word network. The authors stated this study to be a resource for future studies.

Tüysüz and Güvenoğlu [10] applied machine learning algorithms to the dataset of Semeval-2007 workshop for Turkish, and they compared their experimental results with the experimental results shared in the workshop. Within the scope of the research, test and evaluation data consisting of six words including the types classified as ten in the noun type, ten in the verb type, and other types were prepared. The prepared dataset has been tested with Semeval, NB Algorithm and Decision Tree Algorithm methods by using WEKA Tool. Due to the small number of samples in Semeval-2007, it resulted in low performance. In machine learning algorithms, more successful results were obtained compared to Semeval-2007 workshop.

Arslan, Orhan and Tahiroğlu [11] proposed a solution for Turkish WSD task. The semantic graph of Turkish lemmas was created by using the co-occurrence relation at the sentence level. First, lemmas were added to the graph database. Then, the lemmatization process was applied to the

sentences and connections were established between the lemmas. By ignoring inflected words with more than one lemma alternative, a graph without ambiguity is obtained. All lemmas collected in this graph are linked by the 'COOCCUR' relationship. NB classifier was used for pattern classification. For each lemma sequence, NB calculations were made using lemma relationship statistics. When the test results were evaluated in a controlled manner, the success rate was 68.42%, and it has been observed that this success rate increases when trained with more data sets.

Aydın and Kılıçaslan [12] improved a corpus based WSD application by using Inductive Logic Programming (ILP). WSD application was implemented with a ILP system, ALEPH (A Learning Engine for Proposing Hypotheses). Three data files were required to build the theories in ALEPH. In practice, the background information of each word's training set sentences was given to the ALEPH system by taking positive examples and negative examples, and a model was created. In the evaluation phase of this model, files containing the background information of the test set, positive samples, and negative samples were created. Finally, these files were given to the system and the test process was carried out. They concluded that most WSD techniques fail to detect the relationship between information from different lexical sources for clarification. However, ILP was successful in displaying relational information and can create a different structure with data from various sources.

Selamet and Eryiğit [13] proposed a semisupervised context based WSD approach for data augmentation for low-resource languages (LRLs). The proposed model was tested on the English dataset in order to demonstrate the accuracy of this study. The suggested semi-supervised method used context embedding and seed set. The study was tested in 9 different context-based language models (BERT, ELMo, RoBERTa, etc.) and their effects were examined. As a result, a performance increase of 28% has been achieved, thus it was conducted that the initial findings are promising. In addition to the original study, the maximum and average similarity models of the seed set were expanded according to a certain threshold value and tested in the highest performing language model.

2.2 Related Work About Sentiment Analysis

A recent study in [14] aims to guide both public and private enterprises. AutoTrain technology and bert model were used in this study. Thanks to AutoTrain, analysis can be made without knowing any statistics or mathematics. The Bert model,

unlike other models, evaluates the input from both the right and left. Thus, the margin of error of the output is minimized. According to the experimental results, the methodology presented in this study achieved 90% success.

Çılgın et al. [15] attempted to learn the public's emotional perspective on the vaccines developed during the Covid-19 epidemic. In this study, a majority learning architecture was developed using Support Vector Machines, Naive Bayes, K-nearest neighbor, Logistic regression, Random Forest and XGBoost algorithms. In order to form a dataset in this study, Turkish tweets with Covid-19 and vaccine tags between April and August 2021 were collected. According to the experimental results of the study, the percentage of people who are not antivaccine was very low.

Another study [16] aims to perform sentiment analysis on Turkish language datasets gathered from Twitter. In this study, first of all, tweets were collected using the Twitter API. After that, two different libraries were used for morphological analysis. These libraries are Zemberek Library and Snowball Library. TF-IDF technique was used as the text representation for both the texts preprocessed after Zemberek library and snowball Library. SVM, Logistic Regression, Random Forest, NB, LSTM, and SGD algorithms were applied on both datasets for classification. The analysis reported in this study states; these machine learning algorithms on these two datasets give up to 87% classification performance which is very significant and promising for Turkish sentiment analysis task.

Kirelli and Arslankaya [17] worked on sentiment analysis of tweets about global warming. Data was collected from Twitter with hashtags such as #kureselısınma, #iklimdegisikligi, and #iklimetkisi using the Twitter API. In the preprocessing step; numbers, special characters, punctuation marks, and stop words have been filtered. Then, the stemming process was applied on this cleared dataset with Zemberek library [18]. After that, the data set was classified with K-NN, SVM, and NB(Bayes) algorithms. According to their reported results, using N-gram with K-NN increased the classification success rate.

The purpose of another very recent study [19] is to make a sentiment analysis of the criticisms in the social media towards teachers and health workers during Covid-19 epidemic, especially from the perspective of children and parents. Turkish tweets containing the hashtags of health workers and teachers were collected by the Twitter API for the period of 11 March 2020 and 2 July 2021. In this dataset, for the "healthcare professionals"

hashtag there are tweets from 10324 different users and totally 15368 tweets, and for the “teachers” hashtag there are tweets from 1685 different users and totally 2956 tweets. After pre-processing of the data, dictionary-based sentiment analysis was performed at the sentence level. As a result of the analysis, 70% of the tweets shared by Twitter users to their teachers were detected as sentiment positive, and 61% of the tweets shared on their health lives were detected as sentiment positive. Moreover, a very similar recent study was accomplished by Kandiran et al. [20]. The authors attempt to understand what the society thinks about online education during the Covid-19 epidemic by doing sentiment analysis on their social media posts. The data set contains 8545 Turkish tweets. In order to get tweets from Twitter, 28 different hashtags related to online education have been used.

A new SA system implemented by Yüksel and Tan in [21], a sentiment model was proposed to analyze and classify restaurant reviews as positive, negative or neutral. The dataset used in this study was collected from the Foursquare application. From Foursquare a total of 7086 Turkish reviews from 128 different restaurants were extracted to form the dataset which was later used both in training and testing of the proposed system. As the first process, the typos of all the data in the dataset were corrected along with rooting all the words in the data to access the base form of words. For these preprocessing steps, ITU Turkish NLP Web Service and Zemberek tool were used. Then to perform classification on the reviews, first, the sentiment values were determined. As the second step, the same reviews were translated from Turkish to English using the Google Translate API. Then the sentiment values of these translated reviews were found as well using the Text Analysis API. The reason for translating all the reviews to English and finding the sentiment values of these reviews is to compare the classification results of the same reviews both in Turkish and English. For classification, three different techniques were used which are Naive Bayes (NB), the Social Information Discovery Algorithm (SIDA) proposed in this study, and Text Analysis API. In the classification approach of SIDA algorithm, the positive reviews were tagged as +1 while the negative reviews were tagged as -1 and the neutral reviews were tagged as 0, these neutral reviews were determined due to not including any words related to the concepts of restaurants, foods, etc. The classification was performed using all these three classifiers. Then the proposed approach, NB and Text Analysis API was evaluated for both Turkish and English reviews. According to the results, the SIDA algorithm performed the best in

English reviews with an 84,49% of accuracy rate. Following that, again the SIDA algorithm achieved 81,97% accuracy rate in Turkish reviews. The NB algorithm achieved 78% accuracy rate in English reviews and 73% accuracy rate in Turkish reviews. The Text Analysis API can only be evaluated for English reviews because it only works in English input. And according to that evaluation, the Text analysis API received a 59.38% accuracy rate.

Köksal and Özgür in [22] offered a transformer-based architecture that uses the by hand labelled BounTi dataset which contains Turkish tweets about particular universities in Turkey. This dataset has characteristic features of social media texts such as emojis, slang, and typo. Multilingual and Turkish transformer models such as MBERT, XLM-Roberta, and BERTurk are evaluated. According to experimental results, the proposed model reaches a macro-averaged recall score of 72,9%.

In another recent study proposed by Güran et al. in [23], sentiment analysis was performed on the social media data. Mostly the effects of optimizing the Support Vector Machine on sentiment analysis were analyzed. It has been seen that SVM techniques give the most successful results when compared with other machine learning methods in the literature such as Naive Bayes (NB), and Random Forest (RF). The selection of the appropriate kernel function and the determination of the appropriate parameters of the kernel function are of great importance in SVM success rates. The grid search method is used to find the most suitable states of the parameters that affect the mentioned performance rate. In a basic sense, unlike other machine learning methods, SVM separates 2 classes by drawing 2 optimum lines and creates a maximum-sized corridor space in the middle of the separation, instead of fitting and separating a linear line in the classification graph. For the dataset, three different data sets named VS1(3 classes, 3000 data), VS2(4 classes, 157 data), VS3(3 classes, 105 data) were used. The proposed model was tested on these sets based on the number of state separations in the datasets. The effect of revealing the most appropriate parameters for modeling on the results is also shown numerically, by observing a large difference between the highest and lowest performance in the VS1, VS2, and VS3 datasets tested. As a result, the proposed model received an average of 75.2% accuracy rate. In future studies, the authors plan to determine parameters using heuristic methods.

III. METHODOLOGY

The main purpose of our study is to attempt to develop a dictionary-based ensemble learning design for Turkish sentiment analysis task by handling both WSD and negation. The general architecture of the proposed system is given in Figure 1. Our study has four main modules: 1) Pre-processing, 2) Polarity Calculation Module, 3) Negation Handling Module, 4) Feature Generation Module and 5) Classification Module. The details of these modules are given in the below sections.

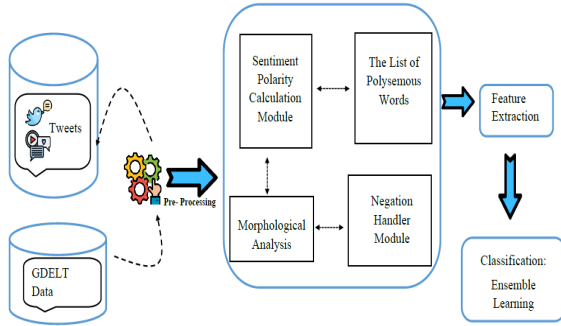


Figure 1. The general architecture of the proposed system

3.1 Pre-processing module

The first step in our system is the preprocessing phase. This step comprises of a cleaning phase which filters unwanted links, symbols, hashtags, emoji, and numbers from the tweets. Moreover, the roots of the words are found in the Zemberek library [18] as shown in Figure 2.

Tweet before preprocess : " edinilen bilgiye göre, konya'da oturan 30 yaşındaki ümit akyl eş ve 3 yaşındaki çocuğu sebahat ile tanıdıkları olan 2 aile ile birlikte sabah saatlerinde piknik yapmak üzere beşşehir'in üstünler mahallesi'ndeki karaburun plajına geldi.

Tweet after preprocess : " edin bilgi göre, , konya otur 30 yaş ümit akil eş ve 3 yaş çocuğ seyahat ile tanı ol 2 aile ile birlikte sabah saat piknik yap üzere beşşehir üstün mahalle karaburun plaj gel .

Figure 2. Example text in the preprocessing module using the Zemberek library [18].

3.2 Polarity calculation module

In order to calculate the sentiment polarity values of words, the methodology presented in [24] was taken into consideration. This study uses GDELT¹ (Global Data on Events, Languages, and Tone) Project to get Turkish documents. GDELT actually is a very large, on-going, and comprehensive open database of the real world. It captures and analyses the world's news media in many formats in over 100 languages including Turkish. The sentiment polarity calculation has been done by Equation 1 in [24]:

$$S_w = x = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i * d_i)}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (1)$$

where n shows the total number of documents the word is in, d represents polarity score of the document, f_i is the number of occurrences of the word in the document and S_w represents the calculated polarity score of the word.

Since the news in GDELT Project they have been annotated as positive or negative for their sentiment polarities, Equation 1 takes advantage of these annotated documents in order to discover the sentiment polarity scores of the words occurring in these documents. The logic behind Equation 1 is that positive sentiment polarity words commonly occur in positive sentiment polarity documents, while negative sentiment polarity words commonly occur in negative sentiment polarity documents [24].

In our previous study in [25], in order to achieve sentiment polarity values of Turkish words, we were inspired by the methodology in [24]. We prepared our sentiment polarity dictionary which contains about 84,744 Turkish words [25]. There are two stages during the building of this dictionary. 1) In the first stage, we downloaded Turkish documents from GDELT Project using the BeautifulSoup library implemented in Python. Then a preprocessing step has been performed as mentioned in Pre-processing module. 2) In the second stage, the sentiment polarity values of words occurring in these documents have been calculated according to Equation 1.

In this study, we extended our existing dictionary in [25] by downloading more documents from GDELT Project. Finally, the dictionary has about 120,000 Turkish words. A sample output of the polarity calculation module is shown in Table 1.

Table 1. Sample output of polarity calculation module

Word	Polarity (Tone) Value	Sentiment Polarity
tanı (diagnosis)	0.051187981	positive
kılıç (sword)	-0.391961507	negative
ölu (dead)	-0.104723823	negative
tatil (holiday)	0.677150085	positive
risk (risk)	-0.92443375	negative
misafir (guest)	0.115154259	positive
pahalı (expensive)	-2.307692308	negative
büyü (magic)	-0.993990332	negative
güçlü (strong)	0.538346933	positive
oyun (play)	0.333479786	positive

¹ <https://www.gdeltproject.org>

3.3 Negation handler module

In Turkish, negation usually appears in two forms. It can appear either in a word form or can appear in a suffix form. The words that cause negation are words like “güzel” (nice), “değil” (not), “hiç” (any). The suffixes that cause negation are the ones that cause negative meaning to the adjectives and verbs such as “-me”, “-ma”, “-sız”, “-siz”, “suz” and “-süz”.

To give an example for the first form of negation, which are the word form negations in the sentence “Burası güzel değil” (this place is not nice), the word “güzel” (nice) alone contains a positive sentiment but when the “değil”(not) word is used, the meaning of the sentence is changed. Using the “değil” (not) word combined with the word “güzel” (nice) together causes negation in the given sentence. To generalize, words like “yok” (none), “değil” (not), “hiç” (any) came after the words. It negates the previous word in the sentence and together it causes negation. To give an example for the second form of negation which are suffix form negations, for instance, the verb “yapmamak” (not to do) has negative sentiment and includes negation due to including the suffix “-ma”. The stem of the word “yapmamak” (not to do) is “yap” (do) has a neutral sentiment, but when the “-ma” suffix is added to the word the word becomes negated. To generalize, when the suffixes “-me”, “-ma”, “-sız”, “-siz”, “suz” and “-süz” are added to the verbs and adjectives, they become negated.

Negation is an important concept in NLP. In sentiment analysis, finding the correct meaning of the polysemous word is very crucial and since negation directly affects the sentiment and it should be detected prior to the analysis. Generally, in most NLP tasks, the preprocessing is an important step. Usually preprocessing includes steps like stemming and stop, word filtering, etc. In the second form of negation, when stemming is applied to the word that includes negation, the meaning of the word is lost. To prevent these types of situations, negation must be handled before the stemming is applied to preserve the negated meaning of the polysemous word that include negation.

A negation module in our study is implemented which handles both forms of negation. For the negation module, a rule-based approach was used. To handle negation, first the morphological analysis of sentences is found using a context based morphological analyzer tool. The output of a morphological analysis of a sample sentence using the ITU NLP tool and sentiment polarity scores of the words are given below in Table 2.

Table 2. Sample Output from Nlp Morphological Analyzer Tool and Sentiment Polarity Scores of the Words

Sentence: “Sinemaya gitmemiz ne kadar güzel oldu” (How nice it was that we went to the cinema)		
Word	Polarity (Tone) Value	Sentiment Polarity
“sinemaya” (to the cinema)	0.051187981 -0.391961507	positive negative
“gitmemiz” (we go)	-0.104723823	negative
“ne” (how)	0.677150085	positive
“kadar” (much)	-0.92443375	negative
“güzel” (nice)	0.115154259	positive
“oldu”(it was)	-2.307692308	negative

From the morphological analysis, the stems and tags of the words can be found separately. In this study, the negation handler module deals with both forms of negation by using rule-based approaches. Different rules were applied to solve each form of negation since the handling process for each form of negation differs. Word-based negation, which is the first form of negation, is caused by words such as “yok” (none), “değil” (not), and “hiç” (any) in Turkish. In the negation model, a negation list containing these words is created, which is called `negation_list1`, and this list is used to detect the word-based negations. To detect all negations in a given sentence, the first and the roots of each word are checked from the `negation_list1`. If the word in the sentence is in `negation_list1`, the module finds the word that comes before the negation word and combines it with the negation word. After the combination process, the combined word is tagged with the “neg_” keyword. To give an example; in the “Orası güzel değil” (it's not nice) sentence, the word “değil” (not) together with the “güzel” (nice) word causes negation. In the negation handler module, the root of each word in the given sentence is checked from the `negation_list1`, and since the “değil” (not) word is in the `negation_list1`, the word comes before the “değil” (not) word which is “güzel” (nice) word is combined with the “değil” (not) word and tagged with the “neg_” keyword to handle the negation. After this process, the sentence became “Ora neg_güzel-değil değil”. The structure of the sentence was not corrupted; only the negated word is tagged with this process.

To handle the second form of negation which is caused by suffixes, different rules are applied for different word tags. When “-me”, “-ma”, “-sız”, “-siz”, “suz” and “-süz” suffixes are used in verbs, nouns and adjectives they cause negation. For example, for “gel” (come) word which is a verb,

when “-me” suffix is used on this verb, the verb becomes “gelme” (not come). and the verbs become negated. In the negation handler module, a negation list is created, which is called “negation_list2”. This list includes the suffixes that cause negation in verbs, nouns, adjectives, which this list will be used for detecting these forms of negation. In the negation module, when the second form of negation is detected, the word that contains the negation is tagged with “neg_” keyword to represent the negation. To detect the second form of negation, the suffixes given above are checked inside the words, if any word includes these suffixes, the word will be tagged as negation. In the negation module, different rules are applied to detect negation for different word types such as verbs, adjectives, and nouns. First, the morphological analysis of each word is derived by applying the morphological analysis to the given sentence. From the morphological analysis, the tag of words is detected. The negation module is executed for each word in the sentence given to the negation module.

The module checks the type of the word. According to the type of the word, the negations are handled. If the type of the word is detected as a noun, the suffixes of the word are checked. If the word contains any suffix specified in negation_list2, the noun is tagged as negation. To give an example, the “Sevinçsiz kaldım” (I'm without joy) sentence is considered as shown in Table 3:

Table 3. Morphological Analysis of the Sample Sentence for Noun Type Negations

Sentence: “Sevinçsiz kaldım” (I'm without joy)	
Word	Morphological Analysis
“sevinçsiz” (without joy) kaldım” (I'm)	sinema+Noun+A3sg+Pnon+Dat git+Verb+Pos^DB+Noun+Inf2+A3sg+P1pl+ Nom

As it can be seen from Table 3, the word “Sevinçsiz” (without joy) is a noun and it contains the suffix “-siz” which is one of the suffixes that causes negation found in the negation_list2. As a result, the word “Sevinçsiz” (without joy) is detected as a negation word and tagged using the “neg_” keyword. The output is “neg_sevinç kal”. As it can be seen from the example, besides detecting the negation, the roots of the words in the sentence are also found in this process, that is, why in the output the stems of the words appear instead of the word itself.

A similar rule is applied for adjective word types to detect negation. According to the

morphological analysis of the word, if the tag of the word is an adjective, the suffixes that cause negation found in the negation_list2 are searched within the word. If the word contains any of the suffixes from the negation_list2, it is tagged with the “neg_” keyword. For example, when the “İnançsız olmak” (to be unbeliever) sentence is given to the negation module, from the morphological analysis of each word in the sentence the tag of words are checked.

The morphological analysis of the word “inançsız” (unbeliever) is shown in Table 4. According to the morphological analysis of the words, the word “inançsız” (unbeliever) has an adjective tag and the word also includes the “-sız” suffix which is one of the suffixes that cause negation in adjective type words. In the negation module, the word “inançsız” (unbeliever) is tagged as a negation. As an output, when the negations are handled, the sentence becomes “neg_inanç or”.

Table 4. Morphological Analysis of the Sample Sentence for Adjective Type Negations

Sentence: “İnançsız olmak” (to be unbeliever)	
Word	Morphological Analysis
“inançsız” ” (unbeliever)	inançsız+Adj ol+Verb+Pos^DB+Noun+Inf1+A3sg+Pnon+Nom

The last type of word negation is verb type negation; a different approach was used to detect verb type negation. To detect the negation of the words in verb form, the properties of the ITU NLP morphological analyzer were used. With the morphological analyzer, the negativity of words can be detected. For example, when the “Gelmemek senin tercihin” (It's your choice not to come) sentence is morphologically analyzed, according to Table 5, the word “gelmemek” (not to come) has the verb as a tag. And if the verb is negative, it includes the “Neg^” tag.

Table 5. Morphological Analysis of the Sample Sentence For Verb Type Negations

Sentence: “Gelmemek senin tercihin” (It's your choice not to come)	
Word	Morphological Analysis
“gelmemek” (not to come)	gel+Verb+Neg^DB+Noun+Inf1+A3sg+Pnon+ Nom
“senin” (your)	sen+Pron+Pers+A2sg+Pnon+Gen
“tercihin” (your choice)	tercih+Noun+A3sg+Pnon+Gen

Therefore, verb-type words can be classified as negation if they contain the tag “Neg^” in their morphological analysis. So to handle verb type negation. The “Neg^” tag is searched if the word has the verb tag. If the verb includes the specified tag, it is tagged as a negation. For example, we can consider the sample word given in Table 5. According to the sample sentence, the word “gelmemek” (not to come) has the tag and includes the “Neg^” tag, therefore it will be tagged as negation using the “neg_” keyword. As an output after the negation handling process, the output when the sample sentence in Table 5 is given, which is “neg_gel sen tercih”.

To conclude, the negation handler module detects two forms of negation. After the negations are detected, each word is also stemmed. Different rule-based approaches were used to detect

different forms of negation. The negation module takes sentences as input and according to the morphological analysis of sentences, each word in the sentence is checked and tagged if the word has negation, it is tagged accordingly. Each word is checked if it includes any form of negation. If the word does not have the first form of negation, the word is checked if it includes the second form of negation. In the second form of negation, there are different negation types for different types of words such as verbs, nouns, adjectives. Each word is checked if it includes any type of the second form of negation. To understand how the negation module performs, 10 sample sentences were given to the negation module as an input. The results can be seen from Table 6.

Table 6. Testing of the Negation Module with 10 Sample Sentences

Input Sentence	Output
“Bu insanların akılsız olması hiç güzel değil” (It's not nice that these people are mindless)	bu insan neg_akılsız neg_ol-hiç hiç neg_güzel-değil değil
“Geliyor değilim” (I'm not coming)	neg_gel-değil değil
“Değilim seninle iyi” (I'm not fine with you)	neg_değil sen iyi
“Çalışmaman bizi çok üzüyor” (It makes us very sad that you don't work)	neg_çalış biz çok üz
“Gelmemek ya da gitmemek senin tercihin” (It's your choice to not to come or not to go)	neg_gel ya da neg_git sen tercih
“Bu işleri yapmaman senin suçun” (It's your fault for not doing these works)	bu iş neg_yap sen suç
“Beni sevmiyorsun”(You do not love me)	ben neg_sev
“Böyle inançsız olarak nasıl yaşıyorsun” (How do you live without faith like this)	böyle neg_inanç olarak nasıl yaşa

3.4 Feature Generation Module

We prepare our tweet vectors by using the sentiment polarity scores of the words in the tweets. In other words, the feature vectors in our classification system comprises of sentiment polarity scores of the words gathered from our extended sentiment polarity score dictionary, which includes about 120 words.

We represent tweets in our test dataset using 10 features. These features are given in Equations 2-12:

F_1 shows the number of words which have positive sentiment polarity in a given text as specified in Equation 2:

$$F_1: \sum_{i=1}^n PositiveSentiment_word_i \quad (2)$$

F_2 represents the number of words which have negative sentiment polarity in a given tweet as specified in Equation 3:

$$F_2: \sum_{i=1}^n NegativeSentiment_word_i \quad (3)$$

F_3 shows the number of total occurrences of positive sentiment polarity words in the text as specified in Equation 4:

$$F_3: \sum_{i=1}^n TF * PositiveSentiment_word_i \quad (4)$$

F_4 demonstrates the number of total occurrences of negative sentiment polarity words in the text as specified in Equation 5:

$$F_4: \sum_{i=1}^n TF * NegativeSentiment_word_i \quad (5)$$

F_5 indicates the average positive sentiment polarity score in a given text as specified in Equation 6:

$$F_5: \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PositiveSentiment_score_i \quad (6)$$

F_6 represents the average negative sentiment polarity score in a given text as specified in Equation 7:

$$F_6: \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NegativeSentiment_score_i \quad (7)$$

F_7 demonstrates the number of positive seed words in a given text as specified in Equation 8:

$$F_7: \sum_{i=1}^n PositiveSeed_word_i \quad (8)$$

F_8 shows the number of negative seed words in a given text as specified in Equation 9:

$$F_8: \sum_{i=1}^n NegativeSeed_word_i \quad (9)$$

F_9 indicates the number of total positive seed word occurrences in a given text as specified in Equation 10:

$$F_9: \sum_{i=1}^n TF * PositiveSeed_word_i \quad (10)$$

F_{10} demonstrates the number of total negative seed word occurrences in a given text as specified in Equation 11:

$$F_{10}: \sum_{i=1}^n TF * NegativeSeed_word_i \quad (11)$$

In our text representation methodology, we attempt to represent text instances using Equation 12.

$$text_i: \{ F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{10} \} \quad (12)$$

where $text_i$ is a tweet instance in our test dataset and F_{1-10} are the features explained above with Equations 2-11.

The list of seed words and their corresponding seed scores are represented in Table 7.

Table 7. The list of seed words

Seed Word	English Translation	Seed Score
Acayip	Strange	2
Az	Little	-1
Azıcık	Few	-1
aşırı	Extreme	2
Bayağı	Pretty	1
Büyük	Large	1
Cidden	Really	1
Devamlı	Continuous	1
En	Most	2
Fazla	More	2
Gayet	Plenty	1
gerçekten	Truly	1
Hakkaten	Really	1
Hep	Always	1
Kesinlikle	Definitely	1
Kuşkusuz	No doubt	1
Muhteşem	Wonderful	2
Nadiren	Rarely	-1

Sürekli	Continually	1
Tam	Full	1
Tamamen	Completely	1
Yeterince	Enough	1
Çok	A lot	2
özellikle	Especially	1

3.5 Classification module

In this module; textual datasets which include polysemous words, are classified according to their sentiment polarity. The purpose of this classification step is to decide the sentiment polarity of the test samples, whether they are positive or negative. This classification task is performed on two self-collected datasets. The information about these datasets is given in Section 4.2.

The classification module in this study includes an ensemble form of the SVM, NB, RF, and LSTM classifiers. First of all, we implemented SVM, NB, RF, and LSTM classifiers in Python using Python Data Analysis Library (pandas v1.3.5), Machine Learning Libraries (scikit learn 1.0.2, sklearn.ensemble and Pytorch 1.13.0).

Then we implemented a majority voting scheme in the classification phase to determine the output of the ensemble algorithm, which combines the decisions of SVM, NB, RF, and LSTM classifiers. A brief description of classifiers is given below:

Support Vector Machine (SVM):

SVM is a very popular supervised machine learning algorithm. The main purpose of this commonly used algorithm is to decide the labels of the data using support vectors [26]. It figures out some support vectors in order to use a certain maximum margin which then used as a decision boundary when an unlabeled data instance enters into the classification system as it is represented in Figure 3. SVM can be used as both binary categorization systems and multiclass categorization systems with “one-against-one” and “one-against-the-rest” techniques.

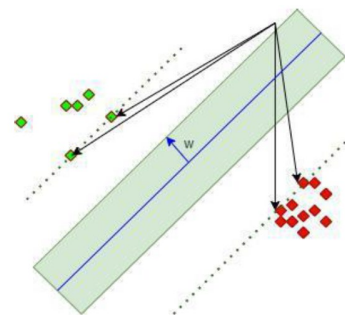


Figure 3. Representation of maximum margin in SVM

Naive Bayes Classifier (NB):

NB is again a very popular machine learning algorithm which can be easily implemented [27]. Its origin is the Bayes Theorem and uses statistical-based calculations to assign appropriate class labels for the classification tasks as it is given in Equation (13).

$$P(Class|Data) = \frac{P(Data|Class) \cdot P(Class)}{P(Data)} \quad (13)$$

where $P(Data|Class)$ shows the likelihood probability of the predictor given the class, $P(Class)$ represents the prior probability of the class (y output), $P(Data)$ signifies the prior probability of the predictor (X features) and $P(Class|Data)$ denotes the posterior probability of the class given the predictor [28].

Random Forest (RF):

Random Forest is a machine learning model based on decision trees. It makes output predictions by combining the results of a set of regression decision trees. Each tree is independent of each other. All trees in the forest have the same distribution and all trees in the forest depend on the random vector sampled from the input data [29].

Long Short-Term Memory (LSTM):

LSTM is a branch of the Recurrent Neural Network (RNN) architecture [30]. LSTM was developed as a result of the search for a solution to the disappearing gradient problem encountered in RNN networks [31]. The general structure of LSTM consists of cell, forget, input, and output sections. Cell is the memory of the system. Input and output are the sections where the inputs and outputs to the cell are determined. The Forget section is the critical part that determines which information will be kept or deleted using the sigmoid function. A general LSTM architecture is shown in Figure 4.

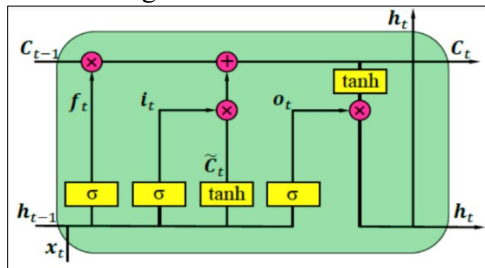


Figure 4. Representation of LSTM algorithm [35]

In order to improve the implemented LSTM model, we also apply a few regularization techniques to the output of LSTM before the softmax layer. We implemented L2 regularization [32], Manifold regularization [33] and Discrete

Regularization [34] to the weight of the softmax layer.

IV. EXPERIMENTS**4.1 Experimental setting and computer specs**

We apply 10-fold Cross-Validation (CV) on our dataset and report the average of those 10 runs. All experiments presented in this paper are carried out on a computer with Intel(R) CPU at 4.70 GHz with 64 GB of memory. BeautifulSoup library is used for python during the data collection from GDELT project. SVM, NB, RF, and LSTM classifiers have been implemented in Python using Python Data Analysis Library (pandas v1.3.5), Machine Learning Libraries (scikit learn 1.0.2, sklearn.ensemble and Pytorch 1.13.0). We run SVM with 'scikit learn' library with LinearSVC classifier with 'C'=1, 'dual'='false', 'penalty' = 'l2' parameters. Besides, LSTM's hyperparameters used in this implementation are shown in Figure 5.

```
# Build the model
print("Build model...")
model = Sequential()
model.add(LSTM(hidden_nodes, return_sequences=False, input_shape=(word_vec_length,
char_vec_length)))
model.add(Dropout(0.6))
model.add(Dense(2))
model.add(Activation('softmax'))
model.compile(loss='categorical_crossentropy', optimizer='adam')
batch_size=1000
model.fit(train_x, train_y, batch_size=batch_size, epochs=10, validation_data=(validate_x,
validate_y))
```

Figure 5. Hyperparameters of LSTM

4.2 Dataset

Two different datasets were used for Sentiment Polarity detection task. These datasets are collected by using 100 Turkish polysemous words as the keywords from Twitter. These polysemous words are selected from Turkish Language Institute (TDK¹). Twelve of the selected keywords are listed in Table 8:

Table 8. Twelve of Turkish polysemous words which were used as keywords when gathering data from Twitter.

Turkish Word	English Translation
Yüz	Face
Aç	Hungry
Bin	Thousand
Doğru	True
Gül	Rose
Kara	Black
Kız	Girl
Sağ	Right
Yaş	Age
Yaz	Summer
Dil	Tongue
Yağ	Oil

The steps of this process are as follows: 1) We collected tweets for each keyword (i.e., polysemous words in our

list), 2) We labelled these tweets according to the meaning of that polysemous word. 3) Then we labelled the same tweets according to their sentiment polarity as they are positive or negative.

In other words, two different labelling process (i.e., labelling according to the appropriate meaning of the polysemous word in the tweet and labelling according to the sentiment polarity of the tweet) has been performed on both datasets by human experts.

For the first dataset, we collected 30 tweets for each polysemous word in our polysemous-words list, and the first dataset finally includes 3000 tweets. For the second dataset, we collected 100 tweets for each polysemous word in our polysemous-words list, and the second dataset finally includes 10000 tweets.

Twitter-3k dataset: This dataset includes 3000 tweets, and of these, 47% are sentimentally positive and the remaining 53% are sentimentally negative.

Twitter -10k dataset: This dataset includes 10,000 tweets, and of these, 42% are sentimentally positive and the remaining 58% are sentimentally negative.
 1 <https://sozluk.gov.tr/>

Details of these datasets are given in Figure 6.

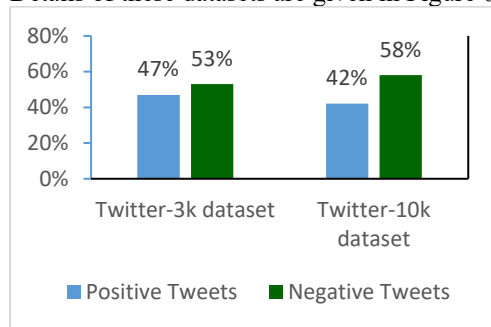


Figure 6. Properties of datasets

4.3 Sentiment-polarity corpus: GDELT Dictionary

In order to achieve sentiment polarity values of Turkish words, we took into account the dictionary which has been prepared for the study in [25]. This dictionary contains about 84,744 Turkish words. There are two stages during the building of this dictionary. 1) In the first stage, we downloaded Turkish documents from GDELT¹ (Global Data on Events, Languages, and Tone) Project using the BeautifulSoup library implemented in python. Then a cleaning process has been performed by filtering unwanted links, symbols, etc., in the text. After that, morphological analysis has been done with Zemberek library [18]. 2) In the second stage, the sentiment polarity values of words occurring in these documents have been calculated according to the Eq. (1).

In this study, we extended the dictionary in the study in [25] by downloading more documents from GDELT Project. Finally, the dictionary has about 120,000 Turkish words. The visualization of these steps are shown in Figure 7.

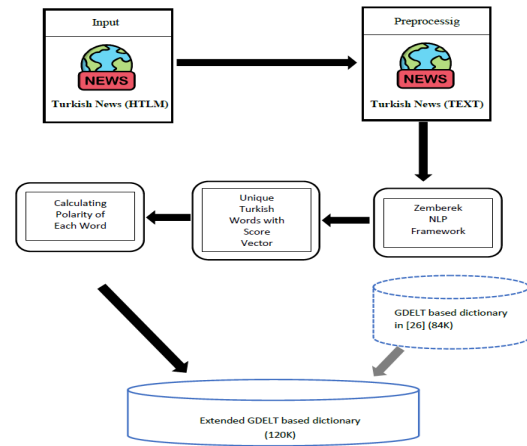


Figure 7. The visualization of building GDELT based dictionary

4.4 The list of polysemous words

We prepared a list of polysemous words which contains 100 Turkish polysemous words. Ten of them are as: “Yüz” (face), “Kız” (Girl), “Bin” (thousand), “Yaş” (Age), “Gül” (Rose), “Kara” (Black), “Sağ” (Right), “Aç” (Hungry), “Doğru” (True) and “Yaz” (Summer) are examined. The details of these polysemous words are given in Table 9. It shows the number of different meanings for each word. For instance, for the word “Yüz” (face), we examined 5000 different sentences, which were collected from GDELT Project and contained “Yüz” (face) and labeled sentences according to the meanings of the word. We detected 4 main meanings for “Yüz” (face): Hundreds (Numbers), Faces (parts of body), Surface (the top of any item), and Swimming (activity in the sea). The details about these different meanings of “Yüz” (face) are shown in Table 10.

Table 9. Number of different meanings of polysemous words

Word	# Sentences Examined	#Different Meanings
“Yüz” (Face)	5000	4
“Aç” (Hungry)	5000	2
“Bin” (Thousand)	5000	2
“Doğru” (True)	5000	2
“Gül” (Rose)	5000	2
“Kara” (Black)	5000	2
“Kız” (Girl)	5000	2
“Sağ” (Right)	5000	2
“Yaş” (Age)	5000	2
“Yaz” (Summer)	5000	2
“Dil” (Tongue)	5000	5
“Yağ” (Oil)	5000	6

4.5 Sentiment analysis of polysemous words

We found the meaning of Turkish polysemous words in their corresponding context and calculated the polarity value according to the related meaning. And the results obtained for each word are shown in Tables 10-19. For all meanings of the word “Yüz” (Face), we expect positive polarity values or polarity values that are close to 0 because neither of them has a negative meaning. According to the obtained results which can be seen in Table. 10, all four meanings of “Yüz” (Face) get both positive sentiment values.

Table 10. Details about the different meanings of “Yüz” (Face).

Class	Meaning	#Different Meanings
1	Hundred	4
2	Face	2
3	Surface	2
4	Swimming	2

As a result of the classification study, for the word “Aç” (Hungry), for the first meaning, we expect a negative sentiment polarity value because it has a negative meaning, and for the second meaning, we expect a positive polarity value because it has not a negative meaning. According to the calculated results which can be seen in Table 11, the first class gets negative polarity value and the second class gets positive polarity value as expected.

Table 11. Details about the different meanings of “Aç” (Hungry).

Class	Meaning	Average Score	Polarity
1	Hungry	-0.6157	
2	Opening	1.4096	

“Bin” (Thousand) has 2 meanings: Thousands and Get on. For all meanings of the word “Bin” (Thousand), we expect positive polarity values or polarity values that are close to 0 because neither of them has a negative meaning. According to the obtained results which can be seen in Table 12, both meanings have positive polarity score.

Table 12. Details about the different meanings of “Bin” (Thousand).

Class	Meaning	Average Score	Polarity
1	Thousand	0.2103	
2	Get on	0.3050	

As a result of the classification study for the word “Doğru” (True), for both meanings, we expect positive polarity values or polarity values that are close to 0,

because neither of them has a negative meaning. Still, we human beings expect the positive sentiment polarity score of the first meaning will be higher than the positive sentiment polarity score of the second meaning, such as consciousness. According to the calculated scores which are reported in Table 13, the first meaning of the word “Doğru” (True) has 3.2103 positive polarity score, while the second meaning of the word “Doğru” (True) has 0.1700 positive polarity score.

Table 13. Details about the different meanings of “Doğru” (True).

Class	Meaning	Average Score	Polarity
1	True (not lie)	3.2103	
2	a Line in Mathematics	0.1700	

As a result of the classification study, for the word “Gül” (Rose), for the first meaning, we expect a positive polarity value or polarity value that is close to 0, and for the second meaning, we expect a positive polarity value, because neither of them has a negative meaning. According to the obtained results which are listed in Table 14, both meanings get positive sentiment polarity score. However, the first meaning of the word “Gül” (Rose) has 1.2103 positive polarity score while the second meaning of the word “Gül” (Rose) has 3.1700 positive polarity score.

Table 14. Details about the different meanings of “Gül” (Rose).

Class	Meaning	Average Score	Polarity
1	Rose	1.2103	
2	Laughing	3.1700	

As a result of the classification study for the word “Kara” (Black), we human beings expect a neutral sentiment polarity score which is very close to zero since the first meaning reflects neither negative or positive feeling to the readers. According to the experimental results listed in Table 15, the second meaning of “Kara” (Black) has a negative sentiment score, while the first meaning of “Kara” (Black) has a positive sentiment score.

Table 15. Details about the different meanings of “Kara” (Black).

Class	Meaning	Average Polarity Score
1	The part of the earth not covered by the sea, soil	0.2103
2	Black	-2.1700

As a result of the classification study for the word “Kız” (Girl), we human beings expect a neutral sentiment

polarity score which is very close to zero since the first meaning reflects neither negative or positive feeling to the readers. Besides, we human beings expect a negative sentiment polarity score since the second meaning reflects a negative feeling to the reader. According to the experimental results listed in Table 16, the second meaning of “Kız” (Girl) has a negative sentiment score, while the first meaning of “Kız” (Girl) has a positive sentiment score.

Table 16. Details about the different meanings of “Kız” (Girl).

Class	Meaning	Average Polarity Score
1	Girl	0.2103
2	Being angry	-4.1700

“Sağ” (Right) has 2 meanings and we expect positive polarity values or polarity values that are close to 0 because neither of them has a negative meaning. According to the obtained results which can be seen in Table 17, both meanings have positive polarity score.

Table 17. Details about the different meanings of “Sağ” (Right).

Class	Meaning	Average Polarity Score
1	Right -indicating direction, side	0.2103
2	Alive	1.1700

As a result of the classification study for the word “Yaş” (Age), we human beings expect a neutral sentiment polarity score which is very close to zero since the first meaning reflects neither negative or positive feeling to the readers. Besides, we human beings expect a negative sentiment polarity score since the second meaning reflects a negative feeling to the readers. According to the experimental results listed in Table 18, the second meaning of “Yaş” (Age) has a negative sentiment score, while the first meaning of “Yaş” (Age) has a positive sentiment score.

Table 18. Details about the different meanings of “Yaş” (Age).

Class	Meaning	Average Polarity Score
1	Age	0.2103
2	Wet	-2.1700

As a result of the classification study for the word “Yaz” (Summer), we human beings expect a neutral sentiment polarity score which is very close to zero since the second meaning reflects neither negative or positive feeling to the readers. Besides, we human beings expect a positive sentiment polarity score since the first meaning reflects a positive feeling to the

readers. According to the experimental results listed in Table 19, the second meaning of “Yaz” (Summer) has a negative sentiment score, while the first meaning of “Yaz” (Summer) has a positive score.

Table 19. Details about the different meanings of “Yaz” (Summer).

Class	Meaning	Average Polarity Score
1	Summer	2.2103
2	Writing	0.1700

4.6 Experimental results and discussion

In order to show the effectiveness of the presented approach, we conducted some experiments on Twitter-3k and Twitter-10k datasets. As it is reported in Section 4.2, all datasets used in the experiments are not balanced and we list the experimental results with F1 score as it is given in Equation 14:

$$F1 \text{ Score} = (2 * Precision * Recall) / (Precision + Recall) \quad (14)$$

where *Precision* shows the Precision value, *Recall* represents the Recall value and basically *F1 score* is the harmonic mean of precision and recall.

Table 20 presents the experimental results of the extended GDELT dictionary-based ensemble classifier with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, SVM, NB, RF, and LSTM classifiers on Twitter-3k and Twitter-10k datasets. According to Table 20, the F1 scores of the proposed ensemble classifier, SVM with TF, SVM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, NB with TF, NB with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, RF with TF, RF with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, LSTM with TF and LSTM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$ are 91.56%, 87.12%, 89.24%, 86.34%, 87.93%, 89.67%, 90.78%, 90.18% and 91.45% on Twitter-3k dataset; respectively. Additionally, the F1 scores of the proposed ensemble classifier, SVM with TF, SVM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, NB with TF, NB with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, RF with TF, RF with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, LSTM with TF and LSTM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$ are 92.63%, 88.22%, 89.71%, 87.40%, 88.56%, 90.75%, 91.80%, 91.84% and 92.11% on Twitter-10k dataset; respectively. The superiority of the proposed ensemble algorithm over other algorithms could be explained as with several reasons: 1) Using features $\{F_1-F_{10}\}$ extracted from the extended GDELT based dictionary, which clearly seems to have an improvement on the classification task in compared to using features extracted from conventional TF, 2) The extended capacity of GDELT dictionary with approximately 159,876 Turkish words, 3) Majority-voting scheme based ensemble classifier, 4) WSD module in which different meaning of Turkish ambiguous words are taken into consideration, 5) Negation handling module.

Table 20. F1 Scores of GDELDT dictionary-based ensemble classifier with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$, SVM, NB, RF, and LSTM classifiers on Twitter-3k and Twitter-10k dataset

Dataset	Classifier	F1% score
Twitter-3k	<i>Extended GDELDT Dictionary based ensemble classifier with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$ and MV</i>	91.56
	SVM with TF	87.12
	SVM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	89.24
	NB with TF	86.34
	NB with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	87.93
	RF with TF	89.67
	RF with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	90.78
	LSTM with TF	90.18
	LSTM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	91.45
Twitter-10k	<i>Extended GDELDT Dictionary based ensemble classifier with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$ and MV</i>	92.63
	SVM with TF	88.22
	SVM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	89.71
	NB with TF	87.40
	NB with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	88.56
	RF with TF	90.75
	RF with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	91.80
	LSTM with TF	91.84
	LSTM with extracted features $\{F_1-F_{10}\}$	92.11

There are two important outcomes of these experimental results: 1) It is possible to improve the classification performance by using multiple learning algorithms in a majority-voting scheme-based ensemble format instead of using these learning algorithms in a conventional way (i.e. using those algorithms independently from each other in a singular way). 2) Text representations with the features $\{F_1-F_{10}\}$ which are extracted from the extended GDELDT based dictionary to compare to text representation with traditional TF, seem to have a positive effect on the sentiment analysis task.

In WSD module, different sentiment polarity scores for each different meaning of polysemous words are calculated. Consequently, this process discriminates classes successfully and results in high classification performance.

V. CONCLUSION AND FUTURE DIRECTIONS

By considering that there is a lack of studies on Turkish sentiment analysis for polysemous words, we prepared a polarity calculation module to calculate the polarity values of the polysemous words so that we examined whether the polarity values of this words differ

according to the meaning they have. Then, since negation directly affects the correct meaning of the word in the sentiment, we prepared the negation handler module to take into account both forms of negation of Turkish language in the polarity classification.

We also prepared the sentiment polarity corpus which consists of 159,876 including 100 polysemous words. Negation in Turkish usually appears in two forms. It may appear in a word form or may appear in a suffix form. A negation module is implemented to handle both forms of negation. A rule-based approach was used for the negation module.

In other words, we built a system for Turkish sentiment polarity detection task including the following modules: 1) Pre-processing, 2) Polarity Calculation Module, 3) Negation Handling Module, 4) Feature Generation Module and 5) Classification Module. According to our knowledge, this is the first study which includes all of these modules in one Turkish sentiment analysis task. Actually, the basic goal of this study was to show that the polarity scores of polysemous words could change from their context to context since they can have different meanings in different contexts. As far as we know, this is the first effort for Turkish language. By making statistical calculations and morphological analysis, we calculated different scores for the corresponding different meanings of about 100 Turkish polysemous words. This study contributes to the literature due to its unique property to be the first in kind.

We conducted several experiments: In the first set of experiments, we tried to show the different meanings of polysemous words could have different sentiment polarity scores. This way, we attempted to observe the efficiency of the extended sentiment polarity dictionary for polysemous words over the traditional sentiment polarity dictionary on the classification task. In the second set of experiments, we attempted to show the effectiveness of the generated features from GDELDT dictionary are superior to traditional TF features for text representation on the sentiment analysis task. We also aimed to analyse the MV technique-based ensemble algorithm advancing the system performance.

The F1 scores gathered from the experiments, shown in Table 20, motivated us that the extended sentiment polarity dictionary with polysemous words has the ability to increase the classification performance. This encouraged us to extend the sentiment polarity dictionary from polysemous words to increasingly polysemous words. According to the experimental results in Table 20; it seems possible to improve the classification performance by using multiple learning algorithms in a majority-voting scheme-based ensemble format instead of using these learning algorithms in a conventional way (i.e. using those

algorithms independently from each other in a singular way). Besides, it could be deduced from the experimental results in Table 20 that the text representation with the features $\{F_1-F_{10}\}$ which are extracted from the extended GDELT based dictionary to compare to text representation with traditional TF seems to have a positive effect on the sentiment analysis task.

In the future, to make further analysis of Turkish sentiment analysis for polysemous words, we will examine more polysemous words, increase the size of the dataset, and use more different morphological analyzer tools. Furthermore, rule-based methods will be studied for both classification and negation handler modules.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported in part by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) grant number [120E187]. Points of view in this document are those of the authors and do not necessarily represent the official position or policies of TÜBİTAK.

REFERENCES

- [1] Navigli, R., Word sense disambiguation: A survey. *ACM Comput Surv*, 41(2), 1-69, (2009).
- [2] Boyd-Graber, J., Blei, D. & Zhu, X.A. Topic model for word sense disambiguation. *In Proceedings of the 2007 joint conference on empirical methods in natural language processing and computational natural language learning* (EMNLP-CoNLL), Prague, (2007).
- [3] Açıkgöz, O., Gürkan, A. T., Ertopçu, B., Topsakal, O., Özenç, B., Kanburoğlu, A. B., & Yıldız, O. T. All-words word sense disambiguation for Turkish. *In International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Antalya, Turkey*, (2017).
- [4] Orhan, Z., & Altan, Z. Effective features for disambiguation of Turkish verbs. *Int J. Comp and Inf Eng*, 1(7), 2264-2268, (2007).
- [5] Gezici, G., & Yanıkoğlu, B. Sentiment analysis in Turkish. *Turkish natural language processing*, 255-271, (2018).
- [6] Türkmenoglu, C., & Tantug, A. C. Sentiment analysis in Turkish media. *In International Conference on Machine Learning (ICML), Beijing, China*, (2014).
- [7] Çetiner, M., Yıldırım, A., Onay, B., & Öksüz, C. Word Sense Disambiguation using KeNet. *In 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Turkey*, (2021).
- [8] Mert, E., & Dalkilic, G. Word sense disambiguation for Turkish. *In 24th International Symposium on Computer and Information Sciences, Cyprus*, (2009).
- [9] Aslan, D. B., Arıcan, B. N., Bayrak, T. A., Özbek, E. E., & Yıldız, O. T. Turizm Alanına Özgü Anlamsal Olarak Isaretlenmiş Bir Derlem. *An All-Words Sense Annotated Corpus for Tourism Domain*. [cited 2023 March 1].
- [10] Tüysüz, M. A., & Güvenoğlu, E. Türkçe için karşılaştırmalı bir kelime anlamı belirginleştirme uygulaması. *In Proceedings of Akademik Bilişim Conferene, Mersin*, (2014).
- [11] Arslan, E., Orhan, U., & Tahiroğlu, B. T. Serbest Sırada Birlikte İstatistiklerinin Kullanımıyla Türkçe'nin Biçimbirimsel Belirsizliği'nin Giderilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 46-52, (2018).
- [12] Aydın, Ö., & Kılıçaslan, Y. Tümevarımlı Mantık Programlama İle Türkçe İçin Kelime Anlamı Belirginleştirme Uygulaması. *In Proceedings of Akademik Bilişim Conferene, Muğla*, (2010).
- [13] Selamet, D. T., & Eryiğit, G. C. Veri Artırımı için Yarı-Denetimli Bağlamsal Anlam Belirsizliği Giderme. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 14(1), 34-46, (2021).
- [14] Taşar, D. E., Özcan, C., & Koruyan, K. Autotrain Yaklaşımı ile Duygu Analizi. *In Proceedings of USBILIM 2nd International Conference on Artificial Intelligence Studies, Ankara*, (2022).
- [15] Çılgın, C., Gökçen, H., & Gökşen, Y. Twitter'da COVID-19 aşlarına karşı kamu duyarlılığının çoğunluk oylama sınıflandırıcısı temelli makine öğrenmesi ile duygu analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1093-1104, (2023).
- [16] Balli, C., Guzel, M. S., Bostancı, E., & Mishra, A. Sentimental analysis of Twitter users from Turkish content with natural language processing. *Comp Intel and Neurosci*, 2022(3), 1-18, (2022).
- [17] Kirelli, Y., & Arslankaya, S. Sentiment analysis of shared tweets on global warming on twitter with data mining methods: a case study on Turkish language. *Comp Intel and Neurosci*, 2020(1), 1-9, (2020).
- [18] Akın, A. A., & Akın, M. D. Zemberek, an open source NLP framework for Turcic languages. *Structure*, 10(2007), 1-5, (2007).
- [19] Günyaktı, R. İ., & Bursa, N. Covid-19 Pandemisinde Sağlık Çalışanları ve Öğretmenlere Yönelik Algının Duygu Analizi ile Twitter Verileri Üzerinden İncelenmesi. *Selçuk İletişim*, 15(1), 264-285, (2022).
- [20] Kandıran, E., Gümüş, B., & Özer, M. A. Covid-19 pandemi sürecinde uzaktan eğitimin twitter yansımalarının duygu analizi. *Int J Social Sci and Educ Res*, 8(3), 228-242, (2022).
- [21] Yüksel, A. S., & Tan, F. G. Metin madenciliği teknikleri ile sosyal ağlarda bilgi

- keşfi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 324-333, (2018).
- [22] Köksal, A. Özgür. Twitter dataset and evaluation of transformers for Turkish sentiment analysis. *In 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Turkey*, (2021).
- [23] Güran, M. Uysal, Ö. Doğrusöz. Destek vektör makineleri parametre optimizasyonunun duygu analizi üzerindeki etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 16(48), 86-93, (2014).
- [24] Sağlam, F., Sever, H., & Genç, B. Developing Turkish sentiment lexicon for sentiment analysis using online news media. *In IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA), Morocco*, (2016).
- [25] Altınel, A. B., Buzlu, K., & İpek, K. Performance Analysis of Different Sentiment Polarity Dictionaries on Turkish Sentiment Detection. *In 2022 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), Biarritz, France*, (2022)
- [26] Boser, B. E., Guyon, I. M., & Vapnik, V. N. A training algorithm for optimal margin classifiers. *In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory, New York*, (1992).
- [27] Berrar, D. Bayes' theorem and naive Bayes classifier. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics*, 403, 412, (2018).
- [28] Jain, K. (2021). What is Naive Bayes? Published in Analytics Vidhya. [cited 2023 March 6].
- [29] Breiman, L. Random Forests, *Mach Learn*, 1,5-32, (2001).
- [30] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. Long short-term memory. *Neural comput*, 9(8), 1735-1780, (1997).
- [31] Mikolov, T., Karafiát, M., Burget, L., Cernocký, J., & Khudanpur, S. Recurrent neural network based language model. *In Interspeech*, (2),3, 1045-1048, (2010).
- [32] Hinton, G. E., Srivastava, N., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. R. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors. *arXiv preprint arXiv:1207.0580*, (2012).
- [33] Belkin, M., Niyogi, P., & Sindhvani, V. Manifold regularization: A geometric framework for learning from labeled and unlabeled examples. *Jour of machine learning research*, 7(11), (2006).
- [34] Belkin, M., Matveeva, I., & Niyogi, P. Regularization and semi-supervised learning on large graphs. *In Proceedings of Learning Theory: 17th Annual Conference on Learning Theory, COLT, Banff, Canada*, (2004).
- [35] Kara, A. Global solar irradiance time series prediction using long short-term memory network. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4(7), 882-892, (2019).

Yerel Elektrik Santral Büyüklüğünün ve Konumunun Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi

Examining The Impact of Distributed Generation Size and Location on The Distribution Network

Tuba GÖZEL 

Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ), Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili alınan kararlar ve teşvikler dağıtım sistemindeki yerel elektrik santralleri (YES) artırmaktadır. Artan YES'lerden daha çok faydalanmak için enerji depolama sistemlerinin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Ancak enerji depolama sistemlerinin kurulumu yatırım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle gecikmektedir. Dağıtım sistemi planlayıcıları, dağıtım sisteminin olumsuz etkilerinin olmaması için dağıtım sistemine sınırlı oranda YES yerleştirirler. Bu da dağıtım sisteminde YES barındırma oranını kısıtlamaktadır.

Bu çalışmada; enerji depolama sistemi olmadan, dağıtım sisteminin mevcut durumunu koruyarak veya iyileştirerek ne kadar YES yerleştirilebileceği araştırılmaktadır. Dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını koruyan ve aktif güç kaybını en aza indiren iki farklı amaç için YES büyüklüğü elde edilir. Bunlarla birlikte dağıtım sisteminin mevcut gerilim profilini koruyan ve gerilim profilini iyileştiren iki farklı amaç için daha YES büyüklüğü elde edilir. Bulunan YES büyüklüklerin dağıtım sistemindeki güç kayıplarını ve bara gerilimlerini nasıl etkilediği incelenmektedir. Bu amaçların hangisinin dağıtım sistemini iyileştirdiği, hangisinin kötüleştirdiği, hangisinin YES barındırma kapasitesinin arttırdığı tartışılmaktadır.

Bu çalışma ile YES'in dağıtım sistemi üzerindeki olumlu etkisinin; YES büyüklüğüne, konumuna ve dağıtım sistemi yapısına göre değiştiğini gösterilmektedir. Dağıtım sistemi planlayıcılarına, dağıtım sistemine göre maksimum YES kapasitesi belirlenebileceği fikri sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dağıtım sistemi, Yerel elektrik santrali, Güç kayıpları, Gerilim profili, Uygun büyüklük, Azami büyüklük, Barındırma kapasitesi

Abstract

Decisions and incentives regarding renewable energy resources increase the number of distributed generation (DG) in the distribution system. It is inevitable to use energy storage systems in order to benefit more from them. However, the installation of energy storage systems is delayed due to high investment costs. Distribution system planners replace a certain DG capacity in the distribution system to avoid negative effects on the distribution system. This prevents having enough DG in the distribution system.

In this study, it is investigated how much DG can be located by maintaining or improving the current state of the distribution system without any energy storage system. For two different purposes which preserves the existing active power loss of the distribution system and reduces the active power loss, DG sizes are obtained. In addition to these, for two different purposes which preserves the existing voltage profile of the distribution system and improves the voltage profile, other DG sizes are obtained. It is examined how the obtained DG sizes affect power losses and busbar voltages of the distribution system. Then which of these objectives improves the distribution system, which negatively affects it, and which increases the YES hosting capacity is discussed.

This study shows that the positive effect of DG on the distribution system changes according to its size, its location and the distribution system structure. It offers distribution system planners the notion that the maximum DG capacity for any distribution system may be established in accordance with the distribution system advantages.

Keywords: Distribution system, Distributed generation, Power losses, Voltage profile, Optimal size, Maximum size, Hosting capacity

I. GİRİŞ

Karbon emisyonunun azaltılması amacıyla alınan kararlar ve teşvikler neticesinde yenilenebilir enerji kaynakları her geçen gün yerel elektrik santralleri (YES) dahilinde elektrik enerjisi sistemine artarak yerine almaktadır [1]. 1990'lı yıllardan bu yana YES'lerin dağıtım sistemine etkisi, yerleşimi, dağıtım sistemi ile planlanması, işletilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. [2]-[6]. Bu çalışmalardan YES'in işletimi incelendiğinde; YES'leri

işletenlerin ihtiyaçlarına göre, YES işletiminde farklılık bulunmaktadır: Örneğin YES dağıtım şebekesi ile paralel çalışır ve YES'den sağlanan enerjinin bir kısmını kullanıp bir kısmını satabilir. Pik dönemlerde elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için işletilir ve maliyetin yüksek olduğu zamanlarda tüketicilerin enerji talebinin bir kısmını karşılar. YES'in bir diğer işletim şekli de dağıtım sistemine veya elektrik enerji müşterisine destek sağlamasıdır; ara sıra veya periyodik olarak yüksek talepleri karşılar veya arızalardan dolayı sıkıntıları giderir. YES'in işletim amacı ne olursa olsun dağıtım sistemini etkilemektedir [6].

YES'in olumlu etkileri genellikle teknik, ekonomik ve çevresel olarak sınıflandırılmaktadır. Başlıca teknik faydası; hat kayıpların azaltılması, gerilim profilinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinin yüklenabilirliğinin artırılması gibi sayılabilir. Ekonomik avantajları ise şebeke yatırımlarının ertelenmesi, yakıt maliyetlerinin azalması, rezerv miktarın azalması ile ilgili maliyetin düşmesi şeklinde ifade edilebilir. Çevresel etkisi de düşük karbon emisyonu, yeşil enerji olarak sayılabilir. YES'in olumsuz etkileri de bulunmaktadır; ters güç akışı, gerilim profilindeki değişimler, ani güç değişimleri, arz talep dengesizlikleri. Ayrıca koruma cihazların koordinasyon problemi gibi teknik sorunlar dağıtım şebekesinde meydana gelebilmektedir [2].

Planlayıcıların ve araştırmacıların en çok zorlandıkları konu uygun boyuttaki YES'in dağıtım sisteminde uygun yere yerleştirilmesidir [2]-[7]. İlk çalışmalarda YES'in olumlu etkilerinden yararlanacak ve dağıtım sisteminin işleyişini bozmayacak araştırmalar yapıldı. Çoğunlukla güç kayıplarını azaltacak YES'in boyutunu ve/veya konumunu belirleyen analitik yöntemler geliştirildi [8], [9]. Daha sonra aktif güç kayıplarını azaltmak için oluşturulan optimizasyon problemlerine; gerilim profilinin iyileştirilmesi, güvenilirliğin artırılması gibi amaçlar eklendi [10], [11]. Tek YES için optimizasyon problemi çözülürken, birden fazla YES'in yerleşimi ve boyutu araştırıldı [12], [13]. Sabit yük ve üretim için analizler yapılırken; zamanla değişen ve stokastik analizler de eklendi [14], [15]. Hemen hemen her optimizasyon metodu, analitik, sezgisel ve meta sezgisel, bu hesaplamalarda kullanıldı [2]-[7].

YES ile ilgili bazı çalışmaları incelenecek olursak; [16]'da analitik ifade ile aktif güç kaybını en aza indirecek birden fazla YES'lerin yerini belirlerken, iteratif yöntem ile de YES büyüklüğünü elde ettiği görülmüştür. [17]'de "hibrit karga arama parçacık sürü" optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile maliyet ve aktif güç kaybını azaltmak amacıyla tekno-ekonomik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca YES'lerin yeri, büyüklüğü ve en uygun rüzgar türbin modeli belirlenmiştir. [18]'de "su, enerji ve yiyecek" algoritması ile aktif, reaktif güç kayıplarını ve

karbon emisyonunu en aza indirecek YES'lerin yerini belirleyen bir çalışma yapılmıştır. [19]'da ise aktif güç kaybını en aza indirecek YES'lerin dağıtım sistemindeki konumu; parçacık sürü optimizasyonu ile elde edilmiş, gerilim kararlılığı değerlendirilmiş ve tekno-ekonomik uygunluğu araştırılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynağı içeren YES'lerin teknik ve ekonomik etkilerini ve stokastik doğasını dikkate alan çalışmalardan biri olan [20]'de optimizasyon problemi; güç kaybının azaltılması, gerilimin iyileştirilmesi, sistem kararlılığı ve yıllık ekonomik tasarrufun sağlanması amaçları ile tanımlanmıştır. [21]'de güç kaybı ve yıllık ekonomik kaybı azaltmak amacı ile çok amaçlı "balina" optimizasyon tekniği kullanılarak YES'lerin uygun büyüklükleri ve uygun konumları elde edilmiştir. [22]'de YES ve elektrikli araçları içeren dağıtım sistemlerinde güç kaybını ve gerilim sapsmasını kontrol etmek için; "bulanık şans kısıtlı stokastik" optimizasyon metodu kullanılmıştır. Çalışmada transformatörlerin kademe konumunun ayarlanması, şönt kapasitör grupları, esnek yük gücü, enerji depolama sistemlerinin şarj ve deşarj gücü ve YES'lerin reaktif güç çıkışı araştırılmıştır.

Dağıtım sistemlerinde gittikçe artan YES'leri daha verimli kullanabilmek, maliyeti azaltmak ve kar elde edebilmek için enerji depolama sistemleri ile birlikte enerji yönetimi ve talep tarafı yönetimi üzerine de çalışılmaktadır [23]. Enerji yönetimi ile ilgili çalışmalardan biri olan [24]'teki çalışmada, sanal elektrik santralin dağıtım sistemindeki enerji yönetimi "lokal arama" optimizasyon algoritması ile yapılmıştır. Enerji yönetimi probleminde YES'lerin uygun büyüklükleri ve konumları; gerilim profilini ve güç akış yönünü düzeltmek, şebekeden daha az enerji satın alarak YES'lerden daha fazla yararlanmak amacı ile belirlenmiştir. Bu çalışmada yapılan uygun YES yerleşimi ile şebekeden çekilen enerjinin %81 azaltıldığı saptanmıştır.

[25]'te güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve diğer YES'ler ile elektrik fiyatları göz önünde bulundurularak toplam işletim maliyetlerinin azaltılması ile ilgili bir "enerji kaynak işletimi" planlaması yapılmıştır. [26]'nın çalışmasında PV barındırma kapasitesinin artırılmasının, dağıtım şebekesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. AG trafo sayısı ile PV kapasitesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Trafo sayısının artmasıyla AG'den gelen gerilim OG'ye kaydığı için, PV kapasitesinin artması teknik olarak tercih edilmekle birlikte ekonomik olarak yüksek maliyet oluşturduğu tespit edilmiştir. Dağıtım sistemlerinde sayıları artan YES'lerin enerji depolama sistemleri ile birlikte işletilmesi dağıtım sistemlerinde olumsuz etkileri azaltmaktadır [27]. Ancak enerji depolama sistemlerinin yatırım maliyeti henüz yüksektir [23].

Literatürde artan YES'lerin yerleşimi, olumsuz etkileri, verimli kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak mevcut durumu koruyarak YES kapasitelerin artırılması incelenmemiştir. Optimal ve azami YES büyüklükleri ile dağıtım sisteminin güç kayıpları ve gerilim profilinin değişimi incelenmemiştir. Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde herhangi bir düzenlemeye gerek duymadan, enerji depolama sistemleri olmadan, mevcut durumu koruyan YES kapasitesi araştırılmaktadır. Dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını arttırmayan maksimum YES büyüklüğünü elde etmek için optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Ayrıca sistemin güç kaybını en aza indirecek en uygun YES büyüklüğü belirlenmektedir. Tüm dağıtım sistemi için belirlenen maksimum ve en uygun YES büyüklüğünün sistem kayıplarını ve gerilim profilini nasıl etkilediği incelenmiştir. Gerilim profili için de maksimum ve en uygun YES büyüklüğü benzer şekilde elde edilerek dağıtım sistemini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu çalışma ile dağıtım sistemi planlayıcılarına YES kapasitesi artışının, dağıtım sisteminin güç kayıplarına ve gerilim profiline etkisi hakkında bilgi verilmektedir.

Bu makalede ikinci bölümde, aktif güç kaybı ve gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleyen dört farklı optimizasyon problemi ve izgara arama yöntemi anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde önerilen yöntem gerçek dağıtım sistemine uygulanmış ve YES büyüklükleri elde edilmiştir. Elde edilen YES büyüklüklerin dağıtım sistemine etkisi tek tek ve karşılaştırılarak incelenmiştir. Bulgu ve tartışmalar dördüncü bölümde ele alınmıştır. Beşinci bölümde sonuçlar değerlendirilmiştir.

II. YÖNTEM

Bu bölümde aktif güç kaybına ve gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleyecek dört optimizasyon problemi anlatılmıştır. İlk olarak dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını koruyacak bir başka deyişle aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü elde eden optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Problemin amacı; aktif güç kaybını, YES olmadığı durumdaki aktif güç kayıp değerine eşitleyecek maksimum YES büyüklüğünü elde etmektir. İkinci olarak dağıtım sisteminin aktif güç kaybını azaltacak YES büyüklüğünü elde eden bir minimizasyon problemi verilmiştir.

Üçüncü optimizasyon problemi ise dağıtım sisteminin mevcut gerilim profilini koruyacak bir başka deyişle gerilim sapmasını arttırmayacak YES büyüklüğünü elde etmektir. Problemin amacı; dağıtım sisteminin gerilim sapmasını, YES olmadığı durumdaki gerilim sapma değerine eşitleyecek maksimum YES büyüklüğünü aramaktır. Son olarak da gerilim sapmasını azaltacak YES büyüklüğünü bulacak bir minimizasyon problemi tanımlanmıştır.

İlk kısımda aktif güç kaybı ile ilgili ikinci kısımda gerilim profili ile ilgili optimizasyon problemlerinin amaç fonksiyonları ve kısıtları verilmiştir. Son kısımda da optimizasyon problemlerinin çözüldüğü izgara arama algoritması anlatılmıştır.

2.1. Aktif Güç Kaybına Göre YES Büyüklüğü Belirleme

Aktif güç kaybını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan olmak üzere iki farklı amaç için, YES büyüklükleri belirlenmektedir. Amaç 1'de aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü belirleyen optimizasyon problemi tanımlanmıştır. YES barındırarak dağıtım sisteminin aktif güç kaybını, dağıtım sisteminin mevcut durumundaki toplam aktif güç kaybına kadar arttıracak; kısaca güç kaybını maksimum değer olarak tanımlanan mevcut değere getirecek YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemidir. Amaç 2'de ise aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerini elde eden optimizasyon problemi verilmiştir.

Amaç 1: Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü olarak tanımlanan birinci amaç fonksiyonu Eşitlik (1)'de kısıtları da Eşitlik (2)'de verilmiştir. Problem, dağıtım sisteminin aktif güç kaybını maksimum yapacak YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemidir. İlk kısıt YES'in aktif güç değeri, P_{YES} , toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. İkinci kısıt ise P_{YES} ile dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybı mevcut durumdaki aktif güç kaybı kadar veya daha küçük değerinde olmasıdır. Diğer kısıt ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerini elde etmek için Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) kullanılmaktadır.

$$\max f(P_{YES}) = \sum_{i=1}^{nb} Ploss_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{şartı altında} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n Pyük_k \\ & Ploss \leq basePloss \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Eşitlik (1)'de geçen P_{YES} YES'in aktif gücü, $Ploss_i$ i. hattın aktif güç kaybı, nb dal sayısıdır. Eşitlik (2)'de bulunan n bara sayısı, $Pyük_k$ k. baradaki yükün aktif gücü, $Ploss$ P_{YES} için toplam aktif güç kaybı, $basePloss$ ise mevcut dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybı, V_{max} bara gerilimin üst limiti, V_{min} bara gerilimin alt limiti, V_i i. baranın gerilimidir.

Amaç 2: Dağıtım sisteminin aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüğünü bulan ikinci amaç fonksiyonu sistemin toplam aktif güç kayıp ifadesidir ve Eşitlik (3)'te verilmiştir. Amaç fonksiyonun kısıtları Eşitlik (4)'te verilmiştir. Kısıtlardan birincisi YES'in aktif güç

büyüklüğü toplam yükün üç katı kadar veya ondan küçük olmasıdır. Diğer kısıt ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\min f(P_{YES}) = \sum_{i=1}^{nb} P_{loss_i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2. Gerilim Profiline Göre YES Büyüklüğü Belirleme

YES yerleştirirken dağıtım sisteminin gerilim profiline göre YES büyüklüğünü belirleme de iki farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Amaç 3'te gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüğünü belirleyen optimizasyon problemi tanımlanmıştır. YES barındıracak dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını, dağıtım sisteminin mevcut durumdaki ortalama gerilim sapsmasına kadar arttıracak; kısaca gerilim sapsmasını maksimum değer olarak tanımlanan mevcut değere getirecek YES'in büyüklüğünü elde eden bir maksimizasyon problemi verilmiştir. Amaç 4'te ise gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde eden optimizasyon problemi verilmiştir. Optimizasyon problemi ile bara gerilimleri 1 pu değerine yaklaşır. Her iki amaçta da ortalama gerilim sapsması formülasyonu kullanılmıştır. Ortalama gerilim sapsması (VDA) formülasyonu, bara gerilimlerin referans bara gerilimine göre farkının karelerinin ortalamasından oluşmaktadır.

Amaç 3: Dağıtım sisteminin gerilim profiline koruyan bir başka deyişle gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüklerini elde eden üçüncü amaç fonksiyonu Eşitlik (5)'te amaç fonksiyonun kısıtları ise Eşitlik (6)'da verilmiştir. Amaç fonksiyonu dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını maksimum yapacak YES büyüklüğünü elde edecek bir maksimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Birinci kısıt YES'in aktif güç değeri toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. İkinci kısıt mevcut dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasına (VDA) eşit veya küçük olmasıdır. Diğer ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\max f(P_{YES}) = VDA = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |\Delta V_i|^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & VDA \leq baseVDA \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (6)$$

Eşitlik (5)'te bulunan VDA dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasını, n bara sayısını, ΔV_i ise i. bara gerilim değerinin referans gerilimine olan farkını göstermektedir. Eşitlik (6)'da verilen *baseVDA* mevcut dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapsmasıdır.

Amaç 4: Dağıtım sisteminin gerilim profiline iyileştiren bir başka deyişle gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini bulan dördüncü amaç fonksiyonu Eşitlik (7)'de amaç fonksiyonun kısıtları ise Eşitlik (8)'de verilmiştir. Amaç fonksiyonu minimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır. Kısıtlarından biri YES'in aktif güç değeri toplam yükün üç katı veya daha küçük olmasıdır. Diğer ise bara gerilimlerin alt ve üst limitler içinde olmasıdır. Algoritmada gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini elde etmek için bu eşitlikler kullanılır.

$$\min f(P_{YES}) = VDA = \frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n |\Delta V_i|^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{\textit{şartı altında}} \quad & 0 \leq P_{YES} \\ & \leq 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k} \\ & V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3. Izgara Arama Algoritması ile YES Büyüklüğü Belirleme

Yukarıda anlatılan dört amaca göre YES büyüklüklerini elde etmede izgara arama algoritması kullanılmıştır. Izgara arama algoritması ile YES'i her bir baraya sırayla yerleştirerek ve YES büyüklüğünü adım adım toplam yükün üç katına kadar arttırarak yük akışı yapılmaktadır. Yük akışı Thukaram'ın süpürme temelli radyal yük akışı [28] ile yapılmaktadır. Yük akışından elde edilen değerler ile her bir amaca ve kısıtlarına uyan YES büyüklüklerinden en uygun değeri belirlenerek yük akışı analizinden ilgili veriler alınmaktadır. Izgara arama algoritması ile YES büyüklüğü belirleme yöntemin akışı aşağıda verilmiştir.

Adım 1 Dağıtım sisteminin bara ve dal verilerini oku,
Adım 2 YES'in yerleşeceği bara numarasını belirle,
j=2

Adım 3 i'ye başlangıç değerini ata, i=1

Adım 4 YES'in ürettiği aktif güç değerini ata, $P_{YES} = \frac{3 \cdot i}{300} \sum_{k=1}^n P_{yük_k}$

Adım 5 Yük akışı algoritmasına verileri hazırla ve çalıştır,

Adım 6 Yük akışından elde edilen Ploss, Qloss, VDA, min(V_k), mak(V_k), ort(V_k) ve P_{YES} değerlerini kaydet,

Adım 7 i = i + 1

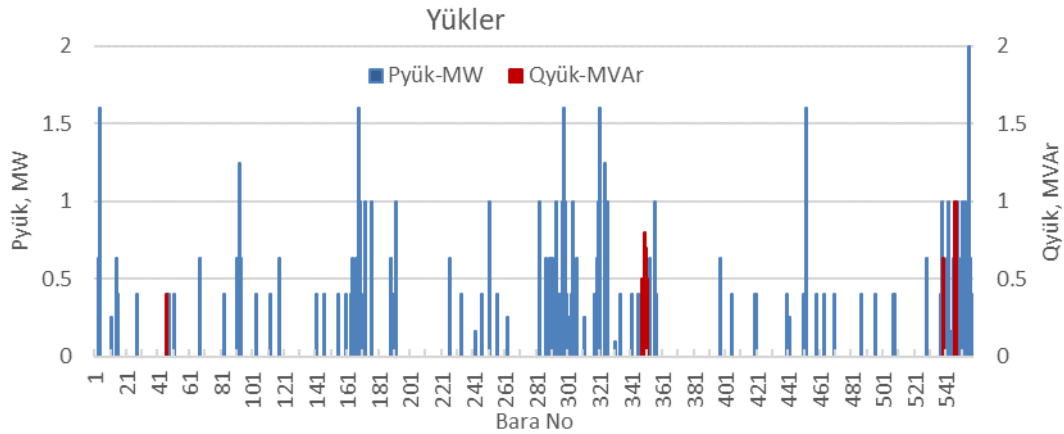
Adım 8 Eğer $P_{YES} < 3 \sum_{k=1}^n P_{yük_k}$ ise Adım 4'e git,

Adım 9 Kaydedilen değerler arasında Amaç 1 için Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'yi sağlayan maksimum YES büyüklüğü P_{YES1} belirle,

Adım 10 Amaç 2 için Eşitlik (3) ve Eşitlik (4)'yi sağlayan minimum YES büyüklüğü P_{YES2} belirle,
 Adım 11 Amaç 3 için Eşitlik (5) ve Eşitlik (6)'yi sağlayan maksimum YES büyüklüğü P_{YES3} belirle,
 Adım 12 Amaç 4 için Eşitlik (7) ve Eşitlik (8)'yi sağlayan minimum YES büyüklüğü P_{YES4} belirle,
 Adım 13 Her bir amaç için belirlenen j. baranın $P_{YES1..4}$ değerlerine ait Ploss, Qloss, VDA, Vmin, Vmax, Vort değerlerini kısıtlara göre kontrol et. Kısıtı sağlayan değerleri kaydet,
 Adım 14 $j = j + 1$
 Adım 15 Eğer $j <$ toplam bara sayısı ise Adım 3'e git,
 Adım 16 Sonlandır.

III. YES'in DAĞITIM SİSTEMİNE ETKİSİ

YES kapasitesinin ve yerleşiminin dağıtım sistemini nasıl etkilediği bu bölümde araştırıldı. Bunun için 558 baralı gerçek dağıtım sistemi üzerinde aktif güç kaybı ve gerilim sapsması koruyacak ve iyileştirecek YES büyüklükleri elde edildi ve dağıtım sistemine YES'lerin etkisi aktif ve reaktif güç kaybı ve gerilim profili ile incelendi. Dağıtım sistemin toplam aktif yükü 66.64 MW ve toplam reaktif gücü 5.53 MVAR'dır. Yüklerin dağıtım sistemindeki dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Analizlerde YES sadece aktif güç ürettiği varsayıldı ve dağıtım sistemine en fazla toplam aktif yükün üç katı kadar YES yerleşebilmesine izin verildi.



Şekil 1. 558 baralı gerçek dağıtım sistemin aktif ve reaktif yükleri

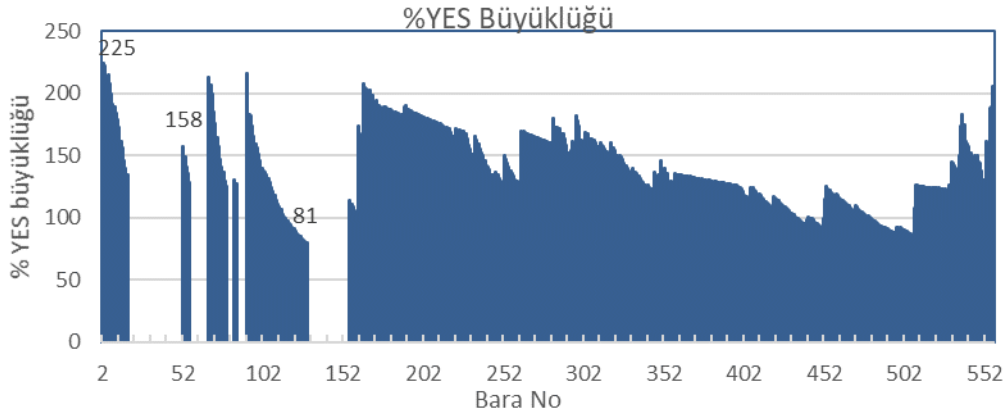
YES'in dağıtım sistemine etkisi araştırılırken öncelikle birinci amaç için mevcut dağıtım sisteminin güç kaybı aynı kalacak şekilde ne kadar YES yerleştirilebileceğine bakıldı ve dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı ve gerilim profili nasıl değiştiği tespit edildi. Sonrasında ikinci amaç olan dağıtım sisteminin güç kaybını azaltacak YES kapasiteleri belirlenerek dağıtım sistemi incelendi ve iki durum karşılaştırıldı. Bu analizler gerilim profili için üçüncü ve dördüncü amaçlar tekrarlandı. Son olarak da güç kaybı ile gerilim profilini birlikte dikkate alınarak YES'in dağıtım sistemini nasıl etkilediği araştırıldı.

Tüm analiz sonuçlarında YES büyüklükleri dağıtım sisteminin toplam yük oranına göre hesaplanmıştır. Elde edilen YES büyüklüklerine göre dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı ve gerilim sapma değişimi mevcut dağıtım sisteminin değerlerine oranlanarak hesaplanmıştır. Şekillerde bu değerler

yüzde cinsinden gösterilmiştir. Şekillerde x ekseninde bara numarası ve y ekseninde ise o baraya yerleştirilen YES'in kapasite değeri gösterilmektedir.

3.1. Aktif Güç Kaybına Göre YES'in Dağıtım Sistemine Etkisi

YES yerleşim amacı, mevcut dağıtım sisteminin toplam aktif güç kaybını arttırmadan yerleştirmek olduğunda hangi baraya ne kadar büyüklükte YES yerleştirilebildiği araştırılmıştır. Her bara için YES büyüklüğü elde edilmiş ve elde edilen YES büyüklükleri için dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapsması, en düşük ve en yüksek bara gerilimleri belirlenerek analiz edilmiştir. Elde edilen her bir baraya yerleşebilecek YES büyüklükleri Şekil 2'de gösterilmiştir. YES büyüklüğü dağıtım sistemin toplam yüküne oranlanarak verilmiştir. Şekilde bazı baralarda uygun YES büyüklüğü elde edilemediği için değer bulunmamaktadır.

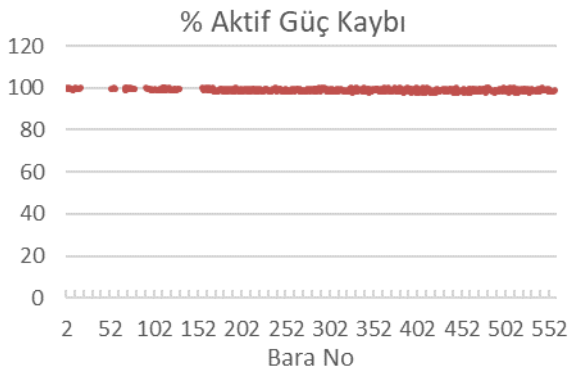


Şekil 2. Mevcut aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri

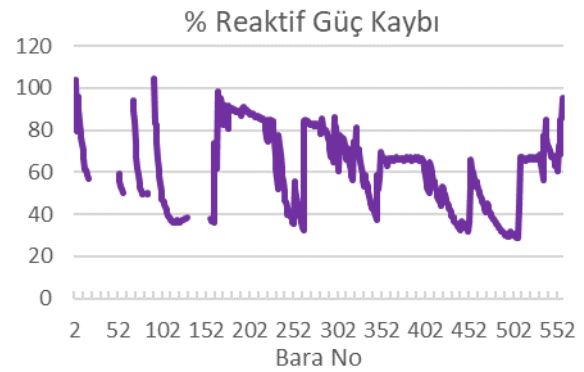
Şekilde x eksenindeki bara numarasına karşılık gelen y eksenindeki değer YES büyüklüğüdür ve ilgili bara için hesaplanan aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğünü göstermektedir. Örneğin ikinci baraya toplam yükün 2.25 katı büyüklüğünde YES yerleşirse dağıtım sistemin aktif güç kaybı, YES yerleşmeden önceki aktif güç kaybı (mevcut aktif güç kaybı) kadar olmaktadır. 128. baraya toplam yükün %81 katında YES yerleşirse sistemin aktif güç kaybı mevcut değer kadar olmaktadır ve 53. baraya %158'si kadar YES yerleşirse de mevcut aktif güç kaybı ile aynı değerdedir. Dolayısıyla mevcut dağıtım sistemin aktif güç kaybını

değiştirmeden yerleşebilecek YES büyüklüğü baralara göre değiştiği görülmektedir. YES büyüklüğü en fazla toplam yükün %225'i olarak, en az %80'ni ve ortalama YES büyüklüğü ise %140'ı olarak hesaplanmıştır.

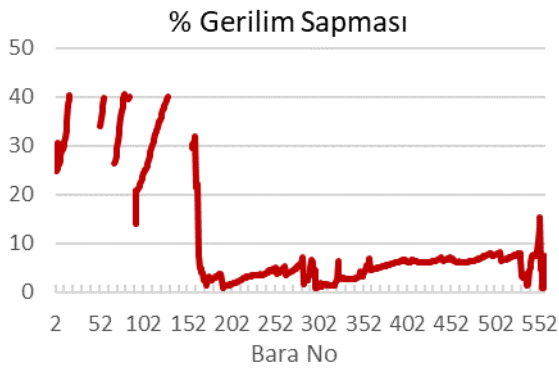
Şekil 3'te hesaplanan YES büyüklükleri dağıtım sistemine yerleştirildiği takdirde dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapsması mevcut değerlerine oranlanarak yüzde olarak verilmiştir ve ilaveten bara gerilimlerin aldığı maksimum, ortalama ve minimum değerleri birim değer cinsinden verilmiştir.



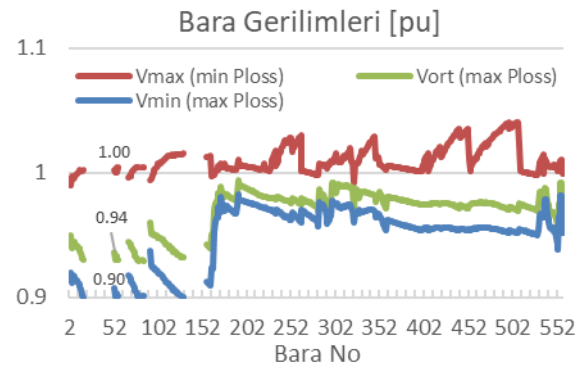
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü durumunda dağıtım sisteminin (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması ve (d) bara gerilimleri

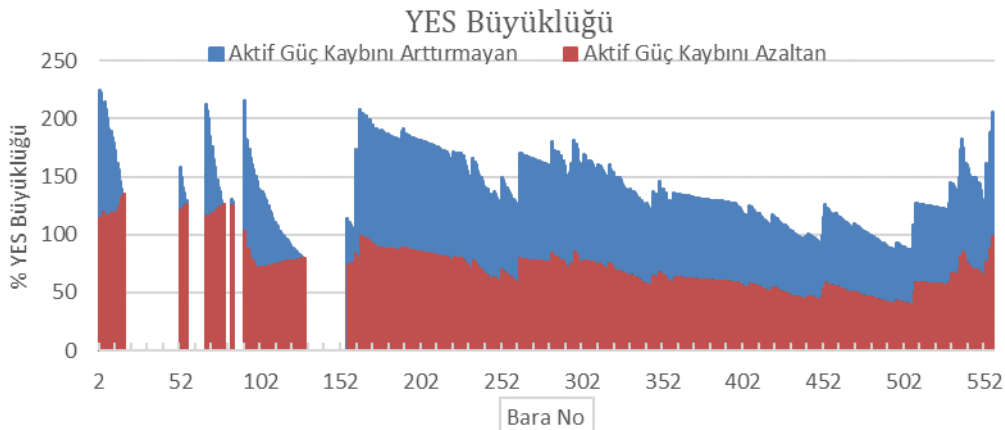
YES büyüklükleri dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybı esas alınarak belirlenmiştir. Buna göre Şekil 3.a'da her bir bara için belirlenen büyüklükte YES yerleştiğinde dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, yerleşmeden önceki aktif güç kaybıyla eşit olduğu görülmektedir. Şekil 3.b'de reaktif güç kaybının durumunu incelediğimizde reaktif güç kayıpları YES büyüklüğü ile orantılı değişmektedir. Reaktif güç kayıplarının mevcut değere göre maksimum değeri %105, minimum değeri %28 ve ortalama değeri %62'dir. Mevcut aktif güç kaybını koruyarak YES büyüklüğü yerleştirildiğinde çok az barada mevcut reaktif güç kaybı kadar değerler alınırken çoğu barada ise reaktif güç kayıpları düşmektedir.

Şekil 3.c'de dağıtım sisteminin gerilim profili incelendiğinde mevcut durumundaki gerilim sapmasının önemli oranda küçüldüğü görülmektedir. En büyük gerilim sapmaları ilk 150 barada olduğu maksimum değer %40 olduğu, 160. baradan sonra gerilim sapmasının %10'un aşağısında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3.d'de her bir YES büyüklüğü için dağıtım sisteminin bara gerilimlerinin maksimum, minimum ve ortalama değerleri gösterilmiştir. Örneğin, 53. baraya toplam yükün %158'i kadar büyüklükte YES yerleştiği durumda dağıtım sisteminin ortalama

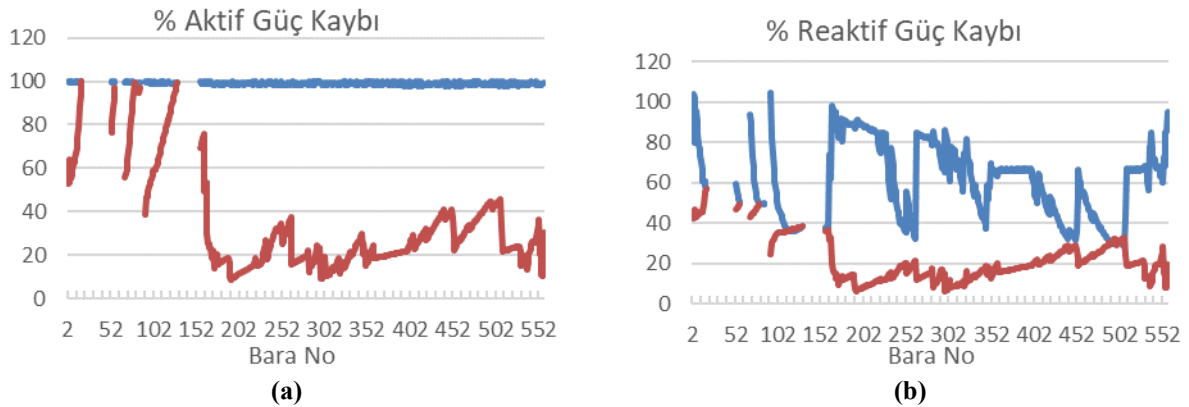
bara gerilim değeri 0.94 pu, maksimum gerilim değeri 1.00 pu, minimum gerilim değeri 0.90 pu olmaktadır. Belirlenen tüm YES büyüklüğünde bara gerilimleri gerilim limitlerinin içinde kaldığı ve 160. baradan sonra yerleştirecek YES'lerin ortalama bara gerilimlerini 1.00 pu'ya yaklaştırdığı görülmektedir.

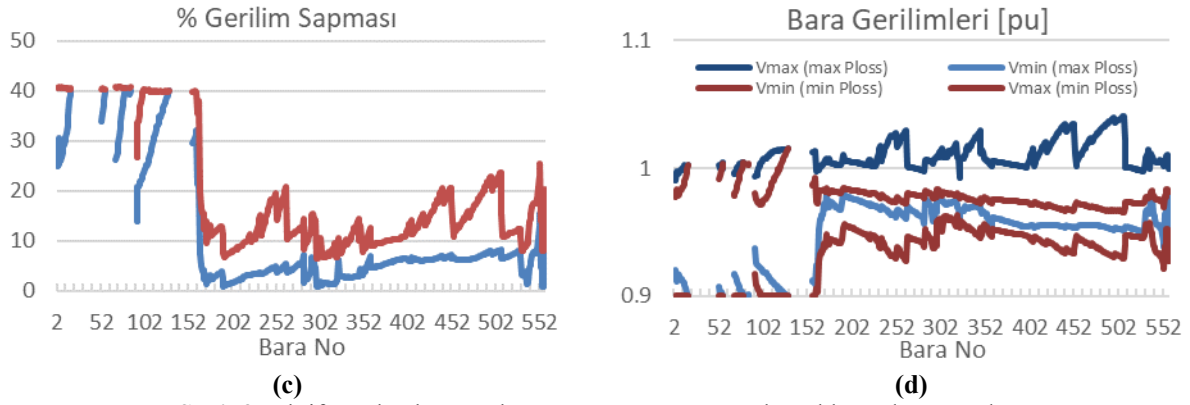
Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri ile aktif güç kaybını azaltacak YES büyüklükleri Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerin ortalama değeri toplam yükün %70'i iken en az değeri %39'u ve en fazla %135'i olarak elde edilmiştir. Güç kaybını arttırmayan ve azaltan YES büyüklüklerinde ortalama fark %70 olduğu, en fazla fark %113 ve ilk baralarda olduğu, farkın çok az olduğu baralar da çözüm bulunamayan baralara yakın olduğu görülmektedir.

Her iki durum için dağıtım sisteminin aktif güç kayıp, reaktif güç kayıp ve gerilim sapması değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekilde mavi renk ile aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri için, kırmızı renk ile aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerler gösterilmiştir.



Şekil 4. Aktif güç kaybını azaltan ve arttırmayan YES büyüklükleri





Şekil 3. Aktif güç kaybını azaltan ve arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapması ve (d) bara gerilimleri

Şekil 5.a'da aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile özellikle 160. baradan sonra aktif güç kayıplarının çoğunlukla %40'ın altına düştüğü, aktif güç kaybının %100 olduğu baralar çözüm olmayan baralara yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen YES büyüklükleri sistemin aktif güç kaybını ortalama %33 düşürdüğü ve 192. baradaki YES ile aktif güç kaybı %9'lara kadar azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 5.b'den reaktif güç kayıplarının ortalama %21'lere düştüğü, en az azalma %56 ile hat başlarında en fazla azalma ise %6 ile 192. barada olduğu görülmektedir. Aktif gücü arttırmayan YES büyüklüklerindeki reaktif güç kayıpları %80'ler civarında olan baralarda aktif gücü azaltan YES büyüklüklerindeki reaktif güç kayıp değişim oranları daha fazladır. Bunun aksine reaktif güç kaybı az olan baralarda ise değişim oranı azdır.

Şekil 5.c'de aktif gücü azaltan YES büyüklüklerinin gerilim sapma değişimine etkisini incelediğimizde ilk baralarda gerilim sapması %40 seviyelerinde iken 160. baradan itibaren çoğunlukla %20'lerin altına düştüğü görülmektedir. Tüm YES büyüklüklerine göre ortalama gerilim sapma yüzdesi %17 iken en fazla gerilim sapma yüzdesi %40 ve en azı %6'dır. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinde ortalama gerilim sapma yüzdesi ise %9'dur ve aktif gücü azaltan YES büyüklüklerinde gerilim sapması arttırmayanlara göre daha fazladır. YES büyüklüklerine göre minimum ve maksimum bara gerilim değerleri de Şekil 5.d'de verilerek bara gerilimlerinin hangi aralıkta değiştiği görülmektedir. Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinin bara gerilimleri mavi tonlarda ve azaltan YES büyüklüklerinin bara gerilimleri ise kırmızı tonlarda gösterilmiştir. Her iki durumda ilk baralara yerleşen YES büyüklüklerinde bara gerilimleri 1.00 pu ile 0.9 pu arasında değişir iken 160. baradan itibaren gerilim değerleri yükselmiştir. Azaltan durumda gerilim değerleri arttırmayan durumun minimum değerlerinin civarında ve aşağısında kalmıştır.

Aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Güç kaybı arttırmayan YES büyüklükleri en fazla toplam yükün %225'i ve ortalama YES büyüklüğü ise %140'ı olarak elde edilmiştir.
- Hat başındaki YES büyüklüğü maksimum değerde olurken aktif ve reaktif güç kaybı mevcut durumdaki değerlerde olduğu ve gerilim sapmasının da mevcut durumdan %70 azalttığı tespit edilmiştir.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için aktif güç kaybı %100 civarında iken reaktif güç kaybının çoğunlukla %100 değerinden daha düşük olduğu, ortalama reaktif güç kaybının da %62 değerinde olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için maksimum gerilim sapması %40 ve ortalama değeri %9'dur. 160. baradan sonra yerleşecek YES'ler için gerilim sapması %10'dan daha küçük değerlerdedir ve ortalaması %5'e düşmüştür.

Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinden maksimum YES büyüklüğü toplam yükün %135'i iken ortalama YES büyüklüğü ise %70 olarak tespit edilmiştir.
- Hat başına toplam yükün %114'ü kadar YES yerleştirilmesi uygun bulunurken aktif güç kaybını yarısına indirmiş, reaktif güç kaybını %40, gerilim sapmasını ise %40 seviyelerine düşürmüştür.
- Tüm baralara yerleşecek YES'ler için ortalama aktif güç kayıp değeri mevcut değerden %33 seviyelerine düşerken iken ortalama reaktif güç kaybının ise %21 seviyelerine düştüğü görülmüştür. Ortalama gerilim sapması ise %17'dir ve aktif güç kaybını arttırmayan durumdan yaklaşık iki kat daha büyüktür.

3.2. Gerilim Profiline Göre Yerleştirme Analizi

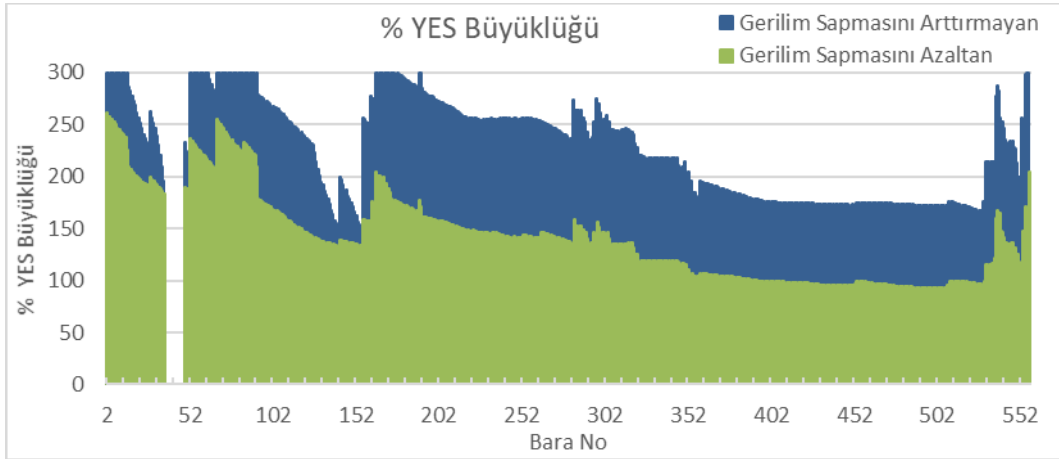
Bu kısımda gerilim profili analizi bara gerilimlerinin ilk bara gerilimine göre farklarının ortalamasını veren gerilim sapmasına göre yapılmıştır. Mevcut dağıtım sistemin gerilim sapmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklükleri ve bu büyüklüklere göre sistemin aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve bara gerilimleri hangi değerlerde olduğu araştırılmıştır. Mevcut dağıtım

sistemin gerilim sapsmasını arttırmayan ve azaltan iki amaç için her bir bara için iki farklı YES büyüklükleri elde edilmiş ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

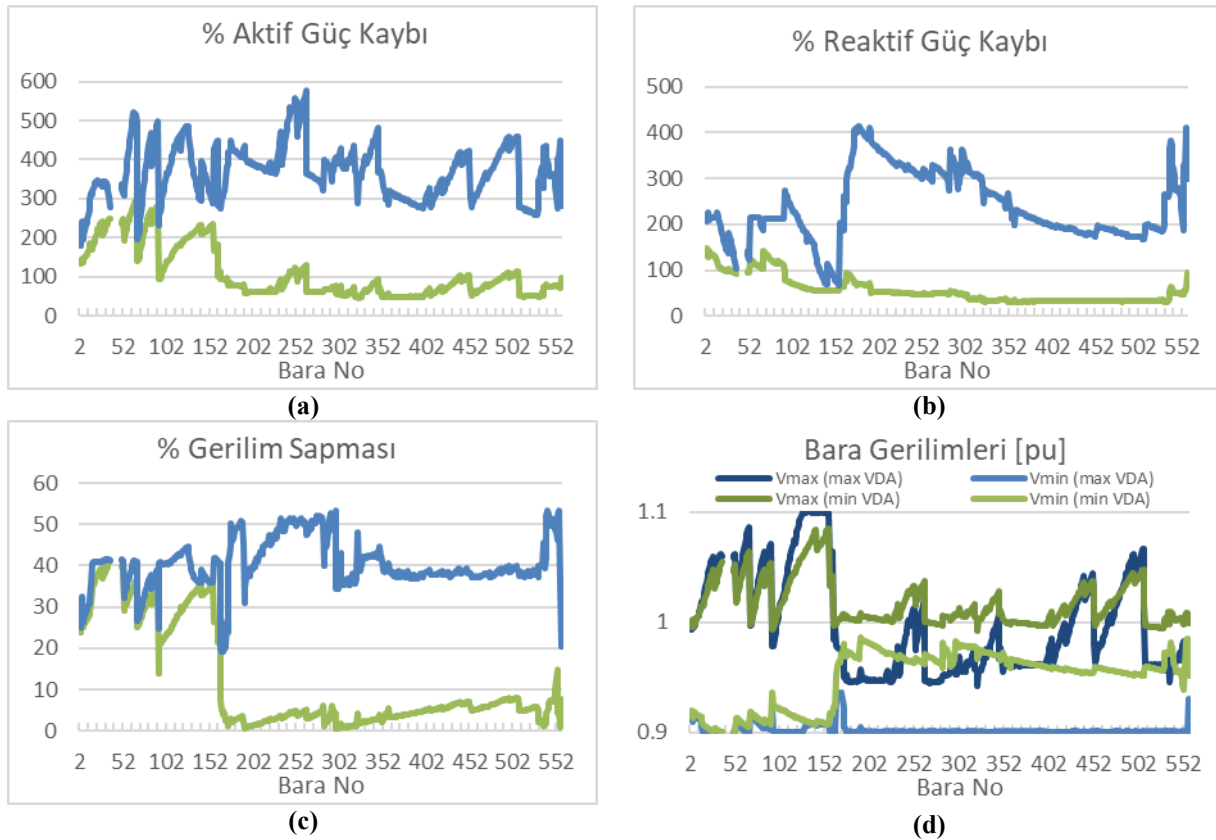
Mevcut dağıtım sistemin gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri ilk baralarda azami kapasite sınırı olan toplam yükün 3 katında veya yakın değerlerde olduğu görülmektedir. En küçük değeri %151 ile 155. bara için hesaplanırken 350. baradan sonra çoğunlukla %200 ile %150 arasında değerler aldığı tespit edilmiştir. Şekil 6'da gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerini incelediğimizde arttırmayan YES büyüklükleri ile aynı forma sahip olduğu

görülmektedir. Arttırmayanda ortalama YES büyüklüğü %228 iken azaltanda ise %142'dir. Aralarında en az fark %40 iken ortalama fark ise %92 civarlarındadır.

Şekil 7'de gerilim sapsmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklükleri için dağıtım sisteminin aktif güç kayıp, reaktif güç kayıp ve gerilim sapsması verilmiştir. Şekilde mavi renk ile gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri için, yeşil renk ile gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. Gerilim sapsmasını azaltan ve arttırmayan YES büyüklükleri



Şekil 7. Gerilim sapsmasını azaltan ve arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı, (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması ve (d) bara gerilimleri

Şekil 7.a'da toplam yükün üç katı civarlarında hesaplanan gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüklerinin aktif güç kayıplarını önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Aktif güç kaybı en fazla %575 artarken ortalama olarak %370'lerde en az kayıp bile %180 değerindedir. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri ise aktif güç kayıpları ortalama %107 civarındadır. İlk baralarda aktif güç kaybı %300'lere çıkarken 160. baradan sonra çoğunlukla %100'ün aşağısındadır.

Şekil 7.b'de her iki durum için reaktif güç kayıpları görülmektedir. Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri reaktif güç kaybını aktif güç kaybı kadar arttırmamıştır. En fazla %413 olurken ortalama değer %240'tır. Reaktif güç kaybı aktif güç kaybı ilk baralarda %200 ile %100 aralarında değişirken 160. baradan sonra gibi hızlıca yükselmiştir ve %400 ile %200 aralığındadır. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerine göre reaktif güç kayıpları ise ortalama değeri %55'tir. İlk baralarda reaktif güç kayıp değerleri %100 civarında iken 160. baradan sonra %55 seviyelerine düşmüştür.

Şekil 7.c'de ilk baralarda gerilim sapmasını arttırmayan ve azaltan YES büyüklüklerin gerilim sapma değerleri birbirine yakın görülürken 160. baradan sonra önemli ölçüde aralarında fark açılmıştır. Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüklerinde ortalama gerilim sapması %40 civarında iken gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinde ise ortalama gerilim sapması %12'lerdedir. Şekil 7.d'de ilk baralara yerleştirilen YES büyüklükleri için bara gerilim değerlerinin aralığı büyük iken daha sonraki baralarda gerilim aralıkların küçüldüğü görülmektedir. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinde bu aralık çok daha azdır.

Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Dağıtım sisteminin mevcut gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri toplam yükün üç katı ile 1.5 katı aralığında elde edilmiştir.
- Kısıtlardan YES büyüklüğü veya gerilim limiti nedeniyle mevcut gerilim sapma değerine ulaşamayıp en fazla %55 seviyesinde kalmıştır.
- Hat başındaki YES büyüklüğü kısıttan dolayı toplam yükün üç katı olarak elde edilirken iken aktif ve reaktif güç kaybı da mevcut durumdaki aktif ve reaktif güç kaybının iki katı civarında olduğu gerilim sapmasının ise mevcut durumdaki gerilim sapma değerinin %25'ine indiği tespit edilmiştir.
- Aktif güç kayıpları mevcut kaybın maksimum altı katına çıkmış, ortalama kayıp ise yaklaşık mevcut durumun dört katıdır. Reaktif güç kaybı aktif güç kaybı kadar artmasa da ortalama reaktif güç kaybı mevcut durumun 2.5 katı kadardır. Gerilim sapma değişimi ortalama mevcut durumun %40'dır ve

bara gerilimleri çoğunlukla alt sınır olan 0.9pu değerinde minimum değeri almıştır ve bara gerilimlerin ortalaması 0.94pu'dur.

- Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklüğünün dağıtım sisteminin güç kayıplarını önemli ölçüde attırdığı için Amaç 3 dağıtım sistemini olumsuz yönde etkilemiştir.

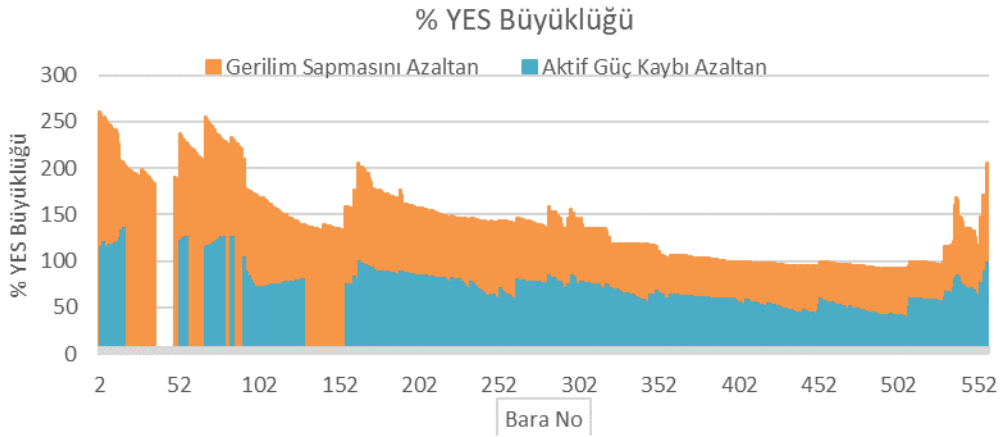
Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklük analizi özetlenirse:

- Dağıtım sisteminin mevcut gerilim sapmasını azaltan bir başka deyişle gerilim profilini iyileştiren YES büyüklükleri toplam yükün yaklaşık 2.5 katı ile bir katı aralığında elde edilmiş ve ortalama YES büyüklükleri toplam yükün %140'ı bulunmuştur.
- Hat başı için YES büyüklüğü toplam yükün iki buçuk katından daha fazla olduğu, mevcut aktif güç kaybın bir katı, mevcut reaktif güç kaybının bir buçuk katı ve mevcut gerilim sapmasının %25 olduğu elde edilmiştir.
- Aktif güç kayıpları birkaç barada mevcut kaybın üç katına çıkmış, tüm YES büyüklükleri için ortalama kayıp ise yaklaşık mevcut aktif güç kaybı kadardır. Reaktif güç kayıplarında ise maksimum mevcut reaktif güç kaybın 1.5 katına çıksa da ortalama mevcut kaybın yarısı kadardır. Gerilim sapmasında ise maksimum sapma mevcut durumun %40'ı iken ortalaması %12'dir. Bara gerilim değeri 1pu'ya yaklaştığı ve maksimum ve minimum değer aralıkların 1.02pu ile 0.95pu aralığındadır.

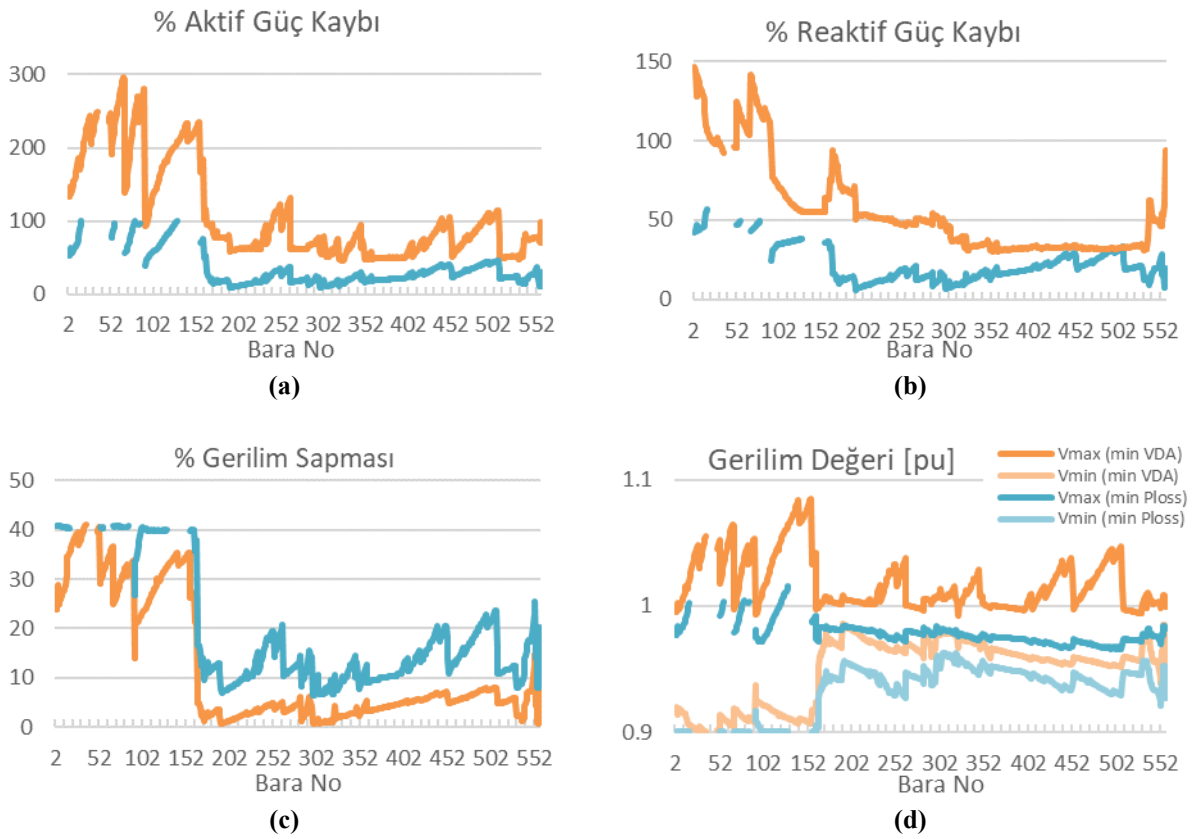
3.3. Aktif Güç Kayıp ve Gerilim Profil Analizlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde aktif güç kaybı ve gerilim sapması ile ilgili YES büyüklükleri karşılaştırılmıştır. İlk analiz gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri incelenmiştir ve elde edilen YES büyüklükleri Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri aktif güç kaybı azaltan YES büyüklüklerinden daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Aktif güç kaybını azaltan amaç probleminde uygun çözüm bulunamayan bara sayısı daha çoktur. İki amaç için elde edilen YES büyüklüklerindeki fark ortalama %80'dir. 160. baradan sonra her iki amaç için de YES büyüklükleri aynı paterne sahiptir, aralarındaki fark ise ortalama %60 civarındadır.

Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile dağıtım sistemindeki aktif ve reaktif güç kayıplarındaki, gerilim değişimlerini Şekil 9'da verilmiştir. Şekillerde turuncu rengi gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri için ve turkuaz rengi ise güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için elde edilen değerleri göstermektedir.



Şekil 8. Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri



Şekil 9. Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapsması (d) bara gerilimleri

Dağıtım sisteminin ilk baralarında gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri aktif güç kaybını üç katına kadar arttırdığı, aktif güç kaybını azaltan da ise %100 seviyelerine yakın olduğu Şekil 9.a'da görülmektedir. 160. baradan sonra her iki amaçta kayıp düşmüş ve ortalama fark %50'dir. Reaktif güç kaybında ise benzer değişim olduğu Şekil 9.b'de görülmektedir. Tüm sistem için ortalama fark %36 civarında iken 160. baradan sonra ortalama fark %25'e düşmektedir.

Şekil 9.c'de verilen gerilim sapsmaları incelendiğinde aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri için gerilim sapma değerleri daha fazla iken ilk baralarda maksimum gerilim sapsması %40 seviyelerinde

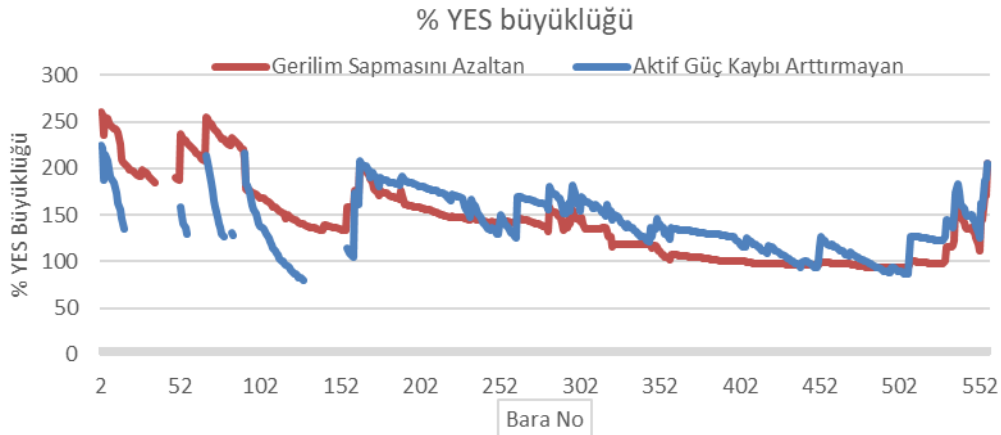
görülmektedir. Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri ile gerilim sapsması ortalama %12 iken aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri ile gerilim sapsması ortalama %18 seviyesindedir. Her iki durumda da 160. baradan sonra önemli bir azalma görülmektedir ve gerilim sapsmasını azaltan için %4.5'lere düşerken aktif güç kaybı azaltan için %13'lerde kalmaktadır. Şekil 9.d'deki bara gerilimlerinden de gerilim sapsması azaltan YES büyüklükleri maksimum bara gerilimlerini 1pu'ya çekerken minimum bara gerilimleri ile arasındaki fark da özellikle 160. baradan sonra küçülmüştür. Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinde uygun çözüm bulunmayan baralardaki

gerilim seviyelerin 1.1pu seviyesine doğru yükseldiği görülmektedir.

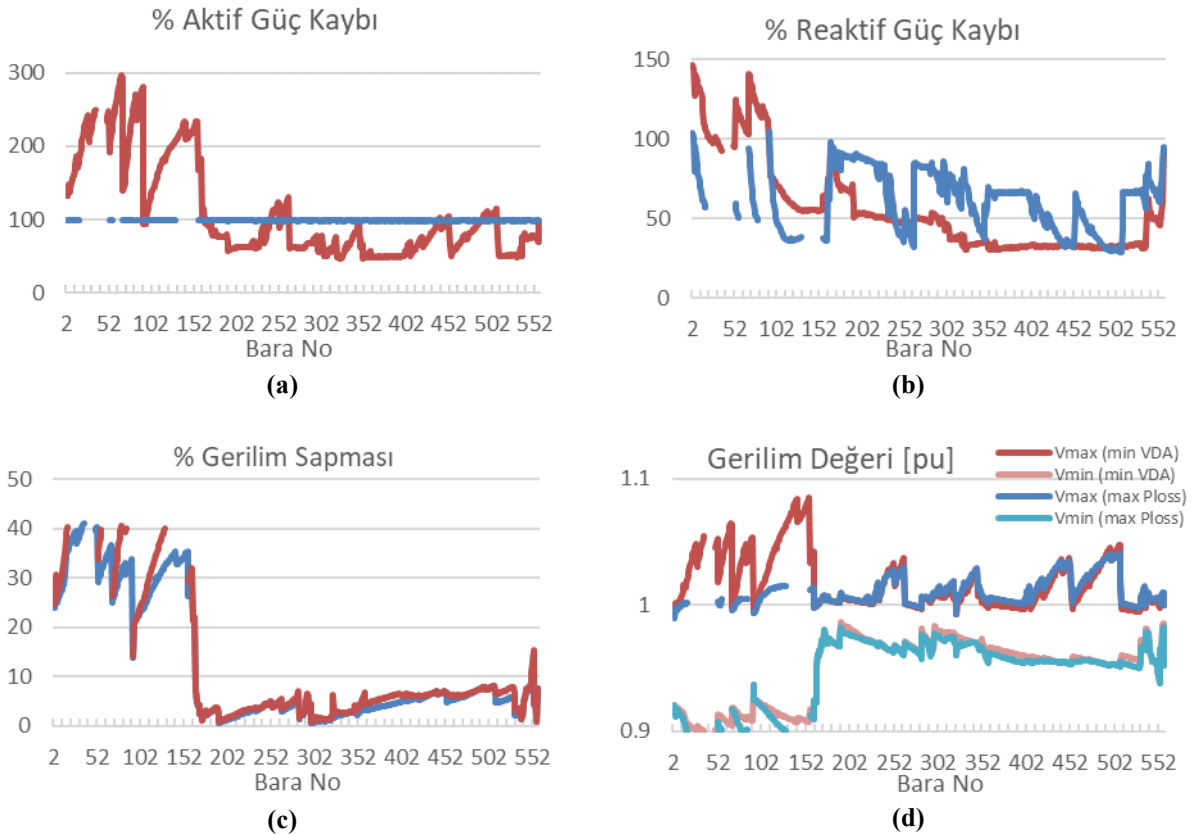
Bu bölümdeki ikinci analizde gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri karşılaştırılmıştır. Gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri, aktif güç kaybı arttırmayan YES büyüklüklerinden bazı baralarda büyük iken bazı baralar da küçük değerde olduğu ve birbirlerine çok yakın değerler aldıkları için YES büyüklükleri Şekil 10'da çizgi olarak gösterilmiştir. Her iki durumun yaklaşık YES büyüklük ortalaması %140 civarındadır ve birbirleri arasındaki ortalama farkı %19'dur. 160.

baradan sonra aktif güç kaybı arttırmayan YES büyüklükleri ortalama %140 iken gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerinin ortalaması %125 ve aktif güç kaybı arttırmayan %15 daha küçüktür.

Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinin sistemi nasıl etkilediğini Şekil 11'de aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, gerilim sapması ve gerilim değerleri ile gösterilmiştir. Şekilde kırmızı renk gerilim sapmasını azaltan YES büyüklüklerine ve mavi renk ise aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerine karşılık gelmektedir.



Şekil 10. Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri



Şekil 11. Gerilim sapmasını azaltan ve aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüğü durumunda (a) aktif güç kaybı (b) reaktif güç kaybı (c) gerilim sapması (d) bara gerilimleri

Şekil 11.a'da aktif güç kaybını azaltmayan YES büyüklükleri için aktif güç kayıplarının tüm baralarda %100 civarındadır ve uygun YES büyüklüğü bulunmayan baralardaki gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri için aktif güç kayıpların %300'lere çıktığı görülmektedir. 160. baradan sonra gerilim sapsmasını azaltan durum için aktif güç kaybı çoğunlukla %100'ün altındadır ve ortalaması %71'dir. Her iki durum arasındaki fark ise %30 ile gerilim sapsmasını azaltan durumunda daha düşüktür. Reaktif güç kaybını Şekil 11.b'de incelediğimizde aktif güç kaybı kadar artmamış ve en fazla %150 seviyesinde kaldığı görülmektedir. Aktif güç kaybında olduğu gibi ilk baralarda gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri daha büyük değerlere sahip iken 160. baradan sonra tam ters olmaktadır ve ortalama değerlerinde %20 fark bulunmuştur.

Şekil 11.c'de her iki durum için gerilim sapsması değeri yaklaşık değerler aldığı görülmektedir. İlk baralardaki değerlerin farklılıkları uygun çözüm bulunmayan baralara yakın yerlerde fazla olduğu ve 160. baradan sonraki farkın %1'in altında olduğu tespit edilmiştir. Bara gerilim değerlerini Şekil 11.d'de baktığımızda 160. baradan sonra bara gerilim aralıkların hemen hemen aynı olduğu ve ilk baralarda maksimum gerilim değerlerinde farkın büyük olduğu görülmektedir.

Aktif güç kaybını ve gerilim sapsması azaltan YES büyüklüklerin karşılaştırması

- Gerilim sapsmasını azaltan ile güç kaybını azaltan YES büyüklükleri arasında ortalama fark %60 olup gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri daha yüksek değerdedir.
- İki durumun aktif güç kayıpları arasındaki ortalama fark %80 civarlarındadır. Reaktif güç kayıplarında ortalama fark ise %40'ın altındadır. Gerilim sapsmasında ise ortalama fark %12'dir.

Aktif güç kaybı arttırmayan ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerin karşılaştırması

- Gerilim sapsmasını azaltan ile güç kaybını arttırmayan YES büyüklükleri arasında ortalama fark sadece %19 olup her iki durum için de ortalama büyüklükleri %140'dır.
- İki durumun aktif güç kayıpları arasındaki ortalama fark %20'dir. Reaktif güç kayıplarında ortalama fark ise %32'dir. Gerilim sapsmasında ise ortalama fark sadece %3.5'tir.

IV. BULGU VE TARTIŞMA

558 baralı gerçek dağıtım sistemi için aktif güç kaybı ve gerilim profili ile ilgili dört optimizasyon probleminde elde edilen YES büyüklükleri ve dağıtım sistemine etkileri genel olarak aşağıda değerlendirilmiştir. Buna göre;

- Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklüklerinin ortalaması toplam yükün %70'i iken aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerin de bunun iki katı olduğu belirlenmiştir. Aktif güç kaybını

arttırmayan YES büyüklüklerinde azaltan YES büyüklüklerindeki aktif ve reaktif güç kaybının üç katı iken gerilim sapsmasında bu oran iki katıdır. Aktif güç kaybını göre YES büyüklüklerini arttırdığımız zaman aktif ve reaktif güç kaybı gerilim sapsmasına göre daha çok arttığı ve hepsinin mevcut duruma eşit veya altında kaldığı tespit edilmiştir.

- Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerin ortalaması toplam yükün %140'ı iken gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklükleri de %150'sidir. Arttırmayan YES büyüklük değerlerin elde edilmesinde kısıt limitlerine göre belirlenmiştir. Çoğunlukla bara gerilim limitleri belirlerken hat başlarında ise YES kapasite limiti belirlemiştir. Ayrıca gerilim sapsmasını arttırmayan YES büyüklüğünde aktif ve reaktif güç kayıpları çok artmıştır. Aktif güç kayıpları mevcut durumdaki değerin dört katına yaklaşırken ve reaktif güç kayıpları ise iki buçuk katına yaklaşmıştır.
- Aktif güç kaybını ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri karşılaştırıldığında YES büyüklükleri arasında toplam yükün ortalama %80'i kadar farklılık olduğu ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklük değerleri daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırma için aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmaları arasındaki ortalama fark sırasıyla %80, %40 ve %12'dir. Gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüğünde aktif güç kayıpları hat başında mevcut durumun üç katına çıkarken 160. baradan sonra mevcut duruma veya daha aşağısında olmaktadır. Benzer şekilde reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmaları hat sonuna doğru daha da iyileşmiştir.
- Aktif güç kaybını arttırmayan ve gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklükleri karşılaştırıldığında YES büyüklükleri arasında toplam yükün ortalama %43'ü kadar farklılık olduğu görülmüştür. Aktif güç kayıpları, reaktif güç kayıpları ve gerilim sapsmalarındaki ortalama fark sırasıyla %62, %32 ve %5.5 civarlarındadır. bazı baralarda aktif güç kaybını arttırmayan YES büyüklüklerinde değerler daha büyük iken bazı baralarda gerilim sapsmasını azaltan YES büyüklüklerinde değerler daha büyüktür. 160. baradan sonra YES büyüklükleri arasındaki ortalama fark %17'lere gerilemiş ve birbirine yaklaşmıştır. Aktif ve reaktif güç kayıpları yarıya inerken gerilim sapsmaları da %1'in altına inmiştir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada dağıtım sistemini YES'in büyüklüğü ve konumu nasıl etkilediği incelenmiştir. YES yerleşiminde dağıtım sisteminin mevcut aktif güç kaybını ve gerilim profilini korumak veya iyileştirmek amaçları dikkate alınmıştır ve her bir bara için YES büyüklükleri elde edecek dört optimizasyon problemi tanımlanmıştır. Bu dört amaç ile 558 baralı gerçek

dağıtım sistemi için problem çözülmüş ve elde edilen YES büyüklükleri ile dağıtım sisteminin aktif güç kaybı, reaktif güç kaybı, ortalama gerilim sapması ve bara gerilimlerin değişimi mevcut dağıtım sistemine göre araştırılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- YES büyüklük değerleri amaca ve yerleştiği baraya göre farklı değerler almaktadır.
- Aktif güç kaybını azaltan YES büyüklükleri diğer amaçlarda elde edilen YES büyüklüklerinden daha küçük değerler almaktadır.
- Gerilim sapmasını arttırmayan YES büyüklükleri toplam yükün üç katı olan en büyük değerleri almakta dolayısıyla aktif ve reaktif güç kayıplarını çok arttırmaktadır.
- Aktif güç kaybını arttırmayan ve gerilim sapmasını azaltan YES büyüklükleri yakın değerler almaktadır. Çoğunlukla dağıtım sisteminin mevcut durumunu ya korumak ya da iyileştirmektedir.

Bu çalışma ile amaca ve YES'in yerleşeceği baraya göre YES büyüklüklerin farklı değerler aldığı tespit edilmiştir. Aktif güç kaybını iyileştirmek amacıyla YES barındırma kapasitesinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Gerilim profilinin mevcut durumunu korumak amacı ile YES büyüklüklerin belirlenmesinin dağıtım sisteminin güç kayıplarını olumsuz etkilediği ve amacın YES büyüklük belirlemede uygun olmadığı görülmüştür. Aktif güç kaybının mevcut durumunu korumak ve gerilim profilini iyileştirmek amacıyla dağıtım sisteminin faydalanabileceği YES barındırma kapasitesinin daha büyük olduğu görülmüştür. Dağıtım sistemi planlayıcılarına; YES barındırma kapasitesi kadar yerleştiği baranın da önemli olduğu, YES'in olumlu ve olumsuz etkisinin yerleştiği baraya ve kapasitesine göre değiştiği ve YES barındırma kapasitesinin arttırabileceği gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda dağıtım sisteminin yapısı, yüklerin yoğunluğu ve yerleşimine ek olarak yük profilini ve YES'in üretim profilini de dikkate alarak farklı amaçlar için YES büyüklüklerin ve yerleşimin incelenmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; TÜBİTAK 116E107 nolu "Yüksek Oranda Yerel Elektrik Santralleriyle Beslenmekte Olan Dağıtım Şebekelerinin Etki Haritalarının Çıkarılması" isimli araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir. Bu çalışmada kullanılan veriler Sakarya Dağıtım Elektrik A.Ş.'inden temin edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] IEA (2022), Renewables 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, License: CC BY 4.0.
- [2] Abdmouleh, Z.; Gastli, A.; Ben-Brahim, L.; Haouari, M.; Al-Emadi, N. A. Review of

Optimization Techniques Applied for the Integration of Distributed Generation from Renewable Energy Sources. *Renew. Energy* 2017, 113,266–280.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>.

- [3] Sultana, U.; Khairuddin, A. B.; Aman, M. M.; Mokhtar, A. S.; Zareen, N. A Review of Optimum DG Placement Based on Minimization of Power Losses and Voltage Stability Enhancement of Distribution System. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 63, 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.056>.
- [4] Akorede, M. F.; Hizam, H.; Aris, I.; Ab Kadir, M. Z. A. A Review of Strategies for Optimal Placement of Distributed Generation in Power Distribution Systems. *Res. J. Appl. Sci.* 2010, 5 (2), 137–145.
- [5] Kumar, M.; Soomro, A. M.; Uddin, W.; Kumar, L. Optimal Multi-Objective Placement and Sizing of Distributed Generation in Distribution System: A Comprehensive Review. *Energies* 2022, 15 (21). <https://doi.org/10.3390/en15217850>.
- [6] Viral, R.; Khatod, D. K. Optimal Planning of Distributed Generation Systems in Distribution System: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16 (7), 5146–5165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020>.
- [7] Yang, B.; Yu, L.; Chen, Y.; Ye, H.; Shao, R.; Shu, H.; Yu, T.; Zhang, X.; Sun, L. Modelling, Applications, and Evaluations of Optimal Sizing and Placement of Distributed Generations: A Critical State-of-the-Art Survey. *Int. J. Energy Res.* 2021, 45 (3), 3615–3642. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/er.6104>.
- [8] Willis, H. L. Analytical Methods and Rules of Thumb for Modeling DG-Distribution Interaction. In 2000 power engineering society summer meeting (Cat. No. 00CH37134); 2000; Vol. 3, pp 1643–1644.
- [9] Wang, C.; Nehrir, M. H. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems. *IEEE Trans. Power Syst.* 2004, 19 (4), 2068–2076.
- [10] Ali, E. S.; Abd Elazim, S. M.; Abdelaziz, A. Y. Ant Lion Optimization Algorithm for Optimal Location and Sizing of Renewable Distributed Generations. *Renew. Energy* 2017, 101, 1311–1324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.023>.
- [11] El-Ela, A. A. A.; El-Sehiemy, R. A.; Abbas, A. S. Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Water Cycle Algorithm. *IEEE Syst. J.* 2018, 12 (4), 3629–3636. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2796847>.
- [12] Niknam, T.; Taheri, S. I.; Aghaei, J.; Tabatabaei, S.; Nayeripour, M. A Modified Honey Bee Mating Optimization Algorithm for Multiobjective Placement of Renewable Energy Resources. *Appl.*

- Energy 2011, 88 (12), 4817–4830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.023>.
- [13] Maciel, R. S.; Rosa, M.; Miranda, V.; Padilha-Feltrin, A. Multi-Objective Evolutionary Particle Swarm Optimization in the Assessment of the Impact of Distributed Generation. *Electr. Power Syst. Res.* 2012, 89, 100–108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.02.018>.
- [14] Hadian, A.; Haghifam, M.-R.; Zohrevand, J.; Akhavan-Rezai, E. Probabilistic Approach for Renewable Dg Placement in Distribution Systems with Uncertain and Time Varying Loads. In 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting; 2009; pp 1–8. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275458>.
- [15] Chen, Y.; Strothers, M.; Benigni, A. A Stochastic Approach to Optimum Placement of Photovoltaic Generation in Distribution Feeder. In 2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC); 2016; pp 1–7. <https://doi.org/10.1109/PSC.2016.7462847>.
- [16] Abdelkader, M. A.; Elshahed, M. A.; Osman, Z. H. An Analytical Formula for Multiple DGs Allocations to Reduce Distribution System Losses. *Alexandria Eng. J.* 2019, 58 (4), 1265–1280. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.009>.
- [17] Farh, H. M. H.; Eltamaly, A. M.; Al-Shaalan, A. M.; Al-Shamma'a, A. A. A Novel Sizing Inherits Allocation Strategy of Renewable Distributed Generations Using Crow Search Combined with Particle Swarm Optimization Algorithm. *IET Renew. Power Gener.* 2021, 15 (7), 1436–1450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/rpg2.12107>.
- [18] Hassan, A. S.; Sun, Y.; Wang, Z. Water, Energy and Food Algorithm with Optimal Allocation and Sizing of Renewable Distributed Generation for Power Loss Minimization in Distribution Systems (WEF). *Energies* 2022, 15 (6). <https://doi.org/10.3390/en15062242>.
- [19] Roshan, R.; Ravishankar, B. S.; Mohan, N.; Sandeep Kumar, K. J.; Devaru, D. G. Reassessment of Power Losses and Enhancement of Techno-Economic Feasibility in a Radial Distribution System. In 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon); 2022; pp 1–6. <https://doi.org/10.1109/MysuruCon55714.2022.9972726>.
- [20] Elkadeem, M. R.; Abd Elaziz, M.; Ullah, Z.; Wang, S.; Sharshir, S. W. Optimal Planning of Renewable Energy-Integrated Distribution System Considering Uncertainties. *IEEE Access* 2019, 7, 164887–164907. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947308>.
- [21] C, H. P.; Subbaramaiah, K.; Sujatha, P. Optimal DG Unit Placement in Distribution Networks by Multi-Objective Whale Optimization Algorithm & Its Techno-Economic Analysis. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 214, 108869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108869>.
- [22] Huiling, T.; Jiekang, W.; Fan, W.; Lingmin, C.; Zhijun, L.; Haoran, Y. An Optimization Framework for Collaborative Control of Power Loss and Voltage in Distribution Systems With DGs and EVs Using Stochastic Fuzzy Chance Constrained Programming. *IEEE Access* 2020, 8, 49013–49027. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976510>.
- [23] Oskouei, M. Z.; Şeker, A. A.; Tunçel, S.; Demirbaş, E.; Gözel, T.; Hocaoglu, M. H.; Abapour, M.; Mohammadi-Ivatloo, B. A Critical Review on the Impacts of Energy Storage Systems and Demand-Side Management Strategies in the Economic Operation of Renewable-Based Distribution Network. *Sustainability* 2022, 14 (4). <https://doi.org/10.3390/su14042110>.
- [24] Kesavan, T.; Lakshmi, K. Optimization of a Renewable Energy Source-Based Virtual Power Plant for Electrical Energy Management in an Unbalanced Distribution Network. *Sustainability* 2022, 14 (18). <https://doi.org/10.3390/su14181129>.
- [25] Hai, T.; Zhou, J.; Muranaka, K. Energy Management and Operational Planning of Renewable Energy Resources-Based Microgrid with Energy Saving. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 214, 108792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108792>.
- [26] Püvi, V.; Lehtonen, M. Evaluating Distribution Network Optimal Structure with Respect to Solar Hosting Capacity. *Electr. Power Syst. Res.* 2023, 216, 109019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109019>.
- [27] Tunçel, S.; Oskouei, M. Z.; Şeker, A. A.; Gözel, T.; Hocaoglu, M. H.; Abapour, M.; Mohammadi-Ivatloo, B. Risk Assessment of Renewable Energy and Multi-Carrier Energy Storage Integrated Distribution Systems. *Int. J. Energy Res.* 2022.
- [28] Thukaram, D.; Wijekoon Banda, H. M.; Jerome, J. A Robust Three Phase Power Flow Algorithm for Radial Distribution Systems. *Electr. Power Syst. Res.* 1999, 50 (3), 227–236. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00150-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00150-3).