



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

Asst. Prof. Dr. Merve ER,
Industrial Engineering

Dr. Mohammad ALSUNAIIDİ,
Electrical and Electronics Engineering

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,
Mechanical Engineering-Energy

Asst. Prof. Dr. Z. Aysun ALTİKARDEŞ,
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

Asst. Prof. Dr. S. Enes HACİBEKTAŞOĞLU
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 Yağın ARĞA,
Biyomühendislik, Biyoinformatik

Dr. Öğretim Üyesi Merve ER,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Mohammad ALSUNAI,DI,
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 Mekanik

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. Öğretim Üyesi S. Enes HACIBEKTAŞOĞLU
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. Macro-Capsule Fabrication via 3D Printing for Mesenchymal Stem Cell Encapsulation

Mehmet Ali KARACA, Derya Dilek KANCAĞI, Uğur ÖZBEK, Ercüment OVALI, Özgül GÖK

Sayfa/Page:157-163

2. Gri Sistem Teorisi ve Enerji Tüketim Modellemesinde Bir Uygulama

Sevcan DEMİR ATALAY, Esra MAVİGÖZ

Sayfa/Page:164-176

3. Evaluation of potential environmental risks of graphene-based materials by examining the effect of rGO on the microbial activity of *P. Chrysosporium*.

Özgecan MADENLİ, Ece Ümmü DEVECİ

Sayfa/Page:177-182

4. QGIS ile Hidrolojik Model Oluşturma ve Meteorolojik Verilerin Zaman Periyotlarına Göre Değişimi: Kahramanmaraş Örneği

Burcu ERCAN, Mehmet ÜNSAL

Sayfa/Page : 183-192

5. Energy and Exergy Analysis of an Innovative Power/Refrigeration Cycle: Kalina Cycle and Ejector Refrigeration Cycle

Candeniz SEÇKİN

Sayfa/Page : 193-202

6. A Preliminary Study on Purification and Characterization of Lipase(s) Produced by *Cryptococcus Diffluens* D44

Esra BÜYÜK, Orkun PINAR

Sayfa/Page : 203-212

7. Otomatik Depolama Vincinin Titreşiminin İleri Besleme Kuvveti ile Kontrolü ve Endüstriyel Alanda Uygulanması

İ. Sina KUSEYRİ

Sayfa/Page : 213-218

8. Uzaktan Eğitim Sistemi ile Gerçekleştirilen İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Çalışan Memnuniyetine Etkisinin İncelenmesi

Orkun DALYAN, Hatice DALYAN, Mehmet PİŞKİN, Ömer Faruk ÖZTÜRK

Sayfa/Page : 219-225

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

9. Poligliserol Esaslı Çok Dallanmış Üretan Metakrilat/POSS/Gümüş Nanopartikül İçeren Nanokompozitlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Gülay BAYRAMOĞLU

Sayfa/Page :226-236

10.Effect of Doping Concentration and Excitation Power on Upconversion and Temperature Sensitivity of $Gd_3Ga_5O_{12}:Yb^{3+}/Er^{3+}$ Phosphors

Hümeyra ÖRÜCÜ

Sayfa/Page :237-245

11.Türkiye Madencilik Sektörü İş Kazalarının Analizi ve Gelecek Perspektifleri

Mustafa SEKMEN, Mehmet Ali ZENGİN

Sayfa/Page:246-258

12.Yetenek Yönetimi Uygulamalarının Örgüt Performansı ile İlişkisinde Kurumsal Girişimciliğin Aracılık Etkisi

Zülal ÖZTÜRK KAYA, Gaye KARAÇAY, Selim ZAIM, Lutfihak ALPKAN

Sayfa/Page:259-272

13.İçme Suyu İletiminde Terfili Hatlarla Cazibeli Hatların Birlikte Kullanılmasının Pompalara Etkilerinin Araştırılması

Ali Osman KOCA, Mustafa ATMACA

Sayfa/Page:273-284

Macro-Capsule Fabrication via 3D Printing for Mesenchymal Stem Cell Encapsulation

Mehmet Ali KARACA¹ , Derya Dilek KANCAĞI² , Uğur ÖZBEK³ ,ERCÜMENT OVALI² , ÖZGÜL GÖK⁴ 

¹Department of Medical Biotechnology, Institute of Health Sciences, Acibadem Mehmet Ali Aydınlar University, Istanbul, Turkey

²Acibadem Labcell Cellular Therapy Laboratory, Istanbul, Turkey

³Medical Genetics Department, School of Medicine, Acibadem Mehmet Ali Aydınlar University, Istanbul, Turkey

⁴Department of Medical Engineering, Engineering and Natural Sciences Faculty, Acibadem Mehmet Ali Aydınlar University, Istanbul, Turkey

Abstract

Cell transplantation is a widely used method to induce cell-mediated immune reactions inside the body. However, possible immune responses to the transplanted cells decrease the efficiency of applied cell therapy. This issue can be addressed by the transplantation of cells via 3 Dimensional (3D)-printed polymeric capsules which encapsulate cells and protect them from immune system attacks. Cell-loaded capsules (macro or micro) have emerged as potential carriers for more efficacious cellular therapies. In this study, 3D-printed porous capsules were prepared from biodegradable and biocompatible polyester “polycaprolactone (PCL)” and this macro-capsule was evaluated as a carrier for its cell encapsulation effectiveness. The macro-capsule was designed to have dimensions of 2x5x10 mm and drawn in Autodesk Fusion 360 program. PCL was utilized for its 3D bio-printing via Axolotl Bioprinter Dual Print Head System. The leakage structure on the macro-capsule was visually controlled by surface electron microscopy (SEM). The permeability of the macro-capsule was tested with human serum albumin (HSA) protein and trypan blue dye. Sterilization of the obtained macro-capsule was achieved via Ultra Violet (UV) light and the cytotoxicity of the polycaprolactone capsule was tested for 24 and 72 hours incubation periods. The semi-permeable macro-capsule was successfully obtained as a closed and hollow form. Its porous structure was demonstrated using trypan blue dye. To evaluate the porosity of the macrocapsule, human serum albumin (HSA) protein release was performed from the macrocapsule. It has been shown that 98% of HSA was released from the macrocapsule within 24 hours. The PCL macrocapsule was sterilized using UV light and was reported to show no *in vitro* cytotoxicity. In addition, it was shown that the cells in the macro-capsule consumed at least 10% glucose from the outside medium during 12 days of incubation, compared to 2-Dimensional (2D) cell culture conditions, and were able to release at least 8% of the lactic acid molecules outside. In conclusion, reproducible fabrication of polymer macro-capsule, high viability of encapsulated cells inside, and their metabolic assessment results have obviously indicated the potential of these capsules as effective carriers for living cells with transplantation-dependent cellular therapies.

Keywords: Macro-capsule, Polymeric Capsule, 3D Bio-printing, Cell therapy, Mesenchymal Stem Cells

Öz

Hücre nakli, vücutta hücre aracılı bağışıklık reaksiyonlarını indüklemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bununla birlikte, nakledilen hücrelere karşı olası bağışıklık tepkileri, uygulanan hücre tedavisinin etkinliğini azaltır. Bu sorun, hücreleri enkapsüle eden ve onları bağışıklık sistemi saldırılarından koruyan 3 boyutlu (3B) baskılı polimerik kapsüller aracılığıyla hücrelerin nakli ile çözülebilir. Hücre yüklü kapsüller (makro veya mikro), daha etkili hücre tedavileri için potansiyel taşıyıcılar olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, biyobozunur ve biyouyumlu polyester “polikaprolakton (PKL)”den 3B baskılı gözenekli kapsüller hazırlanmış ve bu yarı-geçirgen makro-kapsüllerin hücre transplantasyonu için etkin bir taşıyıcı olup olmadığı incelenmiştir. Tasarlanan makro kapsül (2x5x10 mm) Autodesk Fusion 360 programında çizilmiş ve PKL materyali ile Axo Bioprinter Dual Print Head System kullanılarak basılmıştır. Makro-kapsülün kapalı formu üzerinde sızıntı, yüzey elektron mikroskobu ile görsel olarak kontrol edilmiştir. Makrokapsülün geçirgenliği tripan mavi boya ve ayrıca insan serum albümin (ISA) proteini ile test edilmiştir. Polikaprolakton malzemelerinin hücreler

Corresponding Author: Özgül GÖK, Tel: 0 216 500 4188-dahili, e-posta: ozgul.gok@acibadem.edu.tr

Submitted: 10.05.2022, **Revised:** 06.10.2022, **Accepted:** 27.03.2023

üzerindeki sitotoksitesi 24 ve 72 saatlik zaman dilimlerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kapalı ve içi boş olacak şekilde yarı-geçirgen makro-kapsül formu başarı ile elde edildi. Makro-kapsülün gözenekli yapısının olduğu kapsülün tripan mavi boyaya kullanılarak gösterildi. Makrokapsülün gözenekliliğinin değerlendirilmesi için makro-kapsülden insan serum albümin protein salınımı yapıldı. ISA proteininin miktarca %98'inin 24 saat içinde makro kapsülden dışarıya salındığı gösterildi. PKL makro-kapsül UV ışığı kullanılarak sterilize edildi ve *in vitro* şartlarda sitotoksite göstermediği raporlandı. Ayrıca makro-kapsül içindeki hücrelerin 12

günlük inkübasyon sırasında 2 boyutlu (2B) hücre kültürü şartlarına göre en az %10 oranında dışarıdaki besiyerden glikoz tüketimi yaptıkları ve ürettikleri laktik asit moleküllerinin en az %8'ini içerden dışarıya salılabildikleri gösterildi. Polimer makro-kapsülün tekrarlanabilir üretimi, içerideki enkapsüle hücrelerin yüksek canlılık oranı ve bunların metabolik değerlendirme sonuçları, bu kapsüllerin transplantasyona bağlı hücresel terapilerde canlı hücreler için etkin taşıyıcılar olma potansiyelini açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Makro Enkapsülasyon, Polimerik Kapsül, 3B Biyo-yazıcı, Hücresel Tedavi, Mezenkimal Kök Hücre

I. INTRODUCTION

Cell therapy on tissue regeneration with patient-derived tissue or cell sources paves the way for new therapeutic opportunities for patients. Mesenchymal stem cell-based therapy is applied in various types of diseases and degenerative tissue such as tendons [1], intervertebral disk [2], bone [3], and articular cartilage [4]. Various cell types such as beta cells were used for the regulation of hormone and growth factor levels for the treatment of patients. Clinically islet (Beta cell) transplantation is an alternative way to exogenous insulin independence for prolonged periods. The main limitations of islet transplantation are the lack of organ donors, inconsistent islet yield, and multiple organ donors per patient [5]. The other severe limitation of the islet transplantation points out to the host immune rejection from recipient immune cells. These recipient immune cells and host immune rejection eliminate the long-term functionality and survival of the transplanted cells [6]. However, decreasing the survival rate of delivered cells inside the patient body directly correlated with a decrease in the efficiency of cell transplantation therapy. So, immunosuppressive drugs have emerged as alternative tools for obtaining effective cell therapy but some immunosuppressive such as glucocorticoids had significant islet toxicity [5]. Immunological problems in cell therapy resulted in the development of new therapeutic strategies for the long-term survival of transplanted cells. Encapsulation of the cells via biocompatible and semi-permeable macro-capsules is an attractive way for tissue regeneration. So, implantable, and retrievable macro-capsules for cell therapy seem to provide outstanding advantages to improve the therapeutic efficiency, especially in genetically engineered cell transplantation ranging from the elimination of frequent administrations of cells to the isolation of delivered cells from immunogenic attacks [7].

Polymeric capsule-based strategies have yielded promising results in various disease models without the need for immunosuppressing agents [8]. The cell-encapsulation strategy has emerged as a powerful tool for protecting cells from immunoreactions, hence allowing the nutrient transfer to maintain cell survival and function inside [9]. Encapsulation strategies as macro and micro size were applied to mammalian cells for different clinical usage [10]. Capsules have

the potential to possess a special role as a barrier between transplanted cells and immune responses inside the body. Implantable and scalable macro-capsules were designed to obtain long-term viability and functioning of the delivered cell inside the patient body [10]. On the other side, large-sized macro-capsules which are 100.000 times smaller than a regular organ size might demonstrate limited organ function [11–13]. Still, studies on transplantation of islet cells loaded retrievable macro-sized capsule design showed that macro-capsule might provide long-term usage for diabetes in clinical applications [14–16].

Retrievable macro-capsule constructs have been utilized as attractive scaffolds for the delivery of various cell types and genetically modified cells to regulate protein or growth factor levels in protein deficiency diseases [17]. Especially, an immunosuppressive feature of mesenchymal stem cells (MSCs) was shown to be enhanced in terms of the efficiency of the islet transplantation via increasing nitric oxide production and secreting higher levels of immunomodulatory cytokines [17]. Based on these findings, the potential of MSCs for repairing damaged tissue, promoting angiogenesis, and reducing inflammation might be revealed to a greater extent for patient-specific cellular therapies. In this study, we have designed a semi-permeable 3D macro-capsule for the proper delivery of MSCs, which can be evaluated as a container for the encapsulation of cells with high cell viability. Although several biomaterial-based encapsulation techniques have been previously established for cell transplantation, this design provides a container-based reservoir of encapsulated cells with a more effective, cheaper, reproducible, and achievable strategy for further cellular therapies. A biocompatible and biodegradable PCL polymer was preferred for 3D printing of this macro-capsule, for which the level of porosity was analyzed by measuring the amounts of transported biomarkers throughout such as consumed glucose and produced lactic acid. MSCs with high viability up to 72 hours might contribute to the development of effective approaches for biomaterial-based cellular therapy.

II. MATERIALS VE METOD

2.1. Preparation of Macro-capsules

Designed macro-capsule were 3 dimensionally (3D) drawn in Autodesk Fusion 360 program. Drawn with assigned dimensions as 2x5x10 mm, macro-capsules were printed by using Axolotl Bioprinter Dual Print Head System (Axolotl, Turkey) which was loaded with polycaprolactone (PCL) (Mwt: 80kDa). The highly permeable membrane through the capsule structure was expected to allow the transportation of nutrients and growth factors inside the capsule to the environment. The permeability of the porous membrane was optimized with various printing options (feed rate: 25%, 70 psi, first layer height: 2, extruder temperature: 120 °C, working stage: 55 °C, printing path: random). Printing options of programs (REPETIER-HOST and SLIC3R) change capsule structure and permeability of the porous membrane. Lastly, the macro-capsule is visually controlled to the presence of leakage on the closed form of the macro-capsule. Then, the permeability of the macro-capsule is tested via the transportation of human serum albumin (HSA) protein and trypan blue dye from inside to capsule to outside during the day.

2.2. Permeability Study

Obtained macro-capsules were checked for their permeability abilities by using Trypan blue dye as an indicator. Trypan blue dye (50 μ L) was injected into the macro-capsule. The injection zone was filled with melted polycaprolactone. Trypan blue release from microcapsule was analyzed after 1 day of incubation time.

2.3. Protein Release Profile

Human serum albumin (50 μ L/ 10000 μ g) (20% HSA, Octapharma, Switzerland) was used to test protein transportation between inside to capsule to outside during the day. Injection of HSA inside the capsule was sealed with melted PCL. Protein-loaded macro-capsule was periodically transferred to fresh test tubes containing an equal volume of fresh PBS solution in each period at RT (0, 0.5, 1, 3, 6,12, and 24 hours). Releasing of HSA content to the environment each time at RT was determined and quantified by using a calorimetric measurement BCA assay kit (BCA assay, Takara, Shiga, Japan) according to the manufacturing procedure.

2.4. Morphological Analysis

Macro-capsule was coated with 3.5 nm of gold-palladium and visualized with SEM (Thermo Fisher Scientific QuattroS, ABD). The imaging process was done under a low vacuum with an EDS detector at 5 kV.

2.5. Cell Culture Experiments

Green fluorescence particle (GFP) tagged human umbilical cord mesenchymal stem cells (Acibadem Labcell, Turkey) were cultured in MSC nutrient-

free medium (Biological Industries, Sartorius, Israel) and incubated at 37 °C with 5% CO₂. The waste medium was removed, and fresh medium was added every 48 hours until the 80% confluency of the flask was reached. Then, cells were trypsinized, centrifuged at 300 RCF for 10 minutes, and then collected in ringer lactate solution (containing 0.5% HSA by volume). Cell number and cell viability were counted with a cell counter device (TC20 Automated Cell Counter, BioRad, ABD).

Sterilization of macro-capsules was performed with serial washing with 10mM PBS and 4% (v/v) ethanol solution. UV sterilization procedure for 2 hours was applied after the antibiotic treatment (2% Penicillin-streptomycin) to the macro-capsules, which were later on directly and indirectly contacted to MSC cells for the measurement of their cytotoxicity effects. Prior to the experiment, cells were GFP-tagged so that cytotoxicity assessment of the cells was performed by comparing the GFP intensity signals (Image J program).

This process was conducted comparably for both cells in cryoprecipitate (Kızılay, Turkey) solution and non-cryoprecipitate solution encapsulated into the macro-capsules for 15 days of incubation time. Each group of cells (250.000 cells in 50 μ L media) was injected into the macro-capsules, and the area of the injection site was sealed with previously melted PCL polymer. Afterward, these macro-capsules were incubated in MSCs nutrient-free medium for 15 days at 37 °C and 5% CO₂. At different time points (1, 3, 5, 7, and 15 days), the culture medium was renewed and collected media was evaluated for the measurement of glucose consumption level and lactic acid production level. The collected cultivation medium was analyzed via the ADVIA® 1800 Clinical Chemistry System (Siemens, Germany) [18].

III. FINDINGS AND DISCUSSION

3.1. Findings

A 3D macro-capsule design was constructed via Autodesk Fusion 360 program and verified with the Repetier-host program (Figures 1 A, and B). This designed capsule was printed by using Axolotl Bioprinter Dual Print Head System (Figure 1C) with extrusion (pneumatic) based bioprinting, where a synthetic polyester polymer, PCL, was first melted at the syringe upon heating up to 120 °C, and then it was printed on the plate at room temperature with 0.25 mm nozzle. The permeability of the obtained macro-capsule was tested with 0.5% Trypan blue dye. It was observed that the aqueous part of trypan blue solution (prepared in 10mM PBS) was released into the environment, but the blue-colored dye stayed inside the capsule after 1 day of incubation at room

temperature. Compared with small molecular weight dye molecules, the permeability of the printed macro-capsules was also studied with HSA, as a model for high molecular weight, but the globular biological protein-based sample. As a time-dependent manner, almost all HSA injected into the macro-capsule's inner cavity was demonstrated to be released within 6 hours and 98% of total HSA protein was measured to be released from the macro-capsule in 24 hours of incubation (Figure 1D). Lastly, the sealed site of the leakage form for the porous capsule after the injection

of the solution of interest inside was imaged after the completion of the release study under SEM microscopy. The injection site of the macro-capsule was successfully sealed with PCL and the injection site of the macro-capsule was stable after releasing the protein out as shown in Figure 1E. Moreover, a closed and hollow form of the PCL-based macro-capsule was used for cell culture experiments as a control group (Figure 1).

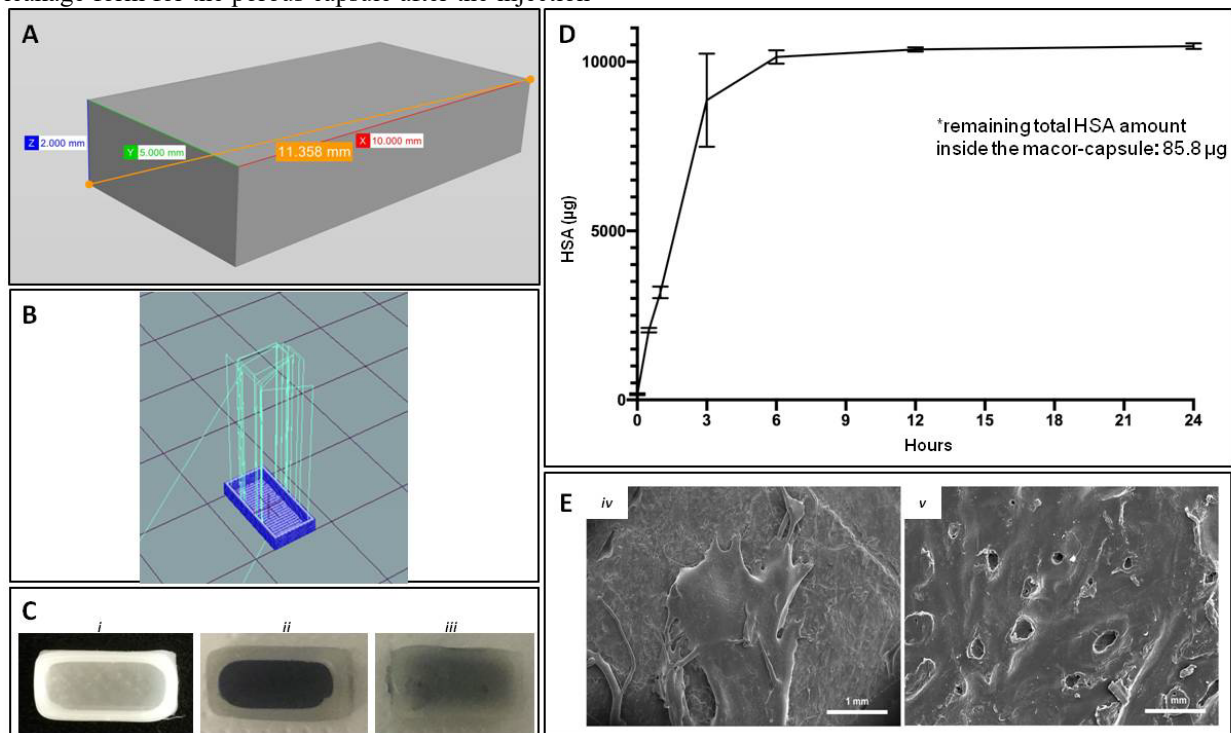


Figure 1. (A) Dimensions of designed macro-capsule with Autodesk Fusion 360 program, (B) printing path for 3D Bio-printer, (C) closed form of macro-capsule (i) trypan blue loaded macro-capsule (ii) closed form of trypan blue loaded macro-capsule (iii), (D) HSA release profile upon its diffusion from the macro-capsule (E) SEM images of the macro-capsule before (iv) and after (v) HSA permeability tests.

After sterilization of the macro-capsules, their cytotoxicity behavior was evaluated on GFP-tagged MSCs. Two different methods were applied to the macro-capsules for their interaction with cells. In the former one, macro-capsules were directly put on top of the seeded cells in a petri dish. On the other hand, the indirect contact method included the incubation of cells with a media where macro-capsules were previously incubated for 72 hours at 37 °C and 5% CO₂. After incubation of cells for 24, 48, and 72 hours, cells were visualized under fluorescent microscopy for their morphology as well as their GFP expressions as an indication of cytotoxicity level. Figure 2A compares the adhered cells on petri dishes with the non-treated MSCs as a negative control group. Significant cytotoxicity levels were not observed for MSCs investigated for their indirect interaction with the prepared macro-capsules. However, a slight decrease in the cell viability was detectable for the ones subjected to the direct contact

method depending on the incubation time. This behavior was also confirmed by the measurement of the GFP fluorescent signal of processed images by the Image J program (Figure 2B). This difference in obtained cytotoxicity results may be attributed to the elimination of nutrient uptake by macrocapsule as incubation time gets prolonged. Additionally, it was observed that MSCs were detached from petri dishes upon their being scratched due to direct contact with the outer surface of the macro-capsule. However, cell attachment and proliferation were not observed under the macro-capsule contact surface.

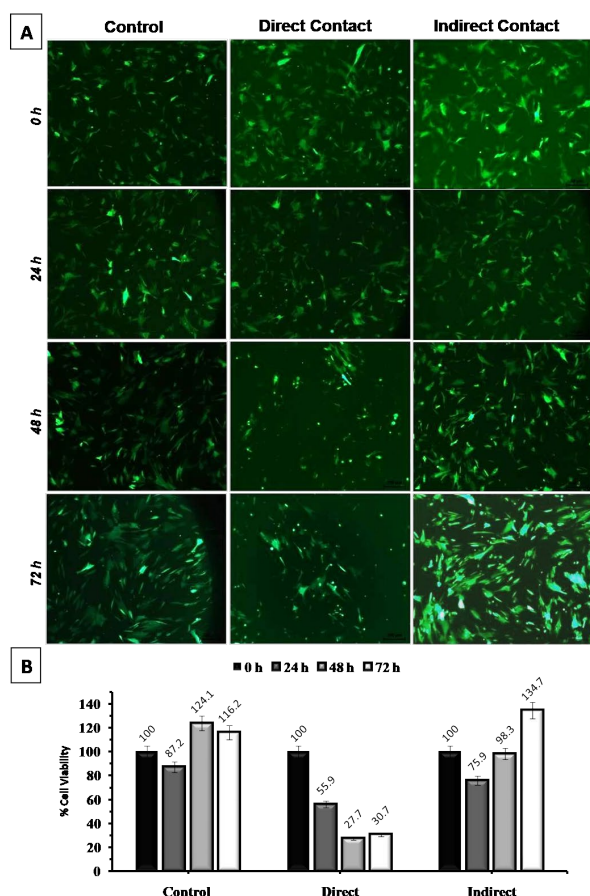


Figure 2. (A) Fluorescent microscopy images of GFP tagged MSCs at different times upon incubation with the macro-capsule, (B) a comparative graph for corresponding GFP signal intensities calculated by Image J.

For a better understanding of the metabolic activities of living cells in the incubation media, two key biological molecules were analyzed quantitatively. The first one is glucose molecule, which is an essential element, especially for cell proliferation, whereas the other one is lactic acid produced by cells as a metabolic waste molecule during cultivation. Determination of amounts of glucose and lactic acid with respect to incubation time is a well-accepted method for monitoring cellular metabolic activities. The glucose consumption and lactic acid production levels of the cells encapsulated inside the macro-capsule were presented in Figure 3 (A and B, respectively) for 15 days of the incubation period. Samples collected from the incubation solution were analyzed by ADVIA® 1800 Clinical Chemistry System and compared with the results obtained from the 2D cell culture experiment as a control. Alterations in the glucose and lactic acid levels were observed in both 2D cell culture conditions and cells in macrocapsules. Results indicate that the prepared macro-capsules bear a porous architecture allowing the passage of molecules associated with metabolic activity while ensuring the viability of encapsulated living cells inside (A and B, respectively).

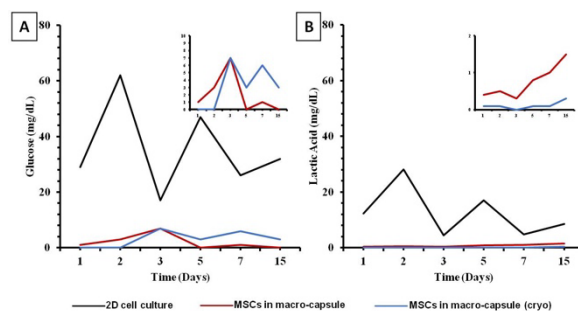


Figure 3. (A) Glucose consumption and (B) lactic acid production profiles of MSCs encapsulated in the macro-capsule.

3.2. Discussion

Mesenchymal stem cell (MSC) therapy has emerged as a highly effective method for the regeneration of damaged tissue and balancing the hormone level inside the body [1–4,19]. Proper isolation of the immune cells might provide ameliorated cell therapy to the patient. Encapsulation of MSCs might be an advantageous strategy for improving the cell survival rate and enhancing cell functioning after transplantation. So, this study aims to construct a polymer-based macro-capsule for the accommodation of cells in an isolated platform once implanted inside the body, which seems to contribute to the increased metabolic activity of the transplanted cell population. A synthetic, yet biodegradable and biocompatible polymer, PCL was utilized for the fabrication of the designed macro-capsule, and it was 3D bio-printed in fiber structure to have permeability ability for the exchange of nutrients reaching the cells inside and removal of waste products out. Obtained results point out that 3D printed PCL-based macro-capsule has enough permeability for the release of HSA, which might enable the proper transfer of albumin proteins inside out for the macro-capsule.

The designed macro-capsule with dimensions of 2x5x10 mm was a small macro-capsule when it's compared to the previously published macro-capsule versions [18]. That is why an injection of a small amount of material with a small-sized syringe needle (insulin syringe, 31 G) creates a big gap in it. The closed form of the macro-capsule might be boomed by gas pressure inside the macro-capsule during the injection of cell solution inside. In addition, the printed form of the macro-capsule contains only a two-layer height which is thin enough for possessing a good permeability property possible. After injection of the cell solution into the macro-capsule, the injection gap was filled with a melted form of PCL to prevent immediate cell release once the macro-capsule was dipped into the incubation solution [20]. The burst release profile is a major indication for showing the leakage formation of the macro-capsule. Leakage

assessment of capsule with HSA protein with a molecular weight of 66.5 kDa (Figure 1C) indicates that protein molecules can pass through the permeable surface of macro-capsule [21].

Although PCL is commonly used in polyester and synthetic polymer for the construction of scaffolds in tissue engineering applications, the major challenge is its cytotoxicity problem emerging from the formation of foreign body response (fibrotic response) when it is in direct contact with the cellular environment [22,23]. Our results show that there is no significant adverse effect of the 'indirect contact' method on the viability of MSCs for 72 hours of incubation time. Direct contact of the macro-capsule to cells has resulted in a slight decrease in a cell. These results suggest that the PCL-based macro-capsule platform might outstand as a convenient carrier of the transplantation of MSCs into the body without decreasing the cell viability significantly after the implantation of the cell-loaded macro-capsule.

The metabolic activity of the encapsulated cells which is intended to be used in protein therapy applications (in the near future) is important to monitor for the secretion of the intended protein at the target site in the body. So, the secretion and release of the metabolic products from inside to outside of the macro-capsule are crucially important for understanding its potential as a biomaterial for the regeneration of the target tissue or balancing of the protein level in the target area. Nutrient and oxygen transition during the cultivation of MSCs has a tremendous effect on cell viability and metabolic activity. In our study, the metabolic activity of encapsulated cells was analyzed by measuring the glucose consumption level and lactic acid production level inside the incubation medium [24]. Alterations in the glucose and lactic acid levels were monitored during the cell incubation process, where the glucose amount in the medium was measured to decrease by almost 10% by time in a newly refreshed media, compared to 2D cell culture conditions. On the other hand, the produced lactic acid was not seen in the medium at the beginning of the incubation process as expected, whereas demonstrated to emerge in the outer media and was detected to be increased in amount by approximately 8% compared to its 2D version at the end of 15 days of the incubation period.

3.3. Conclusions

In this study, polymeric macro-capsule (2x5x10 mm) constructs were fabricated using a polyester-based PCL polymer by an FDM-based 3D bio-printing technology and then analyzed for their different features like their protein release profiles, impact on metabolic activity of encapsulated cells

and *in vitro* cytotoxicity levels. A thin layer of porous macro-capsule was investigated for its permeability degree by release studies with different molecules such as trypan blue, and HSA. 98% of the protein was released from the permeable surface of the macrocapsule within 24 hours. Metabolic assessment and viability of cells inside the macro-capsule together with biomaterial toxicity was demonstrated that 3D printed porous macro-capsule platform might be a suitable carrier for patients' stem cell transplantation [7].

Declaration of conflicting interest

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Acknowledgement

This study has been supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) with project number 118C082 and 2244-Industry Doctorate Program. The authors would like to thank ACIBADEM LABCELL, the Humanitarian aid service in Turkey, for the generous donation of cryoprecipitate GFP-tagged MSCs in the prepared macro-capsules.

REFERENCES

- [1] Moshaverinia, A., Xu, X., Chen, C., Ansari, S., Zadeh, H. H., Snead, M. L., & Shi, S. (2014). Application of stem cells derived from the periodontal ligament or gingival tissue sources for tendon tissue regeneration. *Biomaterials*, 35(9).
- [2] Kook, Y. M., Kang, Y. M., Moon, S. H., & Koh, W. G. (2016). Bi-compartmental 3D scaffolds for the co-culture of intervertebral disk cells and mesenchymal stem cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 38.
- [3] Huebsch, N., Lippens, E., Lee, K., Mehta, M., Koshy, S. T., Darnell, M. C., Desai, R. M., Madl, C. M., Xu, M., Zhao, X., Chaudhuri, O., Verbeke, C., Kim, W. S., Alim, K., Mammoto, A., Ingber, D. E., Duda, G. N., & Mooney, D. J. (2015). Matrix elasticity of void-forming hydrogels controls transplanted-stem-cell-mediated bone formation. *Nature Materials*, 14(12).
- [4] Park, J. S., Shim, M. S., Shim, S. H., Yang, H. N., Jeon, S. Y., Woo, D. G., Lee, D. R., Yoon, T. K., & Park, K. H. (2011). Chondrogenic potential of stem cells derived from amniotic fluid, adipose tissue, or bone marrow encapsulated in fibrin gels containing TGF- β 3. *Biomaterials*, 32(32).
- [5] Krishnan, R., Alexander, M., Robles, L., Foster, C. E., & Lakey, J. R. T. (2014). Islet and stem cell encapsulation for clinical transplantation. *Review of Diabetic Studies*, 11(1), 84–101.

- [6] Desai, T. A., & Tang, Q. (2018). Islet encapsulation therapy — racing towards the finish line? *Nature Reviews Endocrinology*, 14(11), 630–632.
- [7] Saenz Del Burgo, L., Ciriza, J., Espona-Noguera, A., Illa, X., Cabruja, E., Orive, G., Hernández, R. M., Villa, R., Pedraz, J. L., & Alvarez, M. (2018). 3D Printed porous polyamide macrocapsule combined with alginate microcapsules for safer cell-based therapies. *Scientific Reports*, 8(1), 1–14.
- [8] O'sullivan, E. S., Vegas, A., Anderson, D. G., & Weir, G. C. (2011). *Islets Transplanted in Immunoisolation Devices: A Review of the Progress and the Challenges that Remain*.
- [9] An, D., Chiu, A., Flanders, J. A., Song, W., Shou, D., Lu, Y.-C., Grunnet, L. G., Winkel, L., Ingvorsen, C., Christophersen, N. S., Fels, J. J., Sand, W., Ji, Y., Qi, L., Pardo, Y., Luo, D., Silberstein, M., Fan, J., & Ma, M. (n.d.). *Designing a retrievable and scalable cell encapsulation device for potential treatment of type 1 diabetes*.
- [10] Evron, Y., Colton, C. K., Ludwig, B., Weir, G. C., Zimmermann, B., Maimon, S., Neufeld, T., Shalev, N., Goldman, T., Leon, A., Yavriyants, K., Shabtay, N., Rozenshtein, T., Azarov, D., Dianno, A. R., Steffen, A., De Vos, P., Bornstein, S. R., Barkai, U., & Rotem, A. (2018). *Long-term viability and function of transplanted islets macroencapsulated at high density are achieved by enhanced oxygen supply OPEN*. 8, 6508.
- [11] Weir, G. C., & Bonner-Weir, S. (1997). Perspectives in Diabetes Scientific and Political Impediments to Successful Islet Transplantation. In *Diabetes* (Vol. 46).
- [12] Pipeleers, D., Ziekenhuis Brussel, U., Gillard, B. P., & Strand, B. L. (2013). *(No Title)*. 56, 1605–1614.
- [13] Scharp, D. W., & Marchetti, P. (2014). Encapsulated islets for diabetes therapy: History, current progress, and critical issues requiring solution. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 67–68, 35–73.
- [14] Gabr, M. M., Zakaria, M. M., Refaie, A. F., Ismail, A. M., Khater, S. M., Ashamallah, S. A., Azzam, M. M., & Ghoneim, M. A. (n.d.). *Insulin-producing Cells from Adult Human Bone Marrow Mesenchymal Stromal Cells Could Control Chemically Induced Diabetes in Dogs: A Preliminary Study*.
- [15] Skrzypek, K., Groot Nibbelink, M., Van Lente, J., Buitinga, M., Engelse, M. A., De Koning, E. J. P., Karperien, M., Van Apeldoorn, A., & Stamatialis, D. (n.d.). *Pancreatic islet macroencapsulation using microwell porous membranes OPEN*.
- [16] Tomei, A. A., Villa, C., & Ricordi, C. (2015). Development of an encapsulated stem cell-based therapy for diabetes. *Expert Opinion on Biological Therapy*, 15(9), 1321–1336.
- [17] Vaithilingam, V., Evans, M. D. M., Lewy, D. M., Bean, P. A., Bal, S., & Tuch, B. E. (n.d.). Australian Foundation for Diabetes Research. *New South Wales*, 2.
- [18] Fobker, M. (2014). Stability of glucose in plasma with different anticoagulants. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 52(7), 1057–1060.
- [19] Ryan, E. A., Paty, B. W., Senior, P. A., Bigam, D., Alfadhli, E., Kneteman, N. M., Lakey, J. R. T., & Shapiro, A. M. J. (2005). Five-year follow-up after clinical islet transplantation. *Diabetes*, 54(7).
- [20] Kumar, P. V., & Jain, N. K. (2007). *Suppression of Agglomeration of Ciprofloxacin-Loaded Human Serum Albumin Nanoparticles*.
- [21] Giustarini, D., Dalle-Donne, I., Milzani, A., & Rossi, R. (2011). Low molecular mass thiols, disulfides, and protein mixed disulfides in rat tissues: Influence of sample manipulation, oxidative stress and ageing. *Mechanisms of Ageing and Development*, 132(4), 141–148.
- [22] Olabisi, R. M. (2014). The Authors. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 103, 846–859.
- [23] Maitz, M. F. (2015). Applications of synthetic polymers in clinical medicine. *Biosurface and Biotribology*, 1(3), 161–176.
- [24] Rivera Diaz, P. A., Gómez Camargo, D. E., Ondo-Méndez, A., & Gómez-Alegría, C. J. (2020). A colorimetric bioassay for quantitation of both basal and insulin-induced glucose consumption in 3T3-L1 adipose cells. *Heliyon*, 6(2).

Gri Sistem Teorisi ve Enerji Tüketim Modellemesinde Bir Uygulama

Grey System Theory and an Application in Energy Consumption Modelling

Sevcan DEMİR ATALAY¹ , Esra MAVİGÖZ² 

¹Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi İstatistik Bölümü, İzmir, Türkiye

²Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada GVMCT ile ifade edilen ve gri Verhulst modeline sabit terimin eklenmesi ile oluşturulan model üzerine çalışılmıştır. Bu modele ilişkin diferansiyel denklem çözülerek gri tahmin denklemi elde edilmiştir. Elde edilen tahmin denkleminin performansının değerlendirilmesi amacıyla enerji alanında bir uygulama çalışması yapılmıştır. Konut Sektörünün Tükettiği Toplam Enerji (TERS) ve Ticari Sektörün Tükettiği Toplam Enerji (TECS) değişkenlerine ilişkin veri setleri incelenmiştir. Veri setinin uygun olması nedeniyle ilgili değişkenler için hem zaman serileri analizi kullanılarak hem de gri modelleme (GM (1,1) modeli, Gri Verhulst Modeli ve GVMCT modeli) kullanılarak çeşitli tahmin denklemleri oluşturulmuştur. Elde edilen tahmin denklemlerinin performansı MSE, MAE ve RMSE performans ölçülerine göre kıyaslanmıştır. $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ başlangıç koşulu altında, TERS değişkeni için RMSE, MAE, MSE değerleri sırasıyla 711201.26, 721.37, 843.33, TECS değişkeni için RMSE, MAE, MSE değerleri sırasıyla 266685.55, 437.69, 516.42 elde edilmiştir. İki değişken içinde diğer modellerin performans kriterleri değerlerine göre daha küçük olması dolayısıyla önerilen GVMCT modelinin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Elde edilen tahmin denklemleri kullanılarak iki dönem için öngörü yapılmış ve gerçek değerler ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: GVMCT, GM (1,1), Gri Verhulst Modeli, Tahmin, Performans Ölçüleri

Abstract

In this study, the model created by adding the constant term to the grey Verhulst model called GVMCT has been studied. The grey estimation equation has been obtained by solving the differential equation of this model. In order to evaluate the performance of the obtained estimation equation, an application study has been carried out in the field of energy. Data sets related to Total Energy Consumed by the Residential Sector (TERS) and Total Energy Consumed by the Commercial Sector (TECS) variables have been examined. Due to the convenience of the data set, various estimation equations have been created for the related variables using both time series analysis and grey modeling (GM (1,1) model, Grey Verhulst Model and GVMCT model). The performance of the estimation equations obtained has been compared according to MSE, MAE and RMSE performance measures. Under the initial condition $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$, the RMSE, MAE, MSE values for the TERS variable have been obtained as 711201.26, 721.37, 843.33, respectively, and the RMSE, MAE, MSE values for the TECS variable have been obtained 266685.55, 437.69, 516.42, respectively. It is seen that the performance of the proposed GVMCT model is better because the performance criteria values of GVMCT model is smaller than the performance criteria values of the other models within the two variables. Forecasts have been made for two periods using the obtained estimation equations and compared with the actual values.

Keywords: GVMCT, GM (1,1), Grey Verhulst Model, Forecast, Performance Measures

I. GİRİŞ

Bilim, teknoloji ve insanlığın gelişmesi ile birlikte belirsizlik içeren sistemlere ilişkin çalışmalar yeni bir anlam kazanmıştır. 20. yüzyılın ikinci yarısında, sistem bilimi ve sistem mühendisliği alanlarında çeşitli teoriler ve belirsiz sistemlere ilişkin metodolojiler ortaya konulmuştur. Bu konuda L.A. Zadeh'in 1965 [1] yılındaki Bulanık Mantık Teorisi ve Julong Deng'in 1982 [2] yılındaki Gri Sistemler Teorisi önde gelen çalışmalardır. Bir bakımdan bu çalışmalar belirsiz bilgileri tanımlamak ve ele almak için kuram ve metodolojileri sağlar.

1982'de Julong Deng tarafından ortaya konulan Gri Sistem Teorisi, küçük örneklem ve zayıf bilgi içeren problemlerin incelenmesine odaklanan yeni bir yöntemdir. Bu teori az sayıda ve eksik verilerden yararlanarak bilgi sunmayı amaç edinmiştir. Bu özelliği ile de dikkatleri üzerine çekmektedir. Bu teorinin ortaya çıkışındaki temel düşünce stokastik veya bulanık yöntemlerle üstesinden gelinemeyen belirsiz sistemlerin davranışlarını, az sayıda veri ile tahmin etmektir. Küçük örneklem dayalı ve az bilgiye sahip belirsiz sistemler yaygın olduğundan gri sistem teorisi geniş uygulama alanlarına sahiptir. Gri sistem teorisi ortaya atıldığı günden bugüne endüstri, sosyal sistemler, ekolojik sistemler, ekonomi, trafik, yönetim, eğitim, çevre ve askeri gibi pek çok alanda başarı ile

Sorumlu Yazar: Sevcan DEMİR ATALAY, Tel: 02323115408, e-posta: sevcan.demir@ege.edu.tr

Gönderilme: 03.09.2022, **Düzenleme:** 21.03.2023, **Kabul:** 08.04.2023

uygulanmıştır [3]. Gri sistem teorisi alanında yapılan çalışmaları gri üretim, gri ilişki analizi, gri modelleme, gri tahmin, gri karar verme ve gri kontrol gibi başlıklar altında toplamak mümkündür [4].

Gri tahmin modelleri, az miktarda veri bulunması durumunda dahi belirsizlik içeren sistemlerin özelliklerini tanımlayabilme özelliği nedeniyle birçok tahmin ile ilgili uygulamalarda kullanılmıştır [5], [6], [7]. Ayrıca, az sayıda veri bulunması durumunda dahi uygulanabilirlikleri nedeniyle, gri tahmin modelleri diğer yöntemlere göre daha güvenilir, kullanıcı dostu ve pratik olduğu düşünülmektedir. İstatistiksel modellere benzer olarak gri tahmin modelleri de bir tahmin modeller topluluğudur. Bu modeller topluluğu içerisinde GM (1,1) modeli ön plana çıkmaktadır. GM (1,1) modeline ilişkin olarak model parametrelerinin optimize edilmesi ([8], [9]), hibrit GM (1,1) model önerileri ([10], [11], [12]), GM(1,1) model açılımları ([13], [14], [15]) ve farklı başlangıç koşullarının önerilmesi ([16], [17]) gibi farklı bakış açılarından birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada temel olarak gri tahmin modeli ve uygulaması üzerine bir çalışma yapılması amaçlanmaktadır. Çalışmada gri modelin girdisine katkıda bulunmak amacıyla gri Verhulst modeline sabit terim eklenerek bir model oluşturulmuştur. Modele ilişkin diferansiyel denklem çözülerek bir tahmin denklemi elde edilmiştir. Elde edilen tahmin denkleminin performansının belirlenebilmesi amacıyla enerji alanında bir uygulama çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Bilgi İdaresi tarafından hazırlanan Ocak 2020 Aylık Enerji Değerlendirmesi'nden elde edilen enerji tüketim veri seti kullanılmıştır. Bu veri setleri içerisinde iki tanesi bu çalışmada kullanılmıştır:

- TERS: Konut Sektörünün Tükettiği Toplam Enerji (Total Energy Consumed by the Residential Sector),
- TECS: Ticari Sektörün Tükettiği Toplam Enerji (Total Energy Consumed by the Commercial Sector).

Veriler 1949-2018 yılları arasındaki yıllık verilerden oluşmaktadır. Öncelikle bu değişkenler için zaman serileri analizi yapılarak uygun model denklemleri elde edilmiştir. Sonrasında değişkenler için uygun gri model (GM (1,1) modeli, Gri Verhulst Modeli ve önerilen GVMCT modeli) denklemleri oluşturulmuştur. Elde edilen tahmin denklemlerinin performansı, gerçek değerler ile denklemlerden elde edilen tahmin değerlerinin kıyaslanması ile ortaya konmaktadır. Bu amaçla ortalama hata kare (MSE, mean square error), ortalama mutlak hata (MAE, mean absolute error) ve karekök ortalama hata kare (RMSE, root mean square error) performans ölçüleri olarak belirlenmiş ve bu

ölçülere bağlı olarak modellere ilişkin kıyaslamalar yapılmıştır. İlgili yorumlar verilerek önerilen modelin performansı değerlendirilmiştir. 2019-2020 yılları için öngörü değerleri elde edilmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. GM(1,1) Modeli

Gri tahmin teorisi gri sistem teorisinin önemli bir yapıtaşıdır. GM (1,1) tahmin modeli, söz konusu tahmin teorisinin ana modelidir, yani kısıtlı miktarda veri (en az dört veya daha fazla) ile oluşturulan fakat bakıldığında yine de yüksek hassasiyetli önemi yadsınamayacak sonuçlar alabilen tek değişkenli birinci dereceden gri modeldir ([18], [19], [20], [21]). GM(1,1) üç temel adımdan oluşmaktadır: (1) Birikimli üretim işlemi (Accumulated Generation Operation (AGO)), (2) Gri modelleme, (3) Ters birikimli üretim işlemi (Inverse Accumulated Generation Operation (IAGO)). Bu modelin kurulumu aşağıda verilen adımlardan oluşmaktadır ([22], [23], [24]). Burada;

- $X^{(0)}$: orijinal veri dizisini
- $X^{(1)}$: kümülatif veri dizisini
- Z: ortalama serisini
- AGO: kümülatif işlem operatörünü
- IAGO: Ters kümülatif işlem operatörünü

göstermektedir.

Adım 1: $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, negatif olmayan, eşit zaman aralıklarında toplanmış ve en az dört veriden ($n \geq 4$) oluşan ham veri noktaları olsun. $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ dizisi ise k . elemanı $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, $k = 1, 2, \dots, n$ ile elde edilen birikimli üretim işlemi (accumulated generating operation) dizisini oluşturmaktadır.

Adım 2: Model parametreleri tahmin edilir. GM(1,1) modelinin gri fark denklemi (grey difference equation)

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir [5]. Burada $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$, $k = 1, 2, \dots, n$ ile tanımlanmaktadır. k 'nın değerleri (1) denkleminde

yerine konulduğunda elde edilen denklemler matris formunda $Y = Br$ şeklinde ifade edilebilir, burada

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix},$$

$$r = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}.$$

Yukarıda matris formu verilen denklemler çözülerek a ve b 'nin en küçük kareler tahminleri $\hat{r} = [\hat{a}, \hat{b}]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ ile elde edilir.

Adım 3: Zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir. $GM(1,1)$ 'in beyazlaştırılmış denklemi (whitening equation)

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (2)$$

şeklinde verilmektedir. $\hat{r} = [\hat{a}, \hat{b}]^T$ parametreleri (2) denkleminde yerine konulup çözüldüğünde

$$\hat{x}^{(1)}(t) = Ce^{-\hat{a}t} + \hat{b}/\hat{a} \quad (3)$$

zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir. Burada C bir sabittir. $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ başlangıç koşulu olarak seçilip, (3) denkleminde yerine konularak C değeri elde edilir. Dolayısıyla $\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(1)}(1) - \hat{b}/\hat{a}]e^{-(k-1)\hat{a}} + \hat{b}/\hat{a}$, $k = 2, 3, \dots, n, n+1, \dots$ zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir.

Adım 4: Bu adımda ham verilere ait uyumu yapılmış değerler ve tahmin değerleri elde edilir. $\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)$ ifadesi kullanılarak

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \left[x^{(1)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \right] (1 - e^{-\hat{a}}) e^{-\hat{a}(k-1)}, \quad k = 2, 3, \dots, n, n+1, \dots$$

sonucuna ulaşılır. $\hat{x}^{(0)}(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$) değerleri, uyumu yapılmış değerler (fitted values), $\hat{x}^{(0)}(k)$, ($k \geq n+1$) değerleri, tahmin edilmiş değerler (predicted values) olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Gri Verhulst Modeli

Verhulst Modeli aynı zamanda lojistik büyüme eğrisi olarak da karşımıza çıkmaktadır. Verhulst modeli genellikle belirli bir doygunluğa ulaşmış durumlarla süreçleri tahmin etmek ve tanımlamak için

kullanılmaktadır [25]. Verhulst Modeli'nin en yaygın olarak kullanıldığı alan insan popülasyonunun tahminlenmesine ilişkin çalışmalardır ve bu aynı zamanda modelin ortaya atılmasının temelini oluşturur. Genellikle karesel yapıdaki verilerle çalışılırken başarılı sonuçların elde edildiği Verhulst Modeli ilk olarak, Alman biyolog Pierre Francois Verhulst tarafından literatüre kazandırılmıştır [26].

Başlangıç fonksiyonuna ilişkin büyüme üstel olarak karşımıza çıkarken sonrasında doyumun başlamasına paralel olarak büyüme yavaşlar, belirli bir denge ve olgunluğa ulaşınca da durur. Verhulst Modelinin temel amacı, gerçek bir sisteme ilişkin tüm gelişmeyi bir sınıra ulaştırmaktır. Bu sayede model, belirli bir doygunluk bölgesi içeren S- eğrisi gibi bazı artan süreçlerin açıklanmasında etkin bir anlam taşır [27]. Bu modelin kurulumu aşağıda verilen adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$, negatif olmayan, eşit zaman aralıklarında toplanmış ve en az dört veriden ($n \geq 4$) oluşan ham veri noktaları olsun. $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ dizisi ise k . elemanı $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, $k = 1, 2, \dots, n$ olan birikimli üretim işlemi (accumulated generating operation) dizisini oluşturmaktadır.

Adım 2: Model parametreleri tahmin edilir.

Verhulst modelinin ikinci-dereceden gri fark denklemi

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^2 \quad (4)$$

şeklinde verilmektedir. Burada $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$, $k = 1, 2, \dots, n$ ile tanımlanmaktadır. k 'nin değerleri (4) denkleminde yerine konulduğunda elde edilen denklemler matris formunda $Y = Br$ şeklinde ifade edilebilir, burada

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} (z^{(1)}(2))^2 & -z^{(1)}(2) \\ (z^{(1)}(3))^2 & -z^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots \\ (z^{(1)}(n))^2 & -z^{(1)}(n) \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \end{bmatrix}.$$

Yukarıda matris formu verilen denklemler çözülerek a ve b 'nin en küçük kareler tahmin edicileri $\hat{r} = [\hat{a}, \hat{b}]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ ile elde edilir.

Adım 3: Zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir. Verhulst modelinin beyazlaştırılmış denklemi

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b(x^{(1)}(t))^2 \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu diferansiyel denklem Bernoulli diferansiyel denklemi olarak tanımlanmaktadır. $\hat{r} = [\hat{b}, \hat{a}]^T$ tahminleri (5) denklemine yerine konulup $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ başlangıç koşulu altında çözüldüğünde

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \frac{ax^{(1)}(1)}{bx^{(1)}(1) + (a - bx^{(1)}(1))e^{ak}} \quad (6)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, n, n + 1, \dots$ zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir.

Adım 4: Ham verilere ait uyumu yapılmış ve tahmin değerleri elde edilir. $\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k + 1) - \hat{x}^{(1)}(k)$, $k = 1, 2, 3, \dots, n, n + 1, \dots$ ile sonuca ulaşılır. $\hat{x}^{(0)}(k)$, ($k = 1, 2, \dots, n$) değerleri uyumu yapılmış değerler (fitted values), $\hat{x}^{(0)}(k)$, ($k \geq n + 1$) değerleri tahmin edilmiş değerler (predicted values) olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca $\hat{x}^{(1)}(n) = x^{(1)}(n)$ başlangıç koşulu alınarak çözüm yapılırsa

$$\hat{x}^{(1)}(k) = \frac{ax^{(1)}(n)}{bx^{(1)}(n) + (a - bx^{(1)}(n))e^{a(k-n)}}$$

sonucu elde edilir.

2.3. Sabit Terimli Gri Verhulst Modeli (GVMCT)

Klasik $GM(1,1)$ modeli birçok alanda uygulandığı ve zayıf bilgi ile tahmin problemlerinin çözümünde bir hayli başarı sağlamış olmasına rağmen, modelin tahmin doğruluğunu artırmak ve uygulama aralığını genişletmek için hala iyileştirmeye gereksinimi vardır. Gri girdinin optimizasyonu, klasik gri modelin doğruluğunu arttırmak için en önemli ölçülerden biridir [28]. Gri modelin girdisi geliştirilerek çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu modellerden bazıları aşağıdaki tabloda verilmiştir [28].

Tablo 1. Farklı Girdilerin Kullanıldığı Modeller: Literatürde var olan farklı gri modellerin ismi, notasyonu ve gri girdisi verilmektedir.

Gri Model	Notasyon	Gri Modelin Girdisi
Non-homogeneous grey model	NGM (1,1, k)	bk
Self-adapting intelligent grey model	SAIGM	$bk + c$
Grey model with time power	GM (1,1, t^α)	$bt^\alpha + c$
Exponential optimization grey model	EOGM	be^{at}
Grey model with full-order time power terms	FOTP-GM	$\sum_{i=0}^h b_i k^i, (h \geq 1)$
Grey Verhulst model	GVM	$b(x^{(1)}(t))^2$
Nonlinear grey Bernoulli model	NGBM	$b(x^{(1)}(t))^n$
Incomplete gamma grey model	IGGM	$b\gamma(\mu, t) + c$

Bu çalışmada Gri modelin girdisine katkıda bulunmak amacıyla aşağıdaki model denklemi göz önüne alınmıştır. Bu model gri Verhulst modeline sabit terimin eklenmesi ile oluşturulmuştur.

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b(z^{(1)}(k))^2 + c \tag{7}$$

Burada $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k - 1)$, $k = 1, 2, \dots, n$ ile tanımlanmaktadır. k 'nın değerleri yukarıdaki denklemde yerine konulduğunda elde edilen denklemler matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 & 1 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}.$$

Yukarıda matris formu verilen denklemler çözülerek a, b ve c'nin en küçük kareler tahmin edicileri $\hat{r} = [\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c}]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$ denkleminde elde edilir. Modele ait beyazlaştırılmış denklem (whitening equation)

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b(x^{(1)}(t))^2 + c \tag{8}$$

şeklinde yazılabilmektedir. Dolayısıyla $GM(1,1)$ modelinin ikinci-dereceden gri diferansiyel denklemi gözönüne alınmıştır. $\hat{r} = [\hat{a} \ \hat{b} \ \hat{c}]^T$ parametreleri son denklemde yerine konularak çözümlenerek zamana bağlı tahmin denklemi elde edilir. Bu diferansiyel denklemin çözümü [29]'da verilmektedir. Diferansiyel denklemin çözümünden elde edilen sonuç $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ ve $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=n} = x^{(1)}(n)$ olmak üzere iki farklı başlangıç koşulu için çözümlenerek zamana bağlı tahmin denklemi elde edilebilmektedir. Son olarak $\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k - 1)$ ifadesi ile de $\hat{x}^{(0)}(k)$, $k = 1, 2, \dots, n$ tahmin değerleri elde edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa aşağıdaki üç durum ortaya çıkmaktadır:

1. Durum: $\Delta = b^2 - 4ac > 0$ ise $X \in R$ ve K keyfi sabit olmak üzere genel çözümü

$$y(x) = \frac{1}{2a} \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac} + (b + \sqrt{b^2 - 4ac})Ke^{\sqrt{b^2 - 4ac}x}}{1 - Ke^{\sqrt{b^2 - 4ac}x}} \tag{9}$$

olup burada

$$K = \frac{(b - \sqrt{b^2 - 4ac} + 2ay_0)e^{-x_0\sqrt{b^2 - 4ac}}}{b + \sqrt{b^2 - 4ac} + 2ay_0}$$

dir ve

$$y(x) = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

ise tekil çözümdür.

2. Durum: $\Delta = b^2 - 4ac = 0$ ise $X \in R$, K_1 keyfi sabit olmak üzere genel çözüm;

$$y(x) = -\frac{b}{2a} + \frac{1}{-ax + K_1} \quad (10)$$

olup burada

$$K_1 = ax_0 + \frac{2a}{b + 2ay_0}$$

dir ve

$$y(x) = -\frac{b}{2a}$$

ise tekil çözümdür.

3. Durum: $\Delta = b^2 - 4ac < 0$ ise, $X \in R$ ve K_2 keyfi sabit olmak üzere genel çözüm

$$y(x) = -\frac{b}{2a} + \frac{\sqrt{-b^2 + 4ac}}{2a} \tan\left(\frac{\sqrt{-b^2 + 4ac}}{2}x + K_2\right) \quad (11)$$

olur ve burada

$$K_2 = -\frac{1}{2}x_0 + \sqrt{-b^2 + 4ac} + \arctan\left(\frac{b + 2ay_0}{\sqrt{-b^2 + 4ac}}\right)$$

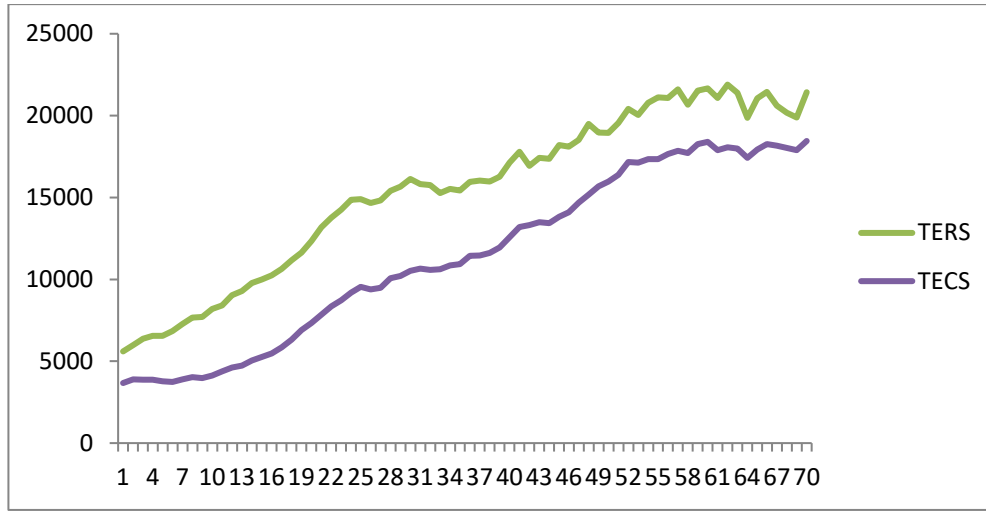
olur.

III. UYGULAMA

Ülkelerin enerji tüketim verileri, ileride oluşacak enerji taleplerini karşılamak için oluşturulacak enerji politikalarında büyük rol oynamaktadır. Doğru tahmin modelleri, enerji tüketim trendlerinin belirlenmesi ve enerji yatırımlarının planlanması için fayda sağlamaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında yapılacak uygulama çalışmasının enerji alanında olabileceği düşünülmüştür. Çalışma kapsamında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Bilgi İdaresi tarafından hazırlanan Ocak 2020 Aylık Enerji Değerlendirmesi'nden elde edilen enerji tüketim veri seti kullanılabilir durumdadır. Bu veri seti "British thermal unit" (Btu) cinsinden ABD'deki ticaret ve sanayi sektörleri tarafından tüketilen birincil ve toplam enerji tüketim miktarlarını içermektedir. Bu veri setleri içerisinde iki tanesi bu çalışmada kullanılmıştır. Veriler 1949-2018 yılları arasındaki yıllık verilerden oluşmaktadır. Kullanılan değişkenler şunlardır:

- **TERS:** Konut Sektörünün Tükettiği Toplam Enerji (Total Energy Consumed by the Residential Sector)
- **TECS:** Ticari Sektörün Tükettiği Toplam Enerji (Total Energy Consumed by the Commercial Sector)

Bu değişkenlere ait zaman yolu grafiği aşağıda verilmektedir:



Şekil 1. İki Değişken İçin Zaman Yolu Grafiği: TERS ve TECS değişkenlerinin 1949-2018 yılları arasındaki yıllık veri kullanılarak çizilmiştir.

Bu grafikten TERS ve TECS değişkenlerinin benzer yapıda oldukları ve yukarı yönlü bir trend eğiliminde oldukları söylenebilir. Bu iki değişken için hem klasik zaman serisi analizi ile uygun modeller belirlenmiş hem de çeşitli gri modellere uyum yapılarak değişkenin yapısına uygun gri modeller belirlenmiştir. İlgili

değişkenlerin yukarı yönlü bir trend eğiliminde olmaları nedeniyle bu iki değişken için hem doğrusal (lineer) hem de karesel (quadratic) trend için model uyumu yapılmış ve istatistiksel açıdan anlamlı model denklemleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İki Değişken İçin İstatistiksel Açıdan Anlamlı Model Denklemleri: TERS ve TECS değişkenleri için kurulan doğrusal ve parabolik trend denklemleri verilmektedir.

Doğrusal Trend denklemi	Parabolik trend denklemi
$\hat{Y}_{TERS_d} = 6967.957 + 237.193t$	$\hat{Y}_{TERS_p} = 4581.350 + 436.077t - 2.801t^2$
$\hat{Y}_{TECS_d} = 6967.957 + 237.193t$	$\hat{Y}_{TECS_p} = 1806.420 + 304.617t - 0.724t^2$

İlgilenilen değişkenlerin zaman yolu grafiği incelendiğinde bir trend yapısının varlığı göze çarpmaktadır. Bu durumda literatürde lineer trend yapısının varlığı durumunda en çok kullanılan gri model klasik GM (1,1)’dir. Bu nedenle ilgili değişkenlere ilişkin GM (1,1) modelleri elde edilmiştir. Ancak trend yapısının lineer olması yanında karesel formu da değerlendirilmelidir. Bu nedenle literatürde yer alan gri Verhulst modeline de uyum yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’ de verilmiştir.

Tablo 3. TERS ve TECS Değişkenleri İçin GM (1,1) ve Gri Verhulst Model Denklemleri: TERS ve TECS değişkenleri için GM(1,1) ve Gri Verhulst model denklemleri verilmektedir.

GM (1,1) model denklemleri	
TERS için	$x_p^{(1)}(k+1) = \left[5599,404 - \frac{9236,541}{(-0,014)} \right] e^{-(-0,014)k} + \frac{9236,541}{(-0,014)}$
TECS için	$x_p^{(1)}(k+1) = \left[3668,856 - \frac{5315,246}{(-0,021)} \right] e^{-(-0,021)k} + \frac{5315,246}{(-0,021)}$
Gri Verhulst model denklemleri	
TERS için	$x_p^{(1)}(k+1) = \frac{-0,059(5599,404)}{(-0,0000000394)(5599,404) + ((-0,059) - (-0,0000000394)5599,404)e^{-0,059k}}$
TECS için	$x_p^{(1)}(k+1) = \frac{-0,061(3668,856)}{(-0,00000005)(3668,856) + ((-0,061) - (-0,00000005)3668,856)e^{-0,061k}}$

Bu çalışmada önerilen Gri Verhulst modeline sabit terimin eklenmesi ile oluşturulan GVMCT modeline uyum yapılmıştır. Her bir değişken için bu modele uyumun detayları şöyle verilebilir: Öncelikle GVMCT modeline ilişkin tahmin denkleminin oluşturulabilmesi için 2.3. bölümünde detayları verilen matrislerin oluşturulması ve bu matrisler kullanılarak (7) denkleminin katsayılarının en küçük kareler yöntemi ile elde edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla TERS değişkeni için matrisler oluşturulduktan sonra (7) denkleminin katsayıları için $b = -0,00000001747940823991$, $a = -0,0315947155430396$, $c = 6684,84612360998$ değerleri elde edilmiştir. Çözümün detayları gereği b yerine a ve a yerine $(-b)$ kullanıldığından $a = -0,00000001747940823991$,

$$b = 0,0315947155430396,$$

$$c = 6684,84612360998$$

alınarak $\Delta = 0,00146561466790790$ ($\sqrt{\Delta} = 0,038283347$) elde edilmiştir. $\Delta > 0$ olduğundan (9) denklemi kullanılarak TERS değişkeni için $\hat{x}^{(1)}(k+1)$, $k = 1,2,3, \dots$ değerleri elde edilir. (9) denkleminde K keyfi sabittir ve değeri başlangıç koşuluna bağlı olarak hesaplanmaktadır. $\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$ ($\hat{x}^{(0)}(1) = y(x_0)$, $x^{(0)}(1) = y_0$), başlangıç koşulu altında $K = -0,10$ olarak hesaplanmıştır. $\hat{x}^{(0)}(k)$ serisinin değerleri $\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$ olmak üzere aşağıdaki IAGO işlemi ile elde edilmiştir.

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$$

Benzer şekilde TECS değişkeni için matrisler oluşturulduktan sonra (7) denkleminin katsayıları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$b = -0,00000002915793996,$$

$$a = -0,041778649,$$

$$c = 3247,872752$$

Benzer şekilde b yerine a ve a yerine $(-b)$ kullanıldığından

$$a = -0,00000002915793996,$$

$$b = 0,041778649,$$

$$c = 3247,872752$$

alınarak $\Delta = 0,00212$ ($\sqrt{\Delta} = 0,046089702$) elde edilmiştir. $\Delta > 0$ olduğundan (9) denklemi kullanılarak TECS değişkeni için $\hat{x}^{(1)}(k+1)$, $k = 1,2,3, \dots$ değerleri elde edilir. (9) denkleminde K keyfi sabittir ve değeri başlangıç koşuluna bağlı olarak hesaplanmaktadır. $\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$ ($\hat{x}^{(0)}(1) = y(x_0)$, $x^{(0)}(1) = y_0$), başlangıç koşulu altında $K = -0,049297954$ olarak hesaplanmıştır. $\hat{x}^{(0)}(k)$ serisinin değerleri $\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1)$ olmak üzere aşağıdaki IAGO işlemi ile elde edilmiştir.

IV. BULGULAR

4.1. Uygun Modellerin Performans Değerlendirmesi

Bu çalışmada iki değişken ile ilgili hem zaman serileri analizi hem de gri modelleme kullanılarak bir takım tahmin denklemleri elde edilmiştir. Bu tahmin denklemlerinin performansı gerçek değerler ile denklemlerden elde edilen tahmin değerlerinin kıyaslanması ile ortaya konmaktadır. Bu amaçla ortalama hata kare (MSE, mean square error), ortalama mutlak hata (MAE, mean absolute error) ve karekök ortalama hata kare (RMSE, root mean square error) ölçüleri performans ölçüleri olarak belirlenmiş ve bu ölçülere bağlı olarak kıyaslama yapılmıştır. Bu ölçüler aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2}{n}}, \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2}{n}$$

Burada n zaman periyodunu, y_i gözlenen değerleri ve \hat{y}_i ilgili modelden elde edilen tahmin değerlerini göstermektedir $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Bu performans ölçüleri her bir belirlenen tahmin modeli için elde edilmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. TERS Değişkeni İçin Performans Kriter Tablosu ($\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ Başlangıç Koşulu

Altında): TERS değişkeni için lineer ve parabolik trend denklemleri ile GM(1,1), Gri Verhulst ve GVMCT gri modellerine ait MSE, MAE ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.

	Lineer Trend	Parabolik Trend	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT
MSE	1547026,003	2702787	3027041,828	142553595,6	711201,2553
MAE	1004,623451	1281,799	1468,349424	11531,44185	721,3727193
RMSE	1243,795001	1644,0154	1739,839598	11939,58105	843,3274899

Performans ölçüleri hataya dayalı olarak hesaplandığından elde edilen değerlerin küçük olması istenir. Dolayısıyla TERS değişkeni için performans tablosu incelendiğinde tüm kriterlere göre (MSE, MAE, RMSE) önerilen GVMCT modelinin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Zaman

serisi modellerinden (lineer ve parabolik trend) lineer trend denkleminin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Gri modeller içerisinde (GM (1,1), Gri Verhulst ve GVMCT) Gri Verhulst modeli hep daha kötü bir performans göstermektedir.

Tablo 5. TECS Değişkeni İçin Performans Kriter Tablosu ($\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ Başlangıç Koşulu

Altında): TECS değişkeni için lineer ve parabolik trend denklemleri ile GM(1,1), Gri Verhulst ve GVMCT gri modellerine ait MSE, MAE ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.

	Lineer Trend	Parabolik Trend	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT
MSE	601309,1667	2702787	2447341,914	81403143,18	266685,5521
MAE	633,8923189	1281,799	1184,59042	8472,077807	437,6890676
RMSE	775,4412722	1644,0154	1564,398259	9022,369045	516,4160649

TECS değişkeni için performans tablosu incelendiğinde tüm kriterlere göre (MSE, MAE, RMSE) önerilen GVMCT modelinin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Zaman serisi modellerinden lineer trend denkleminin performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Gri modeller içerisinde (GM (1,1), Gri Verhulst ve GVMCT) Gri Verhulst modeli hep daha kötü bir performans göstermektedir.

İlgilenilen iki değişken içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca gri modele ait diferansiyel denklem belirli bir başlangıç koşuluna bağlı olarak çözülmektedir. Başlangıç koşulunun değiştirilmesi durumunda elde edilecek sonuçlar da farklı olmaktadır. Literatürde farklı başlangıç koşulu önerileri

bulunmaktadır. Başlangıç koşulunun tahmin denkleminin performansını ne kadar etkilediğinin görülebilmesi amacıyla $\hat{x}^{(1)}(k)|_{k=n} = x^{(1)}(n)$ başlangıç koşulu alınarak hesaplamalar tekrarlanmıştır. Değişkenlere ilişkin elde edilen performans kriter tabloları yeniden hazırlanmış ve TERS değişkeni için Tablo 6'da, TECS değişkeni için Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. TERS Değişkeni İçin İki Farklı Başlangıç Koşulu Altında Performans Kriter Tablosu:

TERS değişkeni için iki farklı başlangıç koşulu altında MSE, MAE ve RMSE değerleri hesaplanmış ve karşılaştırma tablosu oluşturulmuştur.

	$\hat{x}^{(1)}(k) _{k=1} = x^{(1)}(1)$			$\hat{x}^{(1)}(k) _{k=n} = x^{(1)}(n)$		
	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT
MSE	3027041,8	142553595,6	711201,26	102285356,00	4886151,507	709150,35
MAE	1468,349	11531,442	721,373	9478,099	1960,4168	711,3552
RMSE	1739,84	11939,581	843,327	10113,622	2210,464	842,111

Tablo 7. TECS Değişkeni İçin İki Farklı Başlangıç Koşulu Altında Performans Kriter Tablosu:

TECS değişkeni için iki farklı başlangıç koşulu altında MSE, MAE ve RMSE değerleri hesaplanmış ve karşılaştırma tablosu oluşturulmuştur.

	$\hat{x}^{(1)}(k) _{k=1} = x^{(1)}(1)$			$\hat{x}^{(1)}(k) _{k=n} = x^{(1)}(n)$		
	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT	GM (1,1)	Gri Verhulst	GVMCT
MSE	2447341,914	81403143,18	266685,5521	90573267,9412	1280607,0235	265323,4427
MAE	1184,59042	8472,077807	437,6890676	8569,039	959,24906	433,0486
RMSE	1564,398259	9022,369045	516,4160649	9516,998894	1131,639087	515,0955666

Tablo 6 ve Tablo 7 incelendiğinde yine önerilen GVMCT modelinin daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Ancak iki farklı başlangıç koşulu sonuçlarda büyük bir fark yaratmamaktadır.

Buraya kadar yapılan analizler incelenen değişkenlerin 1949-2018 yılları arasındaki yıllık verilerine

dayanmaktadır. Bundan sonraki iki dönem için çalışma kapsamında göz önüne alınan modellerden tahmin değerleri elde edilmiş, oluşan gerçek değerler ile birlikte Tablo 8 ve Tablo 9' da verilmiştir.

Tablo 8. TERS Değişkeni Tahmin Değerleri: Analiz 1949-2018 yılları arasındaki verilerden oluşmaktadır. Dolayısıyla TERS değişkeni için 2019 ve 2020 yılları için hem gerçek hem de öngörü değerleri verilmiştir.

	Gerçekleşen Değer	Lineer Trend	Quadratic Trend	GM (1,1)	Verhulst	GVMCT
2019	21068,989	23808,66	21422,976	24646,3038	13300,6546	20346,3836
2020	20803,162	24045,853	21458,51	24993,7787	13797,1051	20206,2345

Tablo 9. TECS Değişkeni Tahmin Değerleri: Analiz 1949-2018 yılları arasındaki verilerden oluşmaktadır. Dolayısıyla TECS değişkeni için 2019 ve 2020 yılları için hem gerçek hem de öngörü değerleri verilmiştir.

	Gerçekleşen Değer	Lineer Trend	Quadratic Trend	GM (1,1)	Verhulst	GVMCT
2019	18010,899	20401,032	19784,543	23207,8109	10646,1718	17954,037
2020	16762,815	20654,239	19985,628	23700,3282	11073,1943	17846,392

TERS ve TECS değişkenleri için önerilen GVMCT modeli oldukça iyi performans göstermiş ve 2019-2020 yılları için oldukça yakın öngörü değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

V. SONUÇ

Gri Sistem Teorisi, belirsizliğin ve eksik bilginin olduğu durumlarla ilişkilendirilen, stokastik veya bulanık yöntemlerle üstesinden gelinmeyen durumlarda belirsiz sistemlerin çıktılarını genel istatistik yöntemlerin yanı sıra sınırlı sayıda veri ile gerçeğe yakın tahminleme yeteneği ile dikkatleri üzerine çekmektedir [30]. Gri model ile ilgili çalışmalar incelendiğinde çoğu araştırmada kullanımına en sık rastlanan modelin GM (1,1) modeli olduğu görülmektedir. Bu model doğrusal trend yapısının varlığında doğru sonuçlar üretebilmektedir. Ancak, ilgilenilen veri yapısının doğrusal olmadığı durumlar ile çoğunlukla karşılaşmakta ve bu durumlar gerçeğe daha uygun görünmektedir. Dolayısıyla farklı veri yapılarına uygun modellere ilişkin tahmin denklemlerinin oluşturulması literatüre katkı açısından önemlidir. Bu bakış açısıyla bu çalışma doğrusal olmayan veri yapılarının modellenmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada günlük hayatta önemli bir yere sahip enerji alanında kullanılacak uygun gri model denklemleri elde edilmiştir. Enerji sektörü baz alınarak yapılan uygulamamızda iki farklı değişken ele alınmıştır. Bunlar;

- TERS (Konut Sektörünün Tükettiği Toplam Enerji),
- TECS (Ticari Sektörün Tükettiği Toplam Enerji),

TERS değişkeni için RMSE, MAE, MSE değerleri sırasıyla $(\hat{x}^{(1)}(k))|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ başlangıç koşulu altında 711201.2553, 721.3727193, 843.3274899 elde edilmiştir. Buna göre diğer modellerin performans kriterleri değerlerine göre küçük olması dolayısıyla önerilen GVMCT modelinin performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

TECS değişkeni için RMSE, MAE, MSE değerleri sırasıyla $(\hat{x}^{(1)}(k))|_{k=1} = x^{(1)}(1)$ başlangıç koşulu altında 66685.5521, 437.6890676, 516.4160649 elde edilmiştir. Buna göre diğer modellerin performans kriterleri değerlerine göre küçük olması dolayısıyla önerilen GVMCT modelinin performansının daha iyi olduğu görülmektedir.

Zaman serileri analizi yapabilmemiz için veri kümesinin oldukça geniş olması gerekmektedir. Bu çalışmada amaçlanan temel hedef, az veri ile çalışan gri sistem baz alınarak bir model geliştirmek, sonrasında geliştirilen bu modelin ilgili alana ilişkin sonuçların daha gerçekçi ve destekleyici olması açısından zaman serileri ile birlikte değerlendirerek en elverişli yöntemi belirlemektir. Bu nedenle çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda elde edilen denklemlerin performansı veri kümesi büyüklüğünün uygun olması nedeniyle zaman serisi analizi ile elde

edilen denklemlerle kıyaslanabilmiş ve elde edilen denklemlerin performansının yukarıda belirtildiği üzere iyi olduğu görülmüştür. Yani kullanışlı bir gri model geliştirildiği ifade edilebilir. Dolayısıyla, bu uygulama alanında ve veri kümesi büyüklüğünün sınırlı olduğu durumlarda kullanılabilir, iyi performans gösteren tahmin denklemi alternatifi bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Tüm bu detaylar çalışmanın önemini ortaya koymakta ve dolayısıyla verilen detaylar açısından konuya katkı sağlamaktadır.

GM(1,1) ve Gri Verhulst modeli uygulama alanında çokça kullanılan iki modeldir. Verhulst modelinin bir versiyonu diyebileceğimiz ve bu çalışmada kullanılan GVMCT modeli bundan sonraki çalışmalarda göz önünde bulundurulacak ve farklı uygulama alanları ile bu modelin kullanımının yaygınlaştırılması sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma FYL-2020-21749 numaralı Ege Üniversitesi BAP Lisansüstü Tez projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Zadeh, L. A., (1965). Fuzzy Sets., *Information and Control*, 8(3), 338 – 35, [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- [2] Deng J.L., (1982). Control-Problems of Grey Systems. *Systems & Control Letters*, 1, 288-294, 10.1016/S0167-6911(82)80025-X
- [3] Huang, T.L, Wen, K.L. ve Deng J.L., (1997). The Documents of Grey System Theory. *2nd National Conference of Grey Theory and Applications*, 1-32.
- [4] Aydemir, E., Bedir, F. ve Özdemir, G., (2013). Gri Sistem Teorisi Ve Uygulamaları: Bilimsel Yazın Taraması. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18(3), 187-200.
- [5] Deng J.L., (1989). Introduction To Grey System Theory. *J Grey Syst*, 1 (1), 1-24.
- [6] Aydemir, E., Bedir, F. ve Ozdemir, G., (2013). The Grey System Approaches for Demand Forecasting. *Journal of Trends in Development of Machinery and Associated Technology*, 17 (1), 105-108.
- [7] Ekincioglu, G., Akbay, D. ve Aydemir, E., (2022). Effects of the Covid-19 Pandemic on Turkish Natural Stone Industry: A Grey Forecasting Model. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (2), 520 – 531.
- [8] Tan L.Z., Ouyang A.J., Peng X.Y., et al., (2015). A Fast And Stable Forecasting Model To Forecast Powerload. *Int J Pattern Recogn Artifintell*, 29 (03), 1559-1564.
- [9] Lin Z, Zhang Q. ve Liu H., (2012). Parameters Optimization of GM (1, 1) Model based on Artificial fish swarm algorithm. *Grey Syst Theor Appl.*, 2(2), 166-177.
- [10] Wang ZX, Li Q. ve Pei LL., (2017). Grey Forecasting Method Of Quarterly Hydropower Production in China Based On A Data Grouping Approach. *Appl Math Model.*, 51, 302-316.
- [11] Lin YH, Chiu C.C, Lee P.C, et al., (2012). Applying Fuzzy Grey Modification Model On Inflow Forecasting. *Engappl Artif intell*, 25(4), 734-743.
- [12] Chang, C-J., Lin, J-Y. ve Jin, P., (2017). A Grey Modeling Procedure Based On The Data Smoothing Index For Short-Term Manufacturing Demand Forecast. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 23, 409-422.
- [13] Xie N. M. ve Liu S.F., (2009). Discrete Grey Forecasting Model and Its Optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 33(2), 1173-1186.
- [14] Ma. ve Liu Z.B., (2017). Application Of A Novel Time-Delayed Polynomial Grey Model To Predict The Natural Gas Consumption in China. *J Comput appl. Math*, 324, 17-24.
- [15] Yang, Y. ve Xue, D., (2016). Continuous Fractional-Order Grey Model and Electricity

- Prediction Research Based on the Observation Error Feedback. *Energy*, 115, 722-733.
- [16] Deng J.L., (2002). Basis On Grey System Theory. Wuhan. Huazhong University of Science and Technology Press.
- [17] Dang, Y.G. ve Liu, S.F., (2004). The GM Models That $X(N)$ Be Taken As Initial Value. *Kybernetes*, 33(2), 247-254.
- [18] Xie N. M. ve Liu S.F., (2009). Discrete Grey Forecasting Model and Its Optimization. *Applied Mathematical Modelling*, 33(2), 1173-1186.
- [19] Liu, S. ve Yi Lin., (2010). Grey Systems Theory and Applications, Springer -Verlag, Berlin Heidelberg, s. 391.
- [20] Mostafaei, H. ve Kordnoori, S., (2012). Hybrid Grey Forecasting Model for Iran's Energy Consumption and Supply. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2(3), 97-102.
- [21] Shen, X. ve Lu, Z., (2014). The Application of Grey Theory Model in the Predication of Jiangsu Province's Electric Power Demand, *AASRI Procedia*, 7, 81-87.
- [22] Akay, D. ve Atak, M., (2007). Grey Prediction With Rolling Mechanism For Electricity Demand Forecasting of Turkey. *Energy*, 32, 1670-1675.
- [23] Lin Z, Zhang Q. ve Liu H., (2012). Parameters Optimization of GM (1, 1) Model based on Artificial fish swarm algorithm. *Grey Syst Theor Appl*; 2(2), 166-177.
- [24] Wang, H. T., ve Mu, S. R., (2010). Study on the energy consumption structure and carbon emissions trend in Beijing. *Urban Studies*, 17(9), 55-60.
- [25] Es, H.A., (2020). Gri Tahmin Modelleri ile Toplam Enerji Talep Tahmini: Türkiye Örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. GÜFBED/GUSTIJ* 10 (3), 771-782.
- [26] Zeng, B., Li, C., Chen G. ve Zhang, W., (2013). Verhulst Model of Interval Grey Number Based on Information Decomposing and Model Combination. *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 472065, 8 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/472065>
- [27] Kayacan, E., Ulutas, B. ve Kaynak, O., (2010). Grey System Theory-Based Models in Time Series Prediction, *Expert Systems with Applications*, 37, 1784 -1789.
- [28] Zhang, P., Ma, X. ve She, K., (2019). Forecasting Japan's Solar Energy Consumption Using a Novel Incomplete Gamma Grey Model. *Sustainability*, 11, 5921.
- [29] Atalay, S.D., Çalış, G. ve Adıyaman M., (2022). An improved grey Verhulst model to forecast energy demand in the USA and Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*, 175(3), 154-164, <https://doi.org/10.1680/jensu.21.00085>
- [30] Liu, S. ve Lin, Y., (2006). Grey Information, Springer, Berlin Heidelberg, s.512.

Evaluation of potential environmental risks of graphene-based materials by examining the effect of rGO on the microbial activity of *P. Chrysosporium*.

Özgecan MADENLİ¹ , Ece Ümmü DEVECİ¹ 

¹Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Environmental Engineering, Niğde, Turkey

Abstract

Graphene has been used in various applications in many fields. In recent years, its annual output has reached one hundred tons. Graphene has shown great potential in analytics, medicine, electronics, energy, agriculture, and environmental remediation. With increasing applications and production, the environmental risks and hazards of graphene have increased public concern. It was a key issue in environmental risk assessments of graphene materials. Microbial degradation of graphene and graphene oxide and its degradation by fungi in the environment have been previously studied. However, reduced graphene oxide (rGO) was difficult to degrade by fungi, and there were limited studies on this subject. In this study, the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* was incubated with the culture system rGO for one week. The independent variables of microorganism concentration, pH, and rGO concentration were analyzed with the Box Behnken statistical method using response surface methodology. The potential environmental risks of graphene-based materials were assessed by examining the effect of rGO on the microbial activity of *P. chrysosporium*. The results revealed that rGO inhibited microbial activity during incubation and acted as an inhibitor in the medium. In addition, pH was found to be effective in inhibiting the environment, while microbial activity decreased at low pH. Moreover, *P. chrysosporium* was thought to degrade the oxygen groups on the rGO surface due to its decomposition ability. To test the environmental impact of graphene-based materials in general, it was aimed at unraveling the structure-activity relationships of the fungus *P. chrysosporium*.

Keywords: Reduced graphene oxide, White rot fungus, Box Behnken Design, Response surface methodology

I. INTRODUCTION

In recent years, rapid population growth, depletion of water resources, and drought have especially threatened clean and drinking water resources (Cordell et al., 2011). Owing to human influences, industrial activity, and natural activities, there was a lot of wastewater output. Due to the increasing pollution and scarcity of water, Nature magazine emphasized that "more than one trillion people in the world do not have access to clean water, and life is getting worse and worse" (Edokpayi et al., 2020). In particular, developing industries and wastewater with increasing production capacity polluted existing clean water resources. Therefore, it was important to treat wastewater before discharge. Existing physical (Fu and Wang, 2011), chemical (GracePavithra et al., 2019), and biological (Dodbibba et al., 2015) technologies were applied to remove contaminants from wastewater. However, the ineffectiveness of traditional treatment methods in the treatment of new generation pollutants led to the search for new treatment methods. Recent studies reported that the application of carbon-based nanomaterials is effective in wastewater treatment (Selvaraj et al., 2020). Nanomaterials could be defined as materials with a minimum external size ranging from 1 to 100 nm, while nanoparticles were defined as objects consisting of three external dimensions at a particular nanoscale (Rebello et al., 2021). Nanomaterials such as graphene, graphene oxide (GO), reduced graphene oxide (rGO), and carbon nanotubes were used in wastewater treatment. Graphene-based materials were applied in an integrated manner in physico-chemical (membrane, Fenton process, electro-Fenton process, photocatalysis, photoelectrocatalysis) methods (Madenli et al., 2021).

Carbon-structured materials such as graphene have demonstrated successful performance in the removal of pollutants from wastewater. However, it has been reported that it may pose a significant threat to the environment and human health if released into nature. (Yang et al., 2019). When released into the environment, they could interact with living organisms and enter living cells through penetration and endocytosis. Placing graphene inside the cell not only damaged the cell membrane of living things, but also

negatively affected the DNA helix structure (Zhao et al., 2014). When the ecotoxicity of graphene in fungi, algae, bacteria, and plant species was examined, it caused stress in nutrient environments and a decrease in oxidative chains. (Efremova et al., 2015; Hu et al., 2015). The viability potential of *E. coli* bacteria when exposed to GO and rGO was reported to be 69.3% and 47.4%, respectively. Liu et al., (2011). Begum et al., (2011) investigating the effect of graphene on plants, reported that they found damage to leaf cell lesions and cell membranes as a result of phytotoxicity symptoms when they examined cabbage, tomato, and spinach. Considering that this condition destroys cell structures and hinders the environment, graphene and its derivatives were predicted to be potentially toxic materials for the environment (Arvidsson et al., 2013).

White rot fungi (WRF) had an important role in the CO₂ balance in the world's carbon cycle. WRFs were unique microorganisms with their ability to degrade lignin and similar structures (Gao et al., 2010). WRF with this capability was preferred in the evaluation of the environmental impact of graphene since it was used in the separation of aromatic hydrocarbons in previous studies (Yang et al., 2019).

The aim of our study was to reveal the effect of rGO on potential microbial activity. *P. chrysosporium* was exposed to rGO at different concentrations to monitor media inhibition and microbial activity. The total protein amount was measured during *P. chrysosporium* incubation. How rGO affects microbial growth against microbial concentration and pH factors was investigated using the Box-Behnken design (BBD) under RSM with Design Expert 13.0. The model fit and significance of variables were evaluated by analysis of variance (ANOVA). The results clearly showed the concentration-dependent toxicity of rGO to *P. chrysosporium*. It has been observed that low doses of rGO reduce the effect of microbial growth. It was determined that the morphological structure was

2.3. Total Protein Analysis

The amount of protein formed in the incubation of *P. chrysosporium* with added rGO was calculated by the modified Lowry method. Solution A (2% (w/v) potassium sodium tartrate and 10% (w/v) Na₂CO₃) was added to the diluted sample. After the tubes were kept in a water bath set at 50 °C for 10 minutes, after cooling to room temperature, 0.1 mL of B (2% (w/v) potassium tartrate + 1% (w/v) CuSO₄.5H₂O + 4% (w/v) NaOH) solution was added. The solutions were kept at room temperature for 10 minutes. Then, 3 mL of C solution (Folin Ciocalteu diluted 1:15) was added, mixed and kept in a 50°C water bath for 10 minutes. After the tubes were cooled to room temperature, they were read against the Bovine serum albumin standard at 650 nm in UV-VIS spectroscopy.

deteriorating. Attention was drawn to the issue of ensuring the safety of graphene for living life.

II. MATERIALVE METHOD

2.1. Preparation of GO/rGO

The Modified Hummers Method (Hummers and Offeman 1958; Liu et al. 2011) was used to synthesize graphene oxide. This process recognized as being a quicker and more effective way to produce GO. The GO was first synthesized by oxidizing graphite flakes, and the next process involves reducing the GO to obtain rGO. The GO synthesis involved the use of graphite powder, sulfuric acid (H₂SO₄, 98%), potassium permanganate (KMnO₄), and hydrogen peroxide (H₂O₂, 30%). GO was converted into rGO using hydrazine hydrate, a reductant chemical (Stankovich et al., 2007).

2.2. *P. chrysosporium* Medium Composition

The *P. chrysosporium* strain used in this investigation were taken from the Nigde Omer Halisdemir University Environmental Microbiology Laboratory's culture collection. *P. chrysosporium* growing medium, Potato Dextrose Agar (PDA), was obtained from Merck and prepared in accordance with the directions on the PDA package. *P. chrysosporium* was cultured in a PDA plate for five days at 30 °C, and then it was used to inoculate 250 mL erlenmeyer flasks with 50 mL of stock basal medium, which was made by combining glucose (2 g/L) with other nutrients in Milli-Q water. The stock basal medium also included the following additional ingredients:

2 g/L peptone, 2 g/L KH₂PO₄, 0.1 g/L CaCl₂, 0.5 g/L MgSO₄.7H₂O, 0.001 g/L thiamine, and 1 mL/L trace elements. In 1 L of ultrapure water, 0.08 g of CuSO₄.5H₂O, 0.05 g of NaMoO₄.2H₂O, 0.07 g of MnSO₄.4H₂O, 0.043 g of ZnSO₄, and 0.05 g of Fe(SO₄)₃ were dissolved. After being placed into test tubes with cotton plugs, the solution was autoclaved at 121 °C (1.2 atm pressure) for 15 minutes.

2.4 RSM Experimental Design

The Box-Behnken design, which makes use of face points to highlight possible parameter interactions, minimizes the number of tests while maximizing total protein. That proves more useful than other approaches due to these properties. In this study, three independent variables were determined to the parameters that rGO has an effect on PC microbial activity. Independent variables were determined as pH, microorganism concentration and rGO. These three factors had been also studied by Box-Behnken Design (BBD). BBD contains 17 separate experimental sets. The experimental design was given in Table 1. The results of the experimental designs were analyzed and interpreted using the Design Expert statistical software (Design Expert version 13).

Table 1. Experimental design of Statistical model for incubation of *P. chrysosporium* and rGO

Standard	Order	rGO (mg/L)	Microorganism (%)	pH
1	4	0.05	2	5
2	17	0.15	2	5
3	6	0.05	10	5
4	10	0.15	10	5
5	2	0.05	6	4.5
6	11	0.15	6	4.5
7	14	0.05	6	5.5
8	13	0.15	6	5.5
9	9	0.1	2	4.5
10	1	0.1	10	4.5
11	15	0.1	2	5.5
12	16	0.1	10	5.5
13	8	0.1	6	5
14	7	0.1	6	5
15	3	0.1	6	5
16	5	0.1	6	5
17	12	0.1	6	5

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Box-Behnken Statistical Analysis via RSM

The design matrix was used by determining the minimum and maximum levels of the three independent variables of *P. chrysosporium* concentration (%), rGO concentration (mg/L), and pH. Total protein ratios in *P. chrysosporium* microbial activity ranged between 0.1 mg/L and 4.15 mg/L. The regression equation, which was an empirical relationship in coded form between the test variables for total protein values obtained from the three-level BBD matrix, is given below.

$$\text{Total protein} = +0,3948 - 0,0552A - 0,03681B + 0,6442C + 0,6595AB - 0,3620AC - 0,2914BC + 0,1431A^2 + 1,45B^2 - 0,0103C^2 + 0,0000ABC + 1,37A^2B - 0,6503A^2C + 0,5613AB^2 + 0,0000AC^2 + 0,0000B^2C + 0,0000BC^2 + 0,0000A^3 + 0,0000B^3 + 0,0000C^3$$

The model equation and accuracy were performed using ANOVA analysis of variance (Table 2). It was an analysis that breaks down elements found in sources of variation to determine the accuracy of hypotheses about the total variation in a data set and the variables of the statistical model. The statistical significance of the above equation was determined by the F value. In addition, the Model F value of 160.31 showed that the model was significant. In addition, the interactions of the independent variables with each other were interpreted with the p value. As seen in Table 2., the p value for the total protein value after incubation of *P. chrysosporium* with rGO was 0.0001. This value was important for the model. Because of P values less than 0.0500 showed that the model terms

were important. In this case, A, B, C, AB, AC, BC, A², B², A²B, A²C, AB² were important model terms. Values greater than 0.1000 showed that the model terms were not significant (Körbahti and Tanyolaç, 2008). In other words, it has been obvious that could be an important connection between the parameters and that the analyzed factors have been an impact on the total protein output. In determining the effect of rGO on *P. chrysosporium* microbial activity, the cubic model coefficient R² was obtained as 0.9979. These R² values were quite high. As in Fig 1, there was a good correlation between the actual and predicted values. Additionally, in Fig 1, the data points were straight lines, indicating the accuracy of the predicted and actual values. As a result, when the model and term coefficients were examined, the total protein result values showed high significance and conformity with the statistical model.

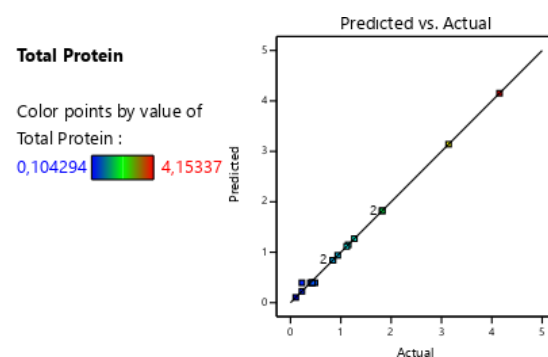


Figure 1. Correlation of actual versus predicted response for rGO incubation with *P. Chrysosporium*

Table 2. ANOVA variant analysis

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	18,94	12	1,58	160,31	< 0,0001	Significant
A.rGO	0,0122	1	0,0122	1,24	0,3281	
B. <i>P.chrysosporium</i>	0,5420	1	0,5420	55,06	0,0018	
um						
C.pH	1,66	1	1,66	168,63	0,0002	
AB	1,74	1	1,74	176,75	0,0002	
AC	0,5241	1	0,5241	53,24	0,0019	
BC	0,3397	1	0,3397	34,51	0,0042	
A ²	0,0862	1	0,0862	8,76	0,0416	
B ²	8,89	1	8,89	902,95	< 0,0001	
C ²	0,0004	1	0,0004	0,0454	0,8416	
ABC	0,0000	0				
A ² B	3,73	1	3,73	378,60	< 0,0001	
A ² C	0,8458	1	0,8458	85,93	0,0008	
AB ²	0,6302	1	0,6302	64,03	0,0013	
Pure Error	0,0394	4	0,0098			
Cor Total	18,97	16				
				R²	0,9979	
				Adjusted R²	0,9917	

3.2. Effect of Independent Variables

Three independent variables (microorganism concentration, pH and rGO concentration) were determined in the incubation of *P. chrysosporium* white rot fungus with rGO. Total protein analyzes were performed to test how independent variables affected microbial activity in incubation with rGO. The effects of independent variables on total protein results are given in 3D graphics in Fig 2.

pH, rGO concentration and *P. chrysosporium* spore concentrations were prepared according to BBD and taken into rGO and *P. chrysosporium* incubation medium. The effects of the parameters on the incubation environment were seen in the graphs given in Fig. 2. In Fig. 2a, the rGO concentration was 0.09 mg/L and the *P. chrysosporium* concentration was 2%, while the total protein amount was maximum 3.14 mg/L. Total protein production stopped when the rGO concentration reached the maximum (0.15 mg/L) and the *P. chrysosporium* concentration was 6%. In other words, as rGO increased, it inhibited the *P. chrysosporium* culture system. In addition, when the *P. chrysosporium* concentration reached 10%, the total protein value was 1.82 mg/L. This showed that the high amount of spores stressed the environment and stimulated growth. Xie et al., (2016) reported that 4 mg/mL graphene oxide stimulated growth and mass loss in culture in a 14-day incubation of *P. chrysosporium*.

In Figure 2b, the effect of rGO and pH on 2% *P. chrysosporium* concentration was determined. At pH 5.5 and concentration of 0.1 mg/L, the total amount of protein was 3.14 mg/L. As the pH increased, it was revealed that while the rGO concentration was at the optimum level, it partially affected the incubation environment. As the pH decreased and the rGO concentration increased, the medium became inhibited and total protein production ceased. Total protein analysis was also a parameter that allowed to have an idea about the enzymes of the microorganism. *P. chrysosporium* was known to contain a number of extracellular oxidative enzymes, oxidases and peroxidases. All experimental results indicated that rGO did not support the growth medium of the fungus by disrupting the enzyme structure of *P. chrysosporium*. Yang et al., (2019) observed an oxidation process by breaking down the oxygen groups on the surface of the *P. chrysosporium* fungus on the surface of rGO.

Fig. 2c showed the effects of pH and *P. chrysosporium* concentrations on protein production at 0.15 mg/L rGO concentration. When *P. chrysosporium* was at 10% spore concentration and pH 5, the total protein amount reached 4.15 mg/L. Maximum total protein value was observed at these parameter values. In microbial activities, pH was a factor determining the vital activity of the microorganism. Total protein production ceased as the pH decreased in the incubation media and the PC concentration decreased. Ming et al., (2018) examined the toxicity of carbon nanotubes to *P. chrysosporium* in their study, they reported that *P. chrysosporium* did not affect the growth environment when the pH increased from 4.5 to about 4.8. Yang et al., (2018) reported that when the effect of *P. chrysosporium* on rGO was examined, the incubation medium took an acidic state. They reported that this situation may be caused by microbial metabolism of *P. chrysosporium* and may lead to mass loss. The environment may become acidic due to the enzymes produced during the metabolomics activity of the fungus. While pH was found to be effective in the inhibition of the medium in our study, Ma et al., (2020) reported that pH was not effective in the toxicity of *P. chrysosporium* nanodiamond. Although different nanomaterials had inhibitory effect, the effect of parameters changed.

Nogueira et al., (2015) reported that when they examined the effect of GO in the green algae *Raphidocelis subcapitata*, algae growth was slowed and the toxic effect of GO was observed on algae density and autofluorescence. Akhavan and Ghaderi, (2010) examined the toxicity of graphene and the graphene oxide incubation with gram-positive bacteria *Staphylococcus aureus*, and reported that bacteria grew on the surface of graphene after 1 hour in the incubation medium and 5-13% of the bacteria survived. (Ma et al., 2020) investigated the effect of *P. chrysosporium* on another nanomaterial, nanodiamonds. In the results they obtained, they emphasized that the fibrous structure of *P. chrysosporium* micelles was disrupted, the cell wall and its damage were broken, and it also prevented the environment. In general, it can be said that nanomaterials inhibit microbial activity in vivo and act as inhibitors.

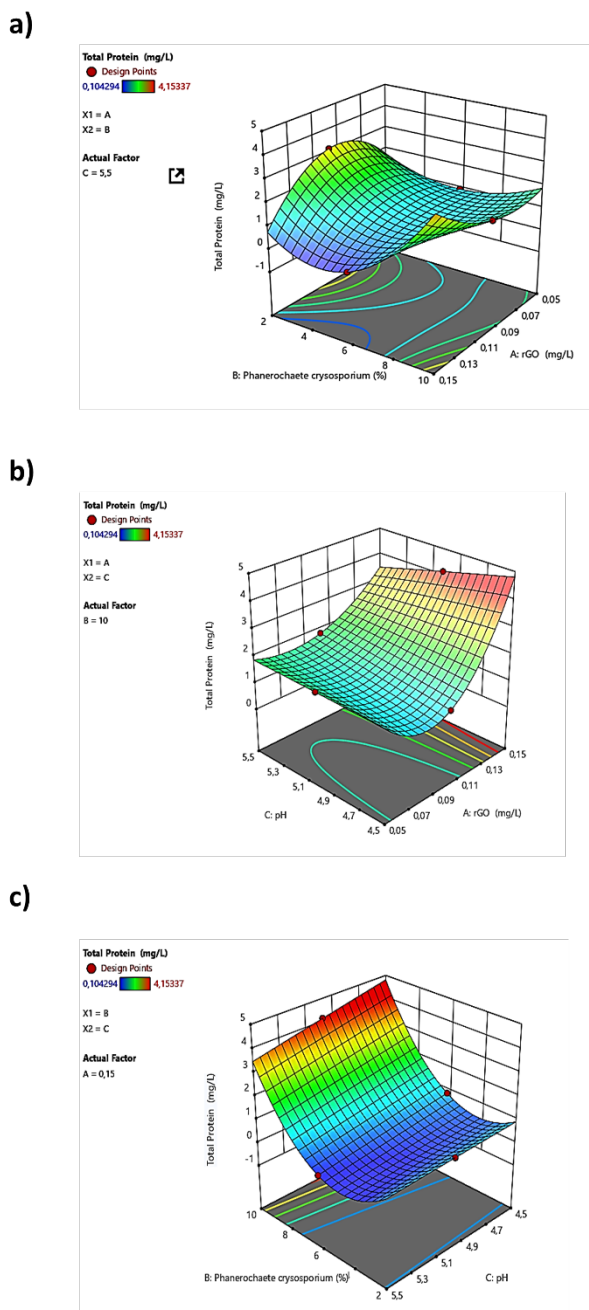


Figure 2. 3D response surface plots showing the effects of various parameters on *P. chrysosporium* microbial activity in rGO; a) *P. chrysosporium* and rGO concentration, b) pH and rGO concentration and c) *P. chrysosporium* concentration and pH

IV. CONCLUSION

As a result, rGO dose dependent toxicity of *P. chrysosporium* was evaluated. The maximum protein value was determined as 4.15 mg/L even at low rGO concentration. It was determined that the medium was inhibited and microbial growth was stimulated as the rGO concentration increased. Hyphae development was observed when the intermediate protein content

increased during microbial growth, and this was thought to affect the morphological structure. Total protein analyzes were also seen as a tool to have an idea about the enzyme production of the microorganism. *P. chrysosporium* was known to contain a number of extracellular oxidative enzymes, oxidases and peroxidases. It was thought that this situation might cause graphene to inhibit oxidative enzymes when present in aqueous environments and affect microbial activities in ecological systems. We hoped that our results would spark further interest in the ecotoxicology of graphene-based materials.

ACKNOWLEDGMENT

This work was funded by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with the project numbered 120Y087. As well, this study was derived by the Master of Science thesis of 'Formation and Determination of Characteristics The Graphite/Graphene Hyphae Structures With Mold Fungi' from Niğde Ömer Halisdemir University.

REFERENCES

- [1] Akhavan, O., Ghaderi, E., Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria. *ACS Nano* 4, 5731–5736, (2010).
- [2] Arvidsson, R., Molander, S., Sandén, B.A., Review of Potential Environmental and Health Risks of the Nanomaterial Graphene. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 19, 873–887, (2013).
- [3] Begum, P., Ikhtari, R., Fugetsu, B., Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon N. Y.* 49, 3907–3919, (2011).
- [4] Cordell, D., Rosemarin, A., Schröder, J.J., Smit, A.L., Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84, 747–758, (2011).
- [5] Dodbiba, G., Ponou, J., Fujita, T., Biosorption of heavy metals. *Microbiol. Miner. Met. Mater. Environ.* 409–426, (2015).
- [6] Edokpayi, J.N., Enitan-Folami, A.M., Adeyo, A.O., Durowoju, O.S., Jegede, A.O., Odiyo, J.O., Recent trends and national policies for water provision and wastewater treatment in South Africa. *Water Conserv. Wastewater Treat. BRICS Nations* 187–211, (2020).
- [7] Efremova, L. V., Vasilchenko, A.S., Rakov, E.G., Deryabin, D.G., Toxicity of graphene shells, graphene oxide, and graphene oxide paper evaluated with escherichia coli biotests. *Biomed Res. Int.* (2015).
- [8] Fu, F., Wang, Q., Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. Environ. Manage.* 92, 407–418, (2011).
- [9] Gao, D., Du, L., Yang, J., Wu, W.M., Liang, H., A critical review of the application of white rot

- fungus to environmental pollution control. *Crit. Rev. Biotechnol.* 30, 70–77, (2010).
- [10] Grace Pavithra, K., Jaikumar, V., Kumar, P.S., Sundar Rajan, P.S., A review on cleaner strategies for chromium industrial wastewater: Present research and future perspective. *J. Clean. Prod.* 228, 580–593, (2019).
- [11] Hu, C., Wang, Q., Zhao, H., Wang, L., Guo, S., Li, X., Ecotoxicological effects of graphene oxide on the protozoan *Euglena gracilis*. *Chemosphere* 128, 184–190, (2015).
- [12] Körbahti, B.K., Tanyolaç, A., Electrochemical treatment of simulated textile wastewater with industrial components and Levafix Blue CA reactive dye: Optimization through response surface methodology. *J. Hazard. Mater.* 151, 422–431, (2008).
- [13] Liu, S., Zeng, T.H., Hofmann, M., Burcombe, E., Wei, J., Jiang, R., Kong, J., Chen, Y., Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: Membrane and oxidative stress. *ACS Nano* 5, 6971–6980, (2011).
- [14] Ma, Q., Zhang, Q., Yang, S., Yilihamu, A., Shi, M., Ouyang, B., Guan, X., Yang, S.T., Toxicity of nanodiamonds to white rot fungi *Phanerochaete chrysosporium* through oxidative stress. *Colloids Surfaces B Biointerfaces* 187, 110658, (2020).
- [15] Madenli, Ö., Deveci, E.U., Gönen, Ç., Ağır Metal Gideriminde Grafen Uygulamaları Adsorpsiyon Teknolojisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.* 33, 151–159, (2021).
- [16] Ming, Z., Feng, S., Yilihamu, A., Yang, S., Ma, Q., Yang, H., Bai, Y., Yang, S.T., Toxicity of carbon nanotubes to white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 162, 225–234, (2018).
- [17] Nogueira, P.F.M., Nakabayashi, D., Zucolotto, V., The effects of graphene oxide on green algae *Raphidocelis subcapitata*. *Aquat. Toxicol.* 166, 29–35, (2015).
- [18] Selvaraj, M., Hai, A., Banat, F., Haija, M.A., Application and prospects of carbon nanostructured materials in water treatment: A review. *J. Water Process Eng.* 33, (2020).
- [19] Stankovich, S., Dikin, D.A., Piner, R.D., Kohlhaas, K.A., Kleinhammes, A., Jia, Y., Wu, Y., Nguyen, S.B.T., Ruoff, R.S., Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon N. Y.* 45, 1558–1565, (2007).
- [20] Xie, J., Ming, Z., Li, H., Yang, H., Yu, B., Wu, R., Liu, X., Bai, Y., Yang, S.T., Toxicity of graphene oxide to white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Chemosphere* 151, 324–331, (2016).
- [21] Yang, H., Feng, S., Ma, Q., Ming, Z., Bai, Y., Chen, L., Yang, S.T., Influence of reduced graphene oxide on the growth, structure and decomposition activity of white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *RSC Adv.* 8, 5026–5033, (2018).
- [22] Yang, H., Wu, X., Ma, Q., Yilihamu, A., Yang, S., Zhang, Q., Feng, S., Yang, S.T., Fungal transformation of graphene by white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Chemosphere* 216, 9–18, (2019).
- [23] Zhao, J., Wang, Z., White, J.C., Xing, B., Graphene in the aquatic environment: Adsorption, dispersion, toxicity and transformation. *Environ. Sci. Technol.* 48, 9995–10009, (2014).

QGIS ile Hidrolojik Model Oluşturma ve Meteorolojik Verilerin Zaman Periyotlarına Göre Değişimi: Kahramanmaraş Örneği

Determining Hydrological Model and Change of Meteorological Data According to Time Periods with QGIS: The Case of Kahramanmaras

Burcu ERCAN¹ , Mehmet ÜNSAL² 

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Öz

İklim değişikliği Türkiye ve dünyada önemli çevre konuları içinde yer almaktadır. Tüm dünyayı tehdit eden iklim değişikliğini belirlemeye yardımcı en önemli parametreler taşkın ve kuraklıktır. Kuraklığın ortaya çıkmasında sıcakların artması, yağışların azalması ya da ani ve şiddetli yağışlar etkili olmaktadır.

CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) yazılımları 2 ye ayrılmakta. Açık kaynak kodlu olan QGIS (Quantum Geographic Information System) ve ticari program olan Esri-ArcGIS 'dir. ArcGIS ile QGIS arasındaki farklılıklar anlatılarak, çalışmada yer alan modellerin; ArcGIS yerine, neden açık kaynak kodlu yazılım olan QGIS 'te modellendiği açıklanmıştır. QGIS (Quantum Geographical Information System); kullanıcılar tarafından mekansal analiz yapabilme, grafik haritaları oluşturma, bu verileri düzenleyebilme imkanları tanımaktadır. QGIS 'te Kahramanmaraş ilinin sınırları belirlenip, nehir ağı ve havza sınırları modellenmesinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

Bu çalışmada eğimin fazla olduğu Ahir dağı eteklerinde yer alan Kahramanmaraş ilinin 1970-2019 yıllarına ait meteorolojik verileri (sıcaklık ve maksimum yağış) incelenmiştir. Çalışmada kullanılan meteoroloji istasyonlarının verilerinin 10 yıllık periyotlar halinde zamana bağlı değişimi harita üzerinde "The Inverse Distance to a Power" (Ters Mesafe Güçlendirme) enterpolasyon yöntemi kullanılarak görselleştirilmiştir. Kahramanmaraş iline ait sıcaklık ve maksimum yağış değerlerinin enterpolasyon haritaları üzerinden zamana bağlı değişimi değerlendirilmiştir

Anahtar Kelimeler: Havza sınırı, Inverse Distance to a Power, Kahramanmaraş, TREx, QGIS. model

Abstract

Climate change is one of the important environmental issues in Turkey and in the world. The most important parameters that help determine the climate change that threatens the whole world are flood and drought. The increase in temperature, decrease in rainfall or sudden and heavy rains are effective in the emergence of drought.

GIS (Geographic Information Systems) software is divided into 2 programs. QGIS (Quantum Geographic Information System) which is open source and Esri-ArcGIS which is commercial program. Explaining the differences between ArcGIS and QGIS, it is explained why the models in the study are modeled in QGIS, which is open source software, instead of ArcGIS. QGIS (Quantum Geographical Information System) is an open source GIS (Geographic Information Systems) program; It allows users to make spatial analysis, create graphic maps and organize these data. It is explained how the borders of Kahramanmaraş province are determined and how the river network and basin boundaries are modelled in QGIS.

In this study, meteorological data (temperature and maximum rainfall) for the years 1970-2019 of Kahramanmaraş province, which is located on the slopes of Ahir Mountain, where the slope is high, were examined. The time-dependent variation of the data of the meteorological stations used in the study in 10-year periods was visualized on the map using the "The Inverse Distance to a Power" interpolation method. The time-dependent variation of temperature and maximum rainfall values of Kahramanmaraş province was evaluated through interpolation maps.

Keywords: Watershed boundary, Inverse Distance to a Power, Kahramanmaraş, TREx, QGIS.

I. GİRİŞ

Dünyadaki yaşam formları için büyük öneme sahip olan suyun, 1960 yılından günümüze yoğun bir biçimde önemli hidrolojik süreçlerinin mekan-zaman dinamiklerinin modellenmeleri yapılmaktadır. Coğrafi bilgi

sistemleri (CBS) araçları, mekansal bilgileri yönetmek, mekansal sonuçların işlenmesi ve görselleştirilmesini sağlamak için idealdir. CBS hidrolojik sistemlerin standartları ve yaygın uygulamaları kullanmalarını sağlar. Bu çalışmada modelleri analiz ederken ücretsiz ve açık kaynak kodlu Quantum GIS (QGIS) seçilmiştir. QGIS'in en önemli avantajı ise Python dilini kullanarak yeni eklentiler geliştirme kolaylığı ve hızıdır [1].

Genel olarak depremler istatistik ve hasar açısından en önemli doğal afet olmasına rağmen hava koşulları ve iklimle ilgili afetler özellikle sıcak hava dalgaları her zaman daha sık meydana gelmektedir. İklim değişikliği, doğal veya insan kaynaklı faaliyetler nedeniyle on yıllardan milyonlarca yıla kadar değişen sürelerde hava durumu modellerinin istatistiksel dağılımında önemli ve kalıcı bir değişikliktir. IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change) 'ye göre, "İklim değişikliği; iklim koşullarının ortalamasında ve/veya özelliklerindeki değişikliklerle tanımlanabilen (örneğin istatistiksel testler kullanılarak) ve genellikle on yıllar gibi ya da daha uzun bir süre boyunca devam eden" değişikliktir [2].

Belirli bir değişkenin uzamsal dağılımını karakterize etmek ve bu dağılımı haritalamak için yeterli sayıda gözlem gereklidir. Ancak dünyanın her yerinde veya belirli bir bölgede çevresel değişkenleri ölçmek teknik ve ekonomik olarak mümkün değildir [3]. Bu nedenle, çeşitli uzamsal interpolasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Uzamsal interpolasyon, bilinmeyen noktalardaki değerleri tahmin etmek için bilinen değerleri kullanma sürecidir. Geo-informatikte yaygın olarak kullanılan uzamsal interpolasyon iki temel kategoride incelenebilir: deterministik ve jeoistatistiksel teknikler. Deterministik interpolasyon yöntemleri yüzeyleri üretmek için örneklenmiş noktaları ve matematiksel denklemleri kullanırken, jeoistatistiksel yöntemlerde verilerin istatistiksel özellikleri kullanılarak tahminler yapılır [4]. Uzamsal interpolasyon, trend yüzey modelleri, Thiessen Poligonları (TP), Doğal Komşu İnterpolasyonu (NNI), Polinom İnterpolasyonu (PI), Ters Mesafe Ağırlıklandırması (IDW), Ters Mesafe Güçlendirme (Inverse Distance to a Power), Spline'lar ve Kriging dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımları kapsar. Bu çalışmada Inverse Distance to a Power yöntemi ile interpolasyon yapılmıştır.

Saha ve Islam [5], iklim değişikliğinin büyük problem olduğu sınırlı kaynaklara sahip Bangladeş için yaptıkları 1951 - 2010 yıllarını kapsayan günlük maksimum, minimum sıcaklık ve günlük yağış verilerini değerlendirmişler. Veriler Ters Mesafe Ağırlıklı (IDW), Kriging ve Yerel Polinom İnterpolasyonu gibi jeo-uzamsal interpolasyon teknikleri ile analiz edilmiş. Bunlardan Kriging yöntemi, minimum Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) göstererek, iklim parametrelerindeki değişiklikleri

belirlemeye uygunluğu kanıtlanmış. Kriging enterpolasyonu sonucu maksimum sıcaklıkların arttığı, minimum sıcaklıkların azaldığı görülmüş ve iklim değişikliği kanıtı kabul edilmiş.

Yu vd. [6], çalışmalarında bina enerji tasarrufunu sağlayan tasarımlar için bina alanlarının termal ortamlarının kapsamlı anlaşılması gerektiğinden yola çıkarak; mekansal sıcaklık dağılım haritası oluşturmak için noksal ölçümler ile uzaysal enterpolasyonu birleştiren bir yöntem önermişler. Her ölçüm noktası için 11 enterpolasyon yöntemi denenmiş bunların ortalama hata kare kökleri - RMSE (Root Mean Square Error) karşılaştırılmış ve en küçük hataya sahip olan yöntemin "Ters Mesafe Güçlendirme" (IDP) olduğu tespit edilmiş. Bu sebeple mekansal tasarım ve güçlendirme için sıcaklık dağılım haritası IDP ile oluşturulmuş.

Bir QGIS aracı, iklim parametrelerindeki değişiklikleri izlemeye yardımcı olabilir ve bir bölgenin değişen iklimi hakkında bilgi sağlayabilir. QGIS, veriler arasındaki ilişkileri, modelleri ve eğilimleri anlamak için verileri görselleştirmeye, sorgulamaya, analiz etmeye ve yorumlamaya yardımcı olan bir bilgisayar sistemidir.

Bayer Altın ve Barak [7], yaptıkları çalışmada 1970 ve 2009 yılları arasında Seyhan havzasında yer alan istasyonların meteorolojik verilerini analiz etmiş, değişimlerini ve eğilimlerini yorumlamışlar. Yağışlardaki azalış ve sıcaklıklardaki artış eğilimleri bu şekilde devam ederse Elbistan 'ın gelecekte yarı-kurak iklim tipinden, kurak iklim tipine geçiş göstereceğini belirtmişlerdir. Kahramanmaraş istasyonu verilerinin ise gelecekteki çölleşme sürecinden daha az etkileneyeceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, istatistiksel bir dağılım yöntemi kullanılarak 1970-2019 dönemi için ortalama sıcaklık ve maksimum yağış olmak üzere iki önemli iklim parametresindeki değişiklikleri belirlemek için enterpolasyon haritalaması için QGIS kullanılmıştır. Bu çalışma aynı zamanda iklim parametrelerindeki değişimleri etkin bir şekilde izlemek için kullanılabilecek en uygun jeo-uzamsal interpolasyon tekniğini de belirlemiştir. İklimdeki değişikliğin gözlemlenebilmesi için en iyi enterpolasyon yöntemlerini kullanarak mekansal yağış ve sıcaklık değişiminin belirlenmesi hayati önem taşımaktadır.

II. ÇALIŞMA ALANI

Kahramanmaraş şehri, Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde yer almaktadır. Şehir Ahır Dağı'nın eteklerinde yer aldığı için şehir merkezi engebeli bir araziye sahiptir. İl 14.350 km² yüzölçümüne ve 568 m rakıma sahiptir. Kahramanmaraş'ta krater gölleri ve Kumasir gölü dışında göl bulunmamaktadır. Ancak Ceyhan nehrinin kolları üzerinde Kartalkaya,

Menzelet, Sir Ayvalı, Kılavuzlu ve Adatepe barajları bulunmaktadır.

Değişken bir iklime sahip olmasına rağmen genel olarak Akdeniz iklimi hakimdir. Serin mevsim Kasım ve Mart ayları arasındadır. Kahramanmaraş'ta yağışlı mevsim Ekim'den Mayıs'a kadardır ve en fazla yağış Şubat ayında düşer. Kuru dönem Mayıs'tan Ekim'e kadardır. Günlük toplam en yüksek yağış 1989 yılında 98,2 mm, en yüksek sıcaklık 2007 yılında 45,2 °C ve en düşük sıcaklık 1997 yılında -9,6 °C olarak ölçülmüştür [8].

III. YÖNTEM VE VERİLER

3.1. TREx Verisi

Bir sayısal yükseklik modeli (SYM) yeryüzünün sürekli bir biçimde değişen topografik yüzeyini 3 boyutlu gösteren bir yapıdır. Bu model, 3 boyutlu uygulamalar için genel bir veri kaynağıdır. Sayısal yükseklik modeli, raster veri özelliğinde olup bir arazi yüzeyini en iyi temsil eden düzenli/düzensiz aralıklarla yapılmış çok sayıda yükseklik ölçümünden oluşmaktadır. Kısaca, her bir pikselin yükseklik (kot) değerine sahip olan sürekli yüzeylere dönüştürülmesidir. SYM bitki örtüsü ve insan yapımı detayları da içeren bir veridir.

Bu çalışmada kullanılan Kahramanmaraş ili SYM12 TREx verisi, Harita Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Harita Genel Müdürlüğü'nün 2016 yılında Uluslararası TanDEM-X Yüksek Çözünürlüklü Yükseklik Verisi Değişim Programı (TREx) projesine dahil olması ile üretilmiş olduğu SYM12 TREx verisi kullanılmıştır. 33 ülkenin dahil olduğu projenin 10 yılda tamamlanması planlanmaktadır. Airbus firması ile birlikte yürütülmekte olan projede TREx SYM modellerinin, ABD Ulusal Konumsal İstihbarat Ajansı ve Almanya Askeri Haritacılık Kurumu tarafından yapılan analizler sonucunda ± 2 göreceli yükseklik ve ± 4 mutlak yükseklik doğruluğuna sahip oldukları tespit edilmiştir. Proje sonunda Türkiye tüm dünyanın yüksek çözünürlüklü SYM verilerine sahip olacaktır. SYM12 TREx verisi, 3 boyutlu yüzey modeli olan SYM üzerinde bulunan insan yapımı detaylar, very içermeyen alanlar ve bitki örtüsünün proje çalışanları tarafından grid kontrolleri yapılarak, düzenlemeler yapılması sonucu elde edilmekte olup, verinin çözünürlüğünü ve kalitesini arttırmaktadır [9].

3.2. QGIS

QGIS yazılımı vektör, raster ve ağ katmanlarını desteklemektedir. QGIS paket program olmayıp, açık kodlu yazılım olduğundan ücretsiz bir uygulamadır ve geliştirilebilir özelliğe sahiptir. Çalışılacak projeye başlamadan önce hangi programın kullanılacağına karar vermek için ikisi arasında ki farkların incelenmesi gerekir. Maliyet ve farklar göz önünde bulundurularak bir seçim yapılabilir.

ArcGIS için lisans ücreti bir kurum ya da proje kapsamında ödenmiyorsa kişisel olarak maliyetli

olabileceği söylenilebilir. Bir proje kapsamında veya ticari amaçla kullanılıyorsa bu kuruluş ile ilişkiniz kesildiğinde programa erişim mümkün olmayacaktır. Bunun yanında QGIS 'in bir lisans maliyeti yoktur.

Doktora tezi, akademik yayın ya da eski sürümde modellenmiş bir çalışmayı düzeltebilmek veya kontrol edebilmek için aynı anda iki sürüm kullanılması gerekebilir. Bu durumlarda QGIS aynı anda bir bilgisayarda 2 farklı sürüm olarak yüklü olabileceğinden, çalışmanın yapıldığı versiyon yüklü olması durumunda burada açılmasına izin verir. Fakat ArcGIS 'in yalnızca bir sürümü, bir bilgisayara yüklenir. Birden fazla sürüm yüklenmesi durumunda çalışmaz hata verir.

ArcGIS programını kurup kullanabilmek için kullanıcının Windows veya Linux işletim sistemine sahip olması veya farklı işletim sistemlerinin aynı anda kullanılmasını sağlayan uygulamaların kullanılmasına ihtiyaç duyulur. QGIS yazılımı Windows, MacOS, Linux ve Android uyumludur. Fakat Android işletim sistemlerinde sınırlı kullanım ile karşılaşılabilmektedir.

ArcGIS farklı kategorilere ait oldukça geniş araç seçeneklerine sahiptir. Kullanıcı açısından oldukça avantajlı olmasına rağmen tek dezavantajı bu araçları kullanabilmek için lisanslarının satın alınması gerekmektedir. Bu durum çalışmanın maliyetini çok fazla arttırabilir ya da kısıtlı araçlarla yapılan model ve yorumlar yapılmak zorunda kalınabilir. QGIS ise sınırlı araç seçeneklerine sahip olmasına rağmen açık kod yazılımlı olmasının avantajı olarak her geçen gün araştırmacıların ve geliştiricilerin yazdığı yeni kodlar sayesinde yeni araçlar eklenmeye devam etmektedir. En önemli ve en çok kullanılan araçlar yazılıma ekli olarak arayüzünde yer almaktadır. Bu sebeple hazırda bulunan araçların kullanımı yeterli olabilir ve muhtemelen başka bir araca ihtiyaç duyulmasına gerek kalmayacaktır. Ya da kişi kendi kodlarını yazarak istediği aracı oluşturup kullanabilir [10]. Ayrıca QGIS 'te mevcutta ki bir kaynak kodu kullanıcı ya da geliştirici tarafından değiştirilebilir ya da geliştirilebilir.

ArcGIS 'te kullanılacak dosya formatları sınırlı iken, QGIS neredeyse her dosyayı çevirip kullanma imkanı tanımaktadır.

ArcGIS 'in verileri işleme süresi QGIS 'ten daha fazladır.

ArcGIS uzamsal topolojik analitik alanda daha güvenilir sonuçlar vermektedir ve Arc Map 'in cluster tolerans değeri 0.0000009 ile sınırlıdır.

Veri girişi yapılırken ArcGIS 'te tam sayı, reel sayı ya da metin olarak veri girişi yapılabilir. Fakat QGIS 'te

yalnızca ondalıklı sayı, tam sayı ya da metin verileri girişi yapılabilir. Verilerin kabul edilen formatta olması gerekmektedir, değilse dönüştürme işlemine ihtiyaç duyulur.

ArcGIS verilerin nasıl işlenip, araçların nasıl etkin ve kolayca kullanılabileceğini gösteren iyi bir kılavuz belgesine sahipken QGIS 'in kullanımında karışıklıklar yaşanabilmekte ve ayrıntılı anlatıma sahip çok iyi bir dokümana sahip değildir.

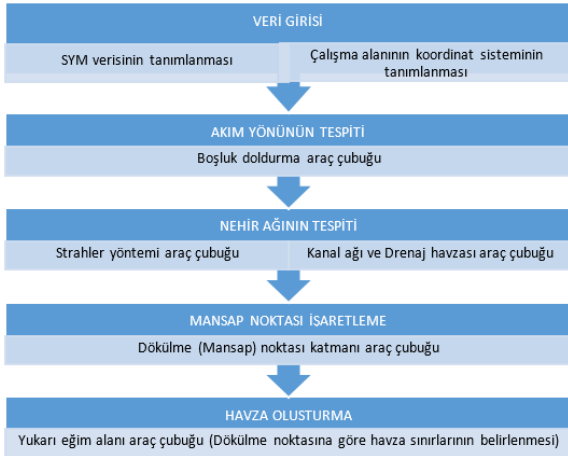
ArcGIS 'e cep telefonundan ulaşımın sağlandığı bir uygulama bulunurken, QGIS yalnızca masaüstü yazılımı olarak kullanılabilir.

ArcGIS, Maplex gibi birçok gelişmiş haritalama işlevine sahiptir. QGIS 'te oluşturulan haritalara farklı veriler eklenemez ya da bağlanamaz.

ArcGIS 'te veri depolama sistemi küçük projeler ve şekil dosyaları için iyi olan Geodatabase 'e dayanırken, QGIS 'te büyük veri dosyalarında da çok iyi çalışan PostGIS vardır.

Raster hesaplama aracı her iki programda da bulunmakta olup, ArcGIS 'te Cebir, istatistik, bölgesel araç setleri ve daha fazlasını kullanırken QGIS trigonometri ile birlikte cebir kullanır.

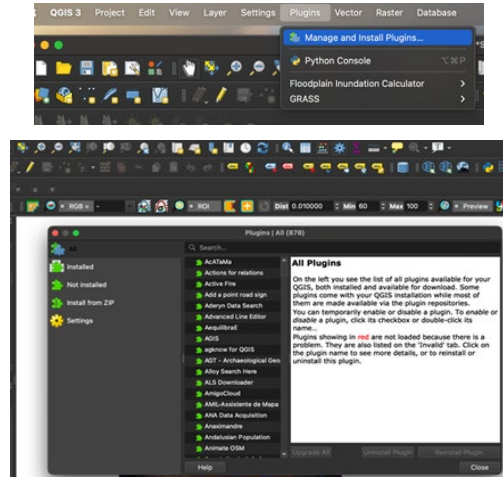
Bu çalışmada yapılmak istenilen hidrolojik model ile 10 yıllık periyotlar halinde Kahramanmaraş ili özelinde yağış ve sıcaklık verilerinin değişimlerinin incelenmesi için izlenmesi gereken yol haritası aşağıda (Şekil 1 'de) verildiği gibidir.



Şekil 1. QGIS ile havza modellemesinde izlenmesi gereken adımlar.

QGIS programının bilgisayara kurulabilmesi için öncelikle Python kurulumu gerekmektedir. Windows işletim sistemine sahip bir kullanıcı ek olarak "OSGeo4W ağ yükleyicisi" (OSGeo4W Network Installer) kurarak araç çubuklarının otomatik indirilmesinde kolaylık yaşayabilmektedir. Fakat diğer işletim sistemleri için araç çubuklarının indirilmesinin manuel yapılması gerekmektedir. Bu işlem

"Eklentiler" (Plugins) menusunun altında yer alan "Yönetme ve Eklenti kurulumu" (Manage and Install Plugins) seçeneği (Şekil 2 'de görülen) açıldığında gelecek sayfa yardımı ile yapılabilmektedir.

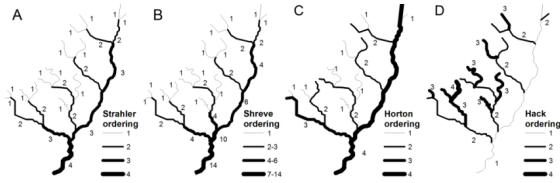


Şekil 2. Araç çubuklarının indirilmesini sağlayan "Yönetme ve Eklenti kurulumu"(Manage and Install Plugins) aracı.

CBS 'ye hidrolojik ve/veya su kaynakları alanlarında modelleme programlarının hesap yöntemleri adapte edildiği için, birçok çalışma yapılabilmektedir [11]. Uygulama alanının sayısal harita modelinin yapılması bu işlemlerin ilk basamağı olmaktadır. SYM, [12] internet sitesinden (buradan indirilen sayısal haritalar 30 m çözünürlükte olmaktadır) ya da [13] sitesinden (12.5 m çözünürlüğe sahip ve Türkiye'nin bir kısmı mevcut) ücretsiz indirilebileceği gibi, Harita Genel Müdürlüğü'nden satın alınabilir. Bu çalışmada yüksek çözünürlüğü ve düzeltilmiş veri olan SYM12-TREx verisi kullanılmıştır. Sayısal veri üzerinde 3-D bir görüntü oluşturabilmek ve arazi yapısı hakkında bilgi sahibi olabilmek için eğim (slope), yükseklik (elevation), tepe gölgesi (hillshade) modellenmiştir.

QGIS 'te açılan TREx verisinin projeksiyon işlemi yapıldıktan sonra sayısal veri üzerinde bulunan hataların düzeltilmesi için "Boşluk doldurma" (Fill and Sink) işlemi yapılır. Boşluk doldurma; SAGA araç çubuğunda yer almakta olup, sayısal veri üzerinde yer alan ızgaralardaki (grid'lerdeki) akımın depolanmadan iletilmesi için yükseklik veya çukur gibi düzensizliklerin giderilmesini sağlamaktadır.

Akarsu kollarının oluşturulması için derecelendirilmesi gerekmektedir. Gravelius, drenaj ağlarını sınıflandırmayı ilk öneren kişidir [14,15]. CBS yazılımlarında yer alan en yaygın sıralama yöntemleri Strahler yöntemi [16,17] ve Shreve yöntemidir [18]. Bu yöntemlere ek olarak, Horton yöntemi, [19] ve [14] tarafından önerilen normal akış hiyerarşisi gibi Hack'in ana akışları olarak da bilinen diğer bir yöntem daha vardır [15] (Şekil 3).



Şekil 3. Strahler, Sheve, Horton ve Hack ağ derecelendirme yöntemleri [20].

Bu çalışmada Strahler yöntemi kullanılmış olup Strahler order değeri 12 olarak bulunmuştur. QGIS ‘te çok küçük kolları ihmal etmek için ”raster calculator” komutu kullanılarak 3 ‘ten ya da 4 ‘ten büyük kolları akarsu olarak kabul et komutu girilebilir [21]. Nehir ağının belirlendiği projede bir sonraki aşama Havza ve alt havza sınırlarının oluşturulması işlemidir. Bu işlem program tarafından en fazla su toplanan noktanın havza çıkış noktası kabul edilmesi ile gerçekleşmektedir. Eğer mansap noktası belli olan bir bölgede yada herhangi bir mansaba göre bir havza oluşturmak istenirse; mansap (pour point) işaretlenir ve “Yukarı eğim alanı” (Upslope Area) komutu ile sistemin bu noktaya göre çizim yapması sağlanır.

3.3. Izgara - Ters Mesafe Güçlendirme (Grid - Inverse Distance to a Power)

Kahramanmaraş ili için ana havza sınırları ve nehir ağının belirlenmesi işlemleri sonrasında Izgara - Ters Mesafe Güçlendirme (Grid - Inverse Distance to a Power) yöntemi ile 10 yıllık periyotlar halinde havzada zamanla meydana gelen ortalama sıcaklık ve maksimum yağış değerleri incelenmiştir.

Inverse Distance to a Power ‘da bir noktanın diğerine göre etkisi ağ düğümünden uzaklaştıkça azalacak şekilde ağırlıklandırılır. Girdi dizileri, her bir veri noktasının koordinatları ve çıktı grid geometrisi dahil olmak üzere dağınık veri değerleri ile sağlanır. Araç, grid’de verilen konum için enterpolasyon değerini hesaplar. Bu ters mesafe ağırlıklandırma yöntemine göre grid ‘teki düğümünden uzaklaştıkça etki faktörü (gücü) azalmaktadır. Güç arttıkça şebeke düğüm değeri en yakın noktanın değerine yaklaşır. Daha küçük bir güç için, ağırlıklar komşu veri noktaları arasında daha eşit olarak dağıtılır.

Bir grid düğümü hesaplanırken, veri noktalarına atanan ağırlıklar kesirlidir ve tüm ağırlıkların toplamı 1 ‘e eşittir. Belirli bir gözlem bir ızgara düğümüyle çakıştığında, bu gözlem ile ızgara düğümü arasındaki mesafe 0.0 ‘dır ve bu gözleme 1.0 ağırlık verilirken diğer tüm gözlemlere 0.0 ağırlık verilir. Böylece, örtüşen gözlemin değeri ızgara düğümüne atanır.

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2, Ters Mesafe Güçlendirme hesabı için kullanılan denklemler [22,23]:

$$\hat{C}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (1)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad (2)$$

h_{ij} : ızgara düğümü ”j” ile komşu nokta ”i” arasındaki etkin ayırma farkıdır

\hat{C}_j : ızgara düğümü ”j” için enterpolasyonlu değerdir

C_i : komşu noktalar

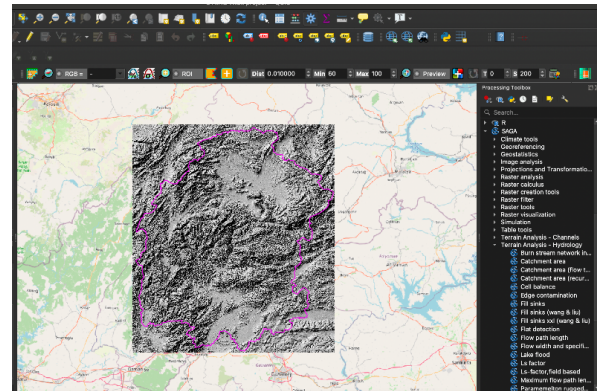
d_{ij} : ızgara düğümü ”j” ile komşu ”i” noktası arasındaki farktır

β : ağırlıklandırma gücü (güç parametresi)

δ : düzeltme parametresi

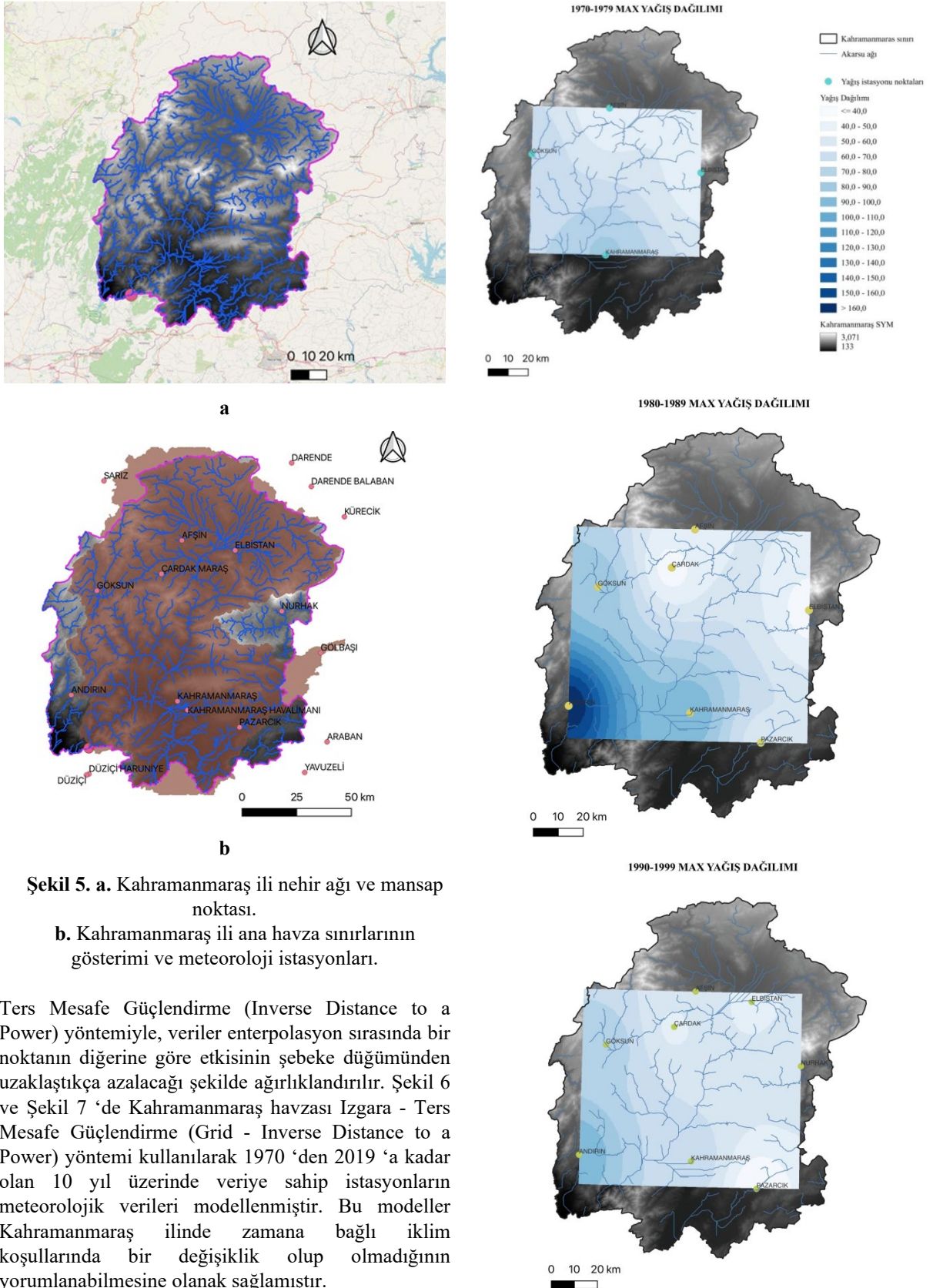
IV. MODELLEME VE TARTIŞMA

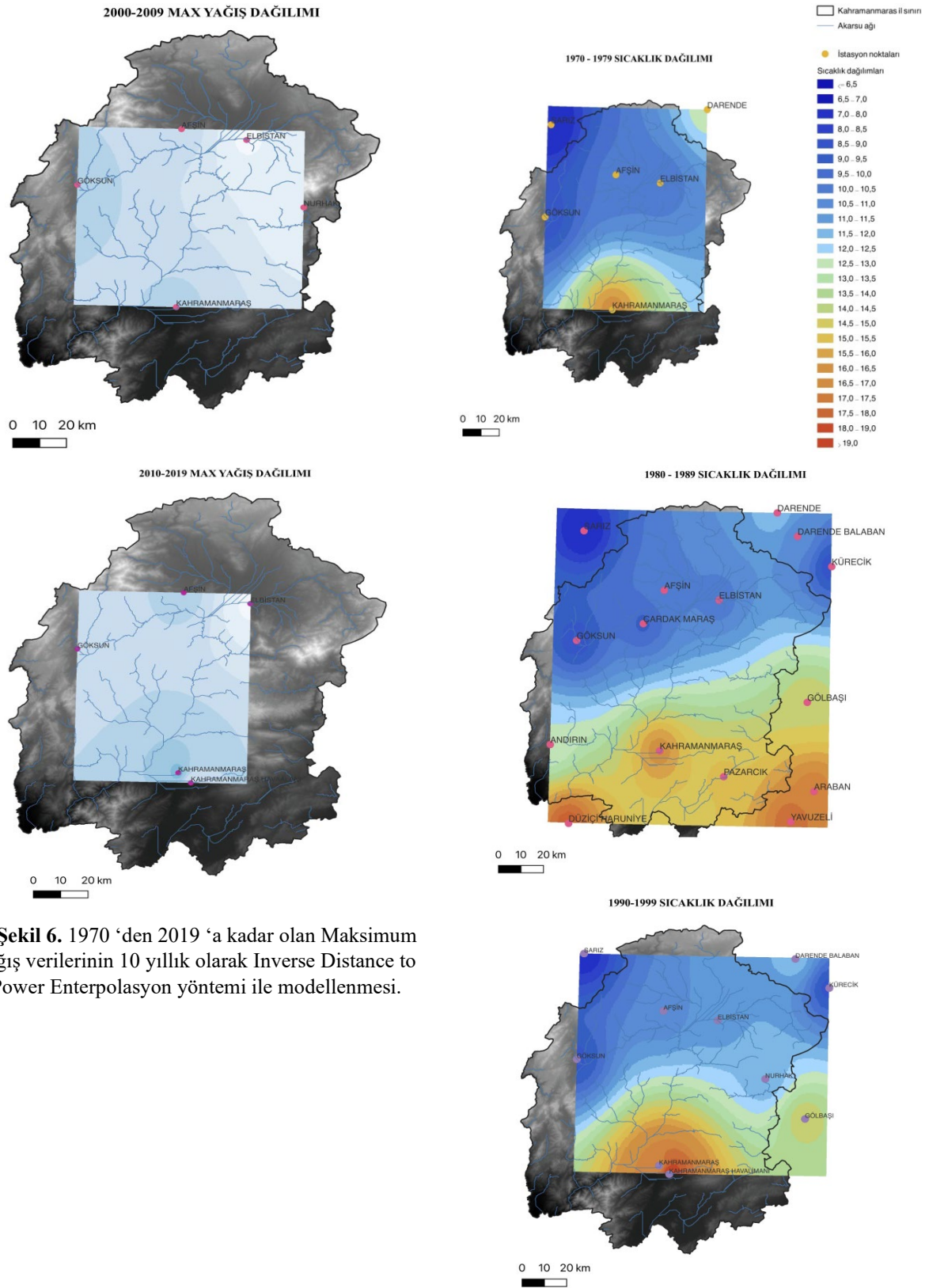
Bu çalışmada mekan analizi için; Sayısal veri (SYM12 -TREx) üzerinde 3 boyutlu bir görüntü modellemesi yapılmıştır. Raster Arazi Analizi Eklentisi kullanılarak, SYM için eğim (slope), yükseklik (elevation), kabartma (hillshade) modellenmiştir. Eklenti, yeni tarama katmanları oluşturmak için sezgisel bir grafik kullanıcı arabirimi sağlar. Slope, her hücre için derece cinsinden eğim açısını hesaplar (birinci dereceden türev tahminine göre), Hillshade ise gölgeli bir kabartma haritasının üç boyutlu bir görünümünü sağlamak için ışık ve gölge kullanarak gölgeli bir harita oluşturur. Bu görüntüler arazi yapısı hakkında fikir sahibi olmaya yardımcı olmaktadır. Şekil 4 ‘de OSM (Open Street Map) standart haritası üzerinde; arazi yapısının daha net anlaşılmasına yardımcı olan kabartma (hillshade) görüntüsü ve şehir sınırları bulunmaktadır.



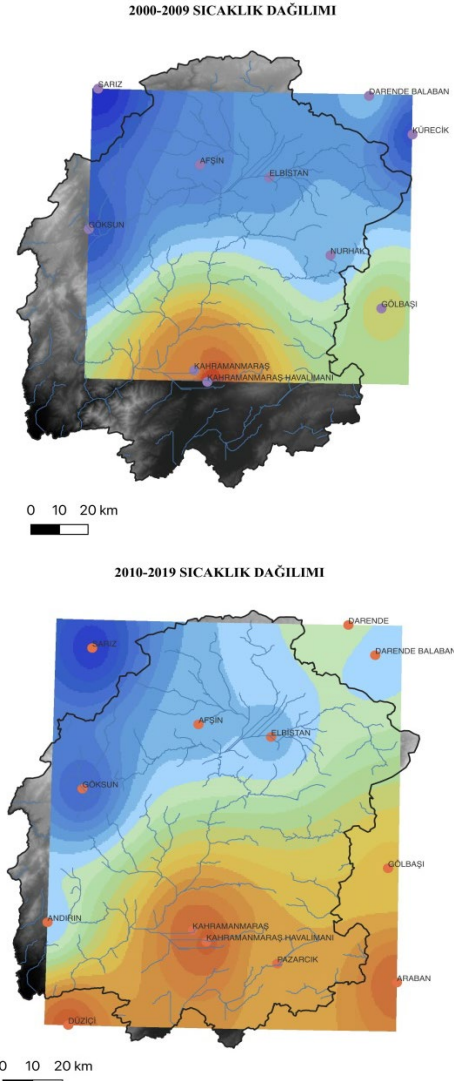
Şekil 4. Kahramanmaraş ili Kabartma (hillshade) modeli.

Mansap noktası Ceyhan nehri üzerinde yer alan Berke barajı seçilerek oluşturulan Kahramanmaraş alt havzası için QGIS ‘te öncelikle nokta katmanı (pour point-mansap noktası) (Şekil 5a) oluşturulmuş, buna bağlı olarak; Yukarı eğim alanı (upslope area) komutu ile sistem bu noktaya göre havza sınırlarını belirlemiştir (Şekil 5b).





Şekil 6. 1970 'den 2019 'a kadar olan Maksimum yağış verilerinin 10 yıllık olarak Inverse Distance to Power Enterpolasyon yöntemi ile modellenmesi.



Şekil 7. 1970 ‘den 2019 ‘a kadar olan Ortalama Sıcaklık verilerinin 10 yıllık olarak Inverse Distance to Power Enterpolasyon yöntemi ile modellenmesi.

V. SONUÇLAR

Yöntem ve veriler başlığı altında açık kaynak kodlu olan QGIS ve paket program olan ArcGIS ‘in farkları ifade edilmiştir. Bu 2 programın avantajları ve dezavantajları vardır. İhtiyaçlar ve olanaklar dahilinde seçim yapılabilir. QGIS ücretsiz, hızlı ve aktif geliştirici, kullanıcı topluluğuna sahip bir yazılımdır. Akademik araştırmalarda ve düşük bütçeli projelerde kullanımı ArcGIS ‘e göre oldukça avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. QGIS ve ArcGIS programları kıyaslanmış; QGIS yazılımının, akademik çalışmalarda kullanmak için daha ekonomik ve geliştirilebilir olduğu kanaatine varılmıştır.

Çalışma alanının yer aldığı Ceyhan havzası tarım arazileri bakımından oldukça zengin olup, tarımın hava koşulları ile önemli bir ilişkisi olması hava koşullarında gerçekleşecek değişimlerin ciddi olumsuz sonuçlar doğurabileceğinden oldukça önemlidir. Bu

çalışmada kullanılan yöntem ve haritalandırma ile belli periyotlarda (bu çalışmada periyot 10 yıllık) sıcaklık ve maksimum yağış miktarlarının mekânsal değişimlerinin gösterilerek bölgesel çalışmalarda rehber olabilmesi amaçlanmıştır. QGIS yardımı ile oluşturulmuş hidrolojik modelde nehir ağının ve 3-D modelinin gerçeği ile örtüşüyor olması yazılımın modelleme konusunda başarılı bir şekilde çalıştığı bir göstergesidir. Hidrolojik modellerde en önemli veri SYM ‘dir. SYM ne kadar kaliteli, yüksek çözünürlüklü olursa modelin hata oranı azalarak, gerçeğe yakınlık oranı artmaktadır. Girdi verisi olarak kullanılan SYM12 - TReX verisinin yüksek çözünürlüğü ve kalitesi de modelin doğruluğunun artmasına yardımcı olmuştur.

Cosun ve Karabulut [24] yaptıkları çalışmalarında Kahramanmaraş ilinde bulunan; Kahramanmaraş, Elbistan, Afşin ve Göksun istasyonlarının minimum, ortalama ve maksimum sıcaklıklarının trend analizlerini incelemişlerdir. %90 güven aralığına göre Elbistan ve Kahramanmaraş istasyonlarında ortalama sıcaklıkta anlamlı artışlar olduğu, diğer istasyonlarda anlamlılık tespit edememişlerdir. Uzunkol ve Kızılelma [25] çalışmalarında Ceyhan havzasında bulunan istasyonların yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak farklı yağış ve kuraklık indisleri hesaplanmış, Elbistan, Kozan ve Ceyhan istasyonlarının yarı kurak ve çölleşmeye açık bölgeler olduğu tespit edilmiş.

Bu çalışmada 10’ar yıllık ortalama sıcaklık dağılım modelleri incelendiğinde (Şekil 7), şehrin kuzey-doğusunda sıcaklığın zamanla artmış olduğu gözlemlenmektedir, Cosun ve Karabulut [24] ve Uzunkol ve Kızılelma [25], çalışmalarında bahsetmiş olduğu Elbistan istasyonu bu bölgede yer almakta olup bu çalışmadaki modeli desteklemektedir.

Türkeş [26] çalışmasında 1930-1993 periyodu yağış ve kuraklık indeksi verilerini analiz etmiş, Türkiye’nin bir bölümünde son 20 yılda kalıcı kuraklık koşulları olduğunu ortaya koymuş. Akdeniz ve Ege bölgeleri için orman yangını, sürdürülemez tarım ve yüksek topografya gibi faktörler göz önüne alındığında; yıllık ve kış mevsiminde yağışlarda normalden daha kuru, kuru yarı nemli veya yarı kurak iklime doğru önemli eğilimlerin olduğunu bu durumların çölleşmeye neden olacak iklim faktörlerini arttırdığını belirtmiş.

Şekil 6 ve 7 ‘de Kahramanmaraş ilinde bulunan meteoroloji istasyonlarının 10 yıllık periyotlarda maksimum yağış ve ortalama sıcaklık değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Grid analizi ile oluşturulan modeller, her periyot için ayrı istasyon verileri değerlendirilerek elde edilmiştir. Dönemlere göre sıcaklık ve maksimum yağış miktarlarındaki bölgesel değişimler lejantta yer alan renkler ile ifade edilmiştir. Şekil 6 ‘de mavi renk koyulaştıkça maksimum yağış miktarının arttığını ifade etmektedir. En açık mavi renk; modellerde 40 mm’den az yağışı ifade ederken, en koyu mavi ise yağışın 160 mm veya üzerinde

olduğunu ifade etmek için kullanılmıştır. Şekil 7 'de yer alan modeller incelendiğinde şehrin güneyinde ve kuzey batısında sıcaklık değişimlerinin meydana geldiği gözlemlenmektedir. Son 10 yıldaki sıcaklıkların ilk dönemlere göre daha yüksek olduğu harita üzerindeki renk değişimlerinden anlaşılmaktadır. Bunun yanında maksimum yağış değerlerinin zaman içerisindeki değişim trendleri hakkında herhangi bir yorum yapılamamaktadır.

İklim değişikliği her alanda etkisini gösterirken, Dünya'da sıcaklığın 2 °C değişimi biyoçeşitlilik açısından türlerin yaklaşık %5 'inin, 4,3 °C artışı ise %16 'sının yok olmasına sebep olabileceği düşünülmektedir [27]. Hava sıcaklığının 2 °C değişimi iklim koşullarının değişmesinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada 1970 - 2019 yılları arasında maksimum yağış miktarında artan ya da azalan bir değişim olup olmadığı hakkında bir yorum yapılamaz iken, ortalama sıcaklık değerlerinde (veriler incelenmiş olup sıcaklık değişiminin 1,5 - 2 °C ye ulaştığı şehrin kuzey doğusunda yer alan Elbistan istasyonu ve çevresi için) kentin iklim koşullarını etkileyecek bir değişimin olduğu yorumu yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Mancusi, L., Albano, R., Sole, A. (2015). FloodRisk: a QGIS plugin for flood consequences estimation, *Geomatics Workbooks*.
- [2] IPCC, Climate change (2007). Mitigation of climate change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Aslantaş, P., Akyürek, Z., Heuvelink, G. (2016). Obtaining the Distribution of Precipitation Over Time and Space, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2):257-269.
- [4] Childs, C., (2004). Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst, ArcUser, July-Sep 3235:32-35.
- [5] Saha, D. ve Islam, A.S. (2015). Assessment of The Changes of Climate in Bangladesh Using Geo-Spatial Interpolation of Climatic Variables, International conference on Climate Change in relation to Water and Environment (I3CWE-2015), DUET - Gazipur, Bangladesh.
- [6] Yu, Z., Song, Y., Song, D., Liu, Y. (2021). Spatial interpolation-based analysis method targeting visualization of the indoor thermal environment, *Building and Environment*, 188(107484).
- [7] Bayer Altın T. ve Barak B. (2012). Seyhan Havzasında 1970-2009 Yılları Arasında Yağış ve Hava Sıcaklığı Değerlerindeki Değişimler ve Eğilimler, *Türk Coğrafya Dergisi*, 51, 21-34.
- [8] Web 5: <https://mgm.gov.tr/>
- [9] Gürbüz, U., Soysal, A.A., Aydın, S. (2022). Tandem-X Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Yüzeysel Modelinin Doğruluğunun Kontrolü, XI. TUFUA B Teknik Sempozyumu, 12-14 Mayıs 2022, Mersin, Türkiye.
- [10] Vermaat, J.E., Broekx, S., Van Eck, B., Engelen, G., Hellmann, F., De Kok, J.L., Van der Kwast, H., Maes, J., Salomons, W. and Van Deursen, W. (2012). Nitrogen source apportionment for the catchment, estuary, and adjacent coastal waters of the River Scheldt, *Ecology and Society*, 17(2).
- [11] Akyüz, D.E. (2018). Coğrafi Bilgi Sisteminde Havzanın Tanımlanması, Su Vakfı, *Su Bülteni*, (6).
- [12] Web 1: <https://earthexplorer.usgs.gov/> erişim tarihi: 15.06.2022.
- [13] Web 2: <https://search.asf.alaska.edu/#/> erişim tarihi: 15.06.2022.
- [14] Zavoianu, I. (1985). Morphometry of Drainage Bassins, Amsterdam, Elsevier.
- [15] Hack, J.T. (1957). Studies of Longitudinal Stream Profiles in Virginia and Maryland, sayı: 294, US Government Printing Office.
- [16] Web 3: <https://www.youtube.com/watch?v=SuF18EWDqfU> erişim tarihi: 30.06.2022.
- [17] Strahler, A.N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, Eos, *Transactions American Geophysical Union*, 38: 913-920.
- [18] Shreve, R.L. (1967). Infinite Topologically Random Channel Networks, *The Journal of Geology*, 75: 178-186.
- [19] Horton, R.E. (1945). Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology, *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275.
- [20] Pastor-Martín, C., Antón, L., Fernández-González, C. (2018). Flunets: a New Matlab-Based Tool for Drainage Network Ordering by Horton and Hack Hierarchies, *Geographia Technica*, 13 (2): 114 - 124.
- [21] Web 4: <https://www.youtube.com/watch?v=RoRRzMMw-c&list=PLf5-Xn4T--gRyrdjst2rhWQGLv6AkOt&index=9> erişim tarihi: 30.06.2022.
- [22] Davis, J. C. (1986). Statistics and Data Analysis in Geology, John Wiley and Sons, New York.
- [23] Franke, R. (1982). *Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods, Mathematics of Computations*, 33 (157): 181-200.
- [24] Cosun, F. ve Karabulut, M. (2009). Kahramanmaraş'ta Ortalama, Minimum ve Maksimum Sıcaklıkların Trend Analizi, *Türk Coğrafya Dergisi*, 53, 41-50.
- [25] Uzunkol, M. ve Kızılelma, Y. (2016). Ceyhan Havzası'nın Kuraklık Durumu Ve Eğilimlerinin Belirlenmesi, *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(29), 503-519.

- [26] Türkeş, M. (1999). Vulnerability of Turkey to Desertification with Respect to Precipitation and Aridity Conditions, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 23, 363-380.
- [27] Birleşmiş Milletler (BM) ve Dünya Meteoroloji Örgütü raporu (2019).

Energy and Exergy Analysis of an Innovative Power/Refrigeration Cycle: Kalina Cycle and Ejector Refrigeration Cycle

Can Deniz SEÇKİN¹ 

¹Marmara University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Istanbul, Turkey

Abstract

This study presents a thermodynamic analysis of a new combined power/refrigeration combined cycle. The combined cycle is comprised of two innovative cycles: Kalina cycle (KNC) and ejector refrigeration cycle (ERC) for power and refrigeration production, respectively. Recovery of heat process is involved in the design of the cycle to rise the energetic and exergetic efficiencies: emitted heat by the KNC is absorbed by the ERC in order to generate cooling. Effects of variation in KNC operational conditions which have direct effects on turbine power production capacity (temperature and pressure of the working fluid flow at the turbine inlet) on performance evaluation parameters of the system (energy efficiency, exergy efficiency, energetic and exergetic content of produced refrigeration and net power) are investigated. A detailed discussion of the results is also reported. Energetic and exergetic efficiency results are substantially dominated by generated power, i.e., KNC parameters which impose direct effect on turbine power production performance is of superior importance to rise the energy and exergy efficiencies.

Keywords: Ejector refrigeration, Kalina cycle, Combined cycle, Energy efficiency, Exergy efficiency

Öz

Bu çalışmada yeni bir bileşik güç/soğutma çevriminin termodinamik analizi sunulmuştur. Bileşik çevrim iki yeni çevrimin birleşiminden oluşmuştur: güç Kalina çevriminde (KNC), soğutma ise ejektörlü soğutma çevriminde (ERC) üretilmektedir. Sistem enerji ve ekserji verimlerini yükseltmek için bileşik çevrim tasarımında ısı geri kazanımı prosesine yer verilmiştir: KNC tarafından salınan ısı ERC tarafından alınmakta ve soğutma üretiminde kullanılmaktadır. KNC çalışma parametrelerinden türbin güç üretim kapasitesine direkt etkisi olan parametrelerin değişiminin (çevrim akışkanının türbin girişindeki sıcaklık ve basıncı), bileşik çevrim enerji ve ekserji verimi ve ayrıca, üretilen güç ve soğutmanın enerji ve ekserji karşılıklarına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçların detaylı incelemesi de çalışmada sunulmuştur. Enerji ve ekserji veriminin baskın şekilde bileşik çevrimde üretilen güç tarafından belirlendiği tespit edilmiştir. Diğer bir deyişle, bileşik çevrimin enerji ve ekserji verimini yükseltmek için KNC çevriminde güç üretim kapasitesini direkt etkileyen faktörler öncelikli olarak incelenmelidir.

Anahtar Kelimeler: Ejektörlü soğutma, Kalina çevrimi, Bileşik çevrim, Enerji verimi, Ekserji verimi

I. INTRODUCTION

Increasing rate of growth in energy demand of the World is a natural consequence of rising World population. It is reported that total energy requirement of the World in 2035 is predicted to be almost 35% higher than that of 2010 [1]. The increasing demand for energy brings noticeable amount of fossil based fuel consumption together with accompanying unfavorable effects of fossil fuel burning on the environment such as greenhouse gas emissions. Gas emissions resulting from combustion processes in the course of electricity and heat production constitute almost 60% of total greenhouse emissions [2] which apparently points out the necessity of taking actions against environmental damage caused by fossil fuel use in energy generation. In this regard, utilization of energy resources in more efficient ways poses paramount importance to reduce fossil fuel consumption and its harmful environmental effects. Among many different methods which have been developed and employed for this purpose, use of waste heat recovery technologies in energy generation and industrial processes have been a topic of recent interest and one of the significant areas of research [2-6]. In this context, the combined cycle of cooling and power (cogeneration cycle) can be regarded as a promising future trend which enables to use the "otherwise" wasted heat of one thermodynamic cycle, in the other cycle to produce additional system outputs, simultaneously [7-9]. This heat recovery process within the system provides the advantage of lower fuel consumption than that of required in separate

generation of the same outputs by conventional thermodynamic cycles. Energy efficiency increase in cogeneration plants relative to production of power and refrigeration in single plants is measured between 10-30% in several studies [7, 10-11].

In the past decades, use of binary mixtures in power generating cycles receives considerable attention. Due to the inconstant temperature characteristics of binary mixtures during constant pressure phase change processes (condensation, evaporation, etc.), better temperature matching is rendered by binary mixtures between the refrigerant and thermal reservoir relative to pure working fluids. As a result, reduction of irreversibility generation (exergy destruction) is observed in the total cycle [12-15]. KNC is presented by Dr. Alexander Kalina as a heat driven, binary mixture (ammonia-water) using power generation cycle [16-17]. By virtue of above mentioned profits of using binary mixtures in power cycles, relative to traditional power cycles [18-20] and other cycles [21-26], higher performance of KNC is reported in the literature.

Ejector refrigeration cycle (ERC) receives considerable attention from scientists, researchers, and engineers due to its high potential of effective low grade heat recovery which provides a cost-effective process, lower environmental damage and reduced energy consumption in refrigeration generation [27-29]. Additionally, ejector itself offers low cost of operation, installation and maintenance, simple operational mechanism with board range of refrigerant operation ability [30-33]. All these remarkable properties of ejector refrigeration systems render ejector refrigeration suitable to utilize the waste heat in refrigeration production which forms the main idea of this present study, i.e., ERC receives the waste heat rejected by the KNC in the analyzed combined cycle in this study. ERC operational principals are reported in detail in further sections. Analyses of ERC use in power/refrigeration combined cycles have been also reported in several studies so far [34-41].

Parametric analysis of a combined cycle which consist of unconventional power and refrigeration cycles (KNC and ERC) is carried out and a detailed discussion of the obtained results is reported in this study. Power is produced in the KNC and heat which is released from the KNC is regained by transferring it to the ERC in order to generate refrigeration. ERC is preferred to be occupied in the cycle since ERC has the capability of producing cooling effect with high efficiency by using low temperature sources [42-44]. Hence, ERC is quite suitable to regain the low-temperature waste heat of KNC in this present study. To the best of the authors' knowledge, design of the proposed coupled KNC and ERC cycle in this present study has not been presented so far in the existing literature, hence, the proposed combination cycle is novel. Modeling and simulation

of the system are conducted by EES software which is extensively reported below. The results of the study indicate the effects of system operational conditions (temperature and pressure of the working fluid flow at the turbine inlet) on system output parameters (system energy efficiency, exergy efficiency, energetic and exergetic content of refrigeration and net power). Discussion of the results and behind physical mechanisms are also extensively presented in this study.

II. SYSTEM OPERATIONAL MECHANISM

Combined cycle schematic view is provided in Figure 1. The combined cycle produces two outputs: "power" is generated by the turbine in the KNC and "cooling" is supplied by the evaporator in ERC. As shown in Figure 1, heat which is discharged by the condenser of the KNC is transferred to the ERC by a heat exchanger and is used to drive the operation of the ERC cycle.

The working fluid of the KNC (ammonia-water mixture, NH₃-H₂O) exhibits a varying temperature profile during evaporation and condensation processes depending on the composition of the mixture. This non-isothermal profile of working fluid in KNC provides a closer temperature profile between the thermal source and the working fluid compared to isothermal temperature profile of pure substances in evaporation and condensation processes. The improved thermal match results in more efficient heat exchange and less irreversibility production during heat-transfer process which yields raised energy and exergy efficiencies [13, 45-46]. Heat is dispatched to the KNC working fluid in a heat exchanger (HE I in Figure 1). Two phase working fluid leaves HE I and is transferred to the separator. Vapor part of the working fluid (ammonia rich vapor) is separated from liquid part (water rich liquid) in the separator and ammonia rich vapor is dispatched to the turbine where the power generation takes place. On the other side, water rich liquid passes through a heat exchanger (High Temperature Regenerator - HTR) and is expanded to a lower pressure. After leaving the turbine, ammonia rich vapor merges with water rich liquid to reform the working fluid of KNC. The working fluid first enters into the low temperature recuperator (LTR) and then the heat exchanger (HE II in Figure 1) which acts as the condenser of the KNC and also heat supplier of the ERC cycle, i.e., above mentioned heat transfer process between the ERC and KNC takes place in HE II. The LTR and HTR are used to perform additional heat recovery in KNC by interchanging the energy of KRC working fluid. At the HE II exit, binary mixture is at saturated state and its pressure is increased by pump I. Afterwards isobaric heat transfer processes to the KRC working fluid occur in LTR and HTR to rise the working fluid temperature. Finally, the ammonia-water solution reaches the HE I to complete the cycle [15, 29, 31].

Schematic representation of ejector refrigeration cycle (ERC) and its main components are seen in Figure 2.

Rejected heat of KNC is absorbed by working fluid of ERC (R134a) which is also the driving heat of refrigeration cycle. Refrigerant (ERC working fluid) is evaporated in HE II and is delivered to the ejector in vapor phase which poses “first flow” of the ejector. The other vapor flow comes from the evaporator (called “secondary flow”) and is transferred to the ejector (as seen in Figure 3). First flow gets into a convergent – divergent nozzle which is namely the “primary nozzle”. At the throat of the primary nozzle (“t” in Figure 3), first flow is choked and supersonically expands and reaches the primary nozzle outlet at low pressure which creates a vacuum effect on secondary flow. As a result, the secondary flow gets into the secondary nozzle of the ejector as seen in Figure 3. At the end of the nozzles, both of the flows are supersonic as a result of pressure decline in the nozzles. The flows enter into the “mixing zone” (Figure 3) in which mixing of two streams finishes up at “a” in Figure 3. Then, compression of the mixed flow is seen due to the occurrence of a shock wave (“b” in Figure 3) and thereby, increase in refrigerant pressure is accompanied by a rapid drop in velocity. Pressure at the condenser and the diffuser exit are identical. [27,29,31,47-49]. As seen in Figure 2, after the ejector, condensation of the refrigerant is performed in the condenser and heat is released out of the ERC. At the condenser outlet, liquid refrigerant is separated into two refrigerant streams: one stream is dispatched to the pump II to increase its pressure before passing through the HE II. The other stream expands through a valve to equalize its pressure to evaporator pressure. Refrigeration is supplied by the isobaric evaporation of the refrigerant (absorbing heat from the cooled space to the refrigerant) in the evaporator [27, 47-49].

III. THERMODYNAMIC MODELLING AND COMPUTATIONAL PROGRAMING

Below listed assumptions are applied in the modeling of the combined cycle [29-31,39,49-51]:

- Steady-state operating conditions exist.
- Fluid flows are one dimensional, frictionless and uniform through the cross-section.
- Pressure losses and the leakage of working fluids in system components are disregarded.
- Except the condensers and evaporator, no heat transfer between the system and the surrounding.
- Energy losses in the turbine, ejector and pumps are computed by means of isentropic efficiencies.
- Kinetic energy and potential energy changes of the fluid across the system components are neglected.

Applied assumption in KNC modeling is the following [29,31,39]:

- Saturated flow conditions at points 2, 3 and 9 in Figure 1.

Applied assumptions in ERC modelling are presented in the followings [29,31,47,52]:

- Stagnation velocity of the refrigerant at the inlet and outlet of the ejector.

- Saturated condition at the exit of condenser II, evaporator and heat exchanger exit between KRC and ERC.
- Entrainment ratio is constant.
- The secondary flow reaches supersonic conditions at the nozzle exit.

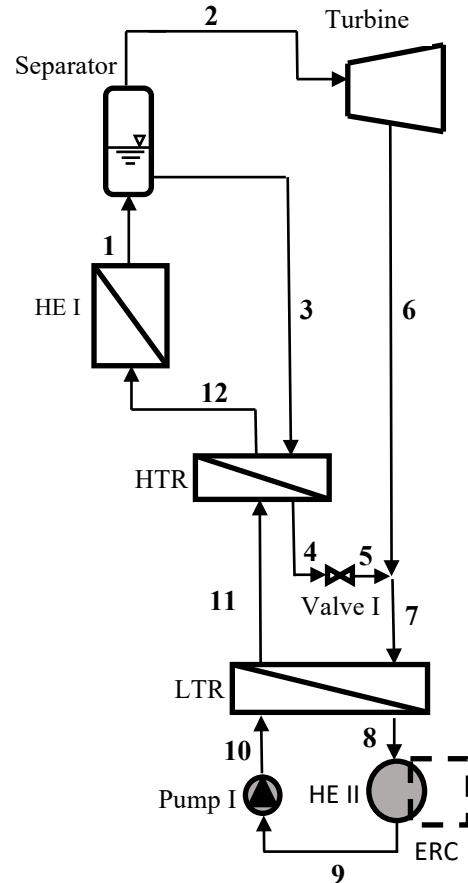


Figure 1. Overview of the combined KNC and ERC cycle.

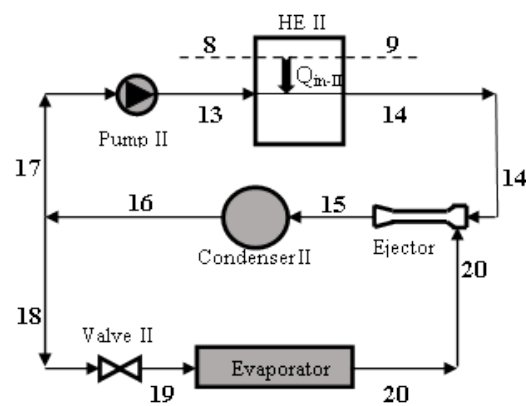


Figure 2. Schematic representation of ERC.

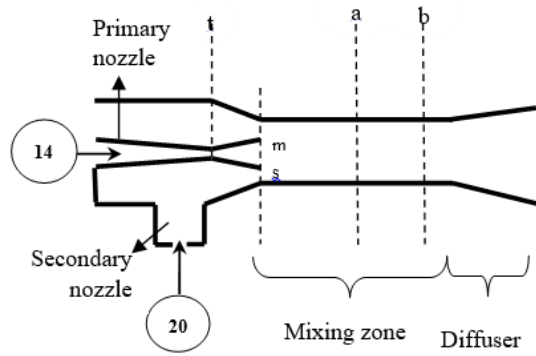


Figure 3. Ejector design.

Simulation program of the combined cycle is built in Engineer Equation Solver (EES) software. EES databank provides the physical properties of KNC working fluid (NH₃-H₂O, ammonia-water mixture) and ERC refrigerant (R134a).

Mathematical formulas which are used in the modelling of the KNC and ERC are presented below. In the formulas, mass flow rate, concentration, pressure, temperature, quality, enthalpy and entropy of working fluid are \dot{m} , x , P , T , q , h , s , respectively. Subscripted state-points of the system are seen in Figures 1–3. Conservation of mass, momentum and energy equations used in the thermodynamic model of the combined cycle are seen in Equations (1-40).

3.1. Kalina Cycle

In Equation (1), mathematical formula for the ammonia concentration in total binary mixture (x) is reported. Briefly “concentration” refers to ammonia concentration in further parts of this study.

$$x = \frac{\dot{m}_{NH_3}}{\dot{m}_1} \tag{1}$$

where \dot{m}_{NH_3} is the ammonia mass flow rate and \dot{m}_1 is the KNC working fluid total mass flow rate.

Conservation of mass equations applied to the separator of the KNC are presented as the following.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \tag{2}$$

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_3 x_3 \tag{3}$$

Turbine isentropic efficiency (η_{tur}) is shown in below equation to determine the enthalpy change across the turbine (h_2-h_6) where subscript “is” stands for isentropic and $\dot{W}_{tur,is}$ is power generation by an isentropic process in the turbine.

$$\eta_{tur} = \frac{\dot{W}_{tur}}{\dot{W}_{tur,is}} = \frac{h_2 - h_6}{h_2 - h_{6,is}} \tag{4}$$

\dot{W}_{tur} is the KNC power production which is obtained by the following:

$$\dot{W}_{tur} = \dot{m}_2 (h_2 - h_6) \tag{5}$$

Below equation is applied for the mixing process of the water rich and ammonia rich solution flows at the turbine exit:

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_s h_s \tag{6}$$

For the isenthalpic expansion in valve I, below relation is applied.

$$h_4 = h_5 \tag{7}$$

For the heat transfer processes in LTR and HTR, below equations are applied where TTD is terminal temperature difference of LTR.

$$T_{11} = T_7 - TTD \tag{8}$$

$$\dot{m}_3 (h_3 - h_4) = \dot{m}_{11} (h_{12} - h_{11}) \tag{9}$$

Isentropic efficiency of the pump (η_{p-I}) is used in Equation (10) to determine the enthalpy change across the pump ($h_{10}-h_9$) where subscript “is” stands for isentropic and $\dot{W}_{p-I,is}$ is power consumption in an isentropic process of the pump.

$$\eta_{p-I} = \frac{\dot{W}_{p-I,is}}{\dot{W}_{p-I}} = \frac{h_{10,is} - h_9}{h_{10} - h_9} \tag{10}$$

Following equation is used to determine the power requirement of pump I (\dot{W}_{p-I}):

$$\dot{W}_{p-I} = \dot{m}_9 (h_{10} - h_9) \tag{11}$$

To determine the rate of heat transfer between KNC and ERC (\dot{Q}_{cond-I}), Equation (12) and Equation (13) are applied to the LTR and condenser I, respectively.

$$\dot{m}_{11} (h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \tag{12}$$

$$\dot{Q}_{cond-I} = \dot{m}_8 (h_8 - h_9) \tag{13}$$

3.2. ERC Analysis

Entrainment ratio (w) equation is seen below where \dot{m}_{14} and \dot{m}_{20} are mass flow rates of the first flow and the secondary flow.

$$w = \frac{\dot{m}_{20}}{\dot{m}_{14}} \tag{14}$$

Below presented formulas are derived to model the ejector and total refrigeration cycle where \dot{m}_{ERC} is the ERC refrigerant mass flow rate, P_{c-ERC} , P_{epI} , P_{HE-II} are pressure of condenser II, evaporator and heat exchanger II, respectively. Additionally, η_m , η_s , η_d , η_{p-II} are isentropic efficiency of primary nozzle, secondary nozzle, diffuser and pump II, respectively.

Owing to the choking of the first flow at the throat of the primary nozzle ("t" in Figure 3), characteristics of the flow converts into subsonic to supersonic. As a result, Mach number is unity and velocity (V_t) is equal to sound speed (C_t) at the throat. C_t is computed by Equation (15) and is used in Equations (16-17) to determine the cross-sectional area of the throat (A_t). v_t is the specific volume of the refrigerant at the throat of the primary nozzle.

$$C_t = f(P_t, h_t) \tag{15}$$

$$V_t = \sqrt{2(h_{14} - h_t)} \tag{16}$$

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_t = \left(\frac{1}{1+w}\right) \dot{m}_{ERC} = \frac{V_t A_t}{v_t} \tag{17}$$

Primary nozzle isentropic efficiency (η_m) is used to determine the specific enthalpy at primary nozzle exit (h_m) as seen in Equation (18) ($h_{m,is}$ is the first flow enthalpy at primary nozzle exit after an isentropic process).

$$\eta_m = \frac{h_{14} - h_m}{h_{14} - h_{m,is}} \tag{18}$$

Velocity (V_m) and area (A_m) of the primary nozzle are obtained by the following equations where v_m is the refrigerant specific volume at the primary nozzle outlet.

$$V_m = \sqrt{2(h_{14} - h_m)} \tag{19}$$

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_m = \left(\frac{1}{1+w}\right) \dot{m}_{ERC} = \frac{V_m A_m}{v_m} \tag{20}$$

Above given procedure is applied to determine the refrigerant properties at the secondary nozzle. Mach number is unity in cross section s in Figure 3. Following equations are used to determine the cross-sectional area at the secondary nozzle exit (A_s) where v_s is the specific volume of the refrigerant and $h_{s,is}$ is isentropic enthalpy of secondary flow at cross section s in Figure 3.

$$\eta_s = \frac{h_{20} - h_s}{h_{20} - h_{s,is}} \tag{21}$$

$$V_s = \sqrt{2(h_{20} - h_s)} \tag{22}$$

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_s = \left(\frac{w}{1+w}\right) \dot{m}_{ERC} = \frac{V_s A_s}{v_s} \tag{23}$$

When saturated mixture phase refrigerant is seen at the cross sections of t, m and s in Figure 3, critical flow properties of the refrigerant is obtained by Henry and Fauske method which is broadly explained in [28,53-55].

Velocity and enthalpy of the mixed refrigerant at cross section "a" are computed by the following equations where ϕ , V_a , A_a and v_a are coefficient of frictional loss, velocity, cross-sectional area and specific volume at "a" in the ejector (Figure 3), respectively.

$$A_a = A_m + A_s \tag{24}$$

Conservation of mass equation:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_m + \dot{m}_s = \dot{m}_{ERC} \tag{25}$$

Conservation of momentum equation:

$$\begin{aligned} P_a A_a + \dot{m}_{ERC} V_a = \\ \phi \left(P_m A_m + \dot{m}_m V_m + P_s A_s + \dot{m}_s V_s \right) = \\ P_a A_a + \frac{A_a V_a^2}{v_a} = \\ \phi \left(P_m A_m + \frac{A_m V_m^2}{v_m} + P_s A_s + \frac{A_s V_s^2}{v_s} \right) \end{aligned} \tag{26}$$

Conservation of energy equation:

$$\dot{m}_{ERC} \left[h_a + \frac{V_a^2}{2} \right] = \dot{m}_m \left[h_m + \frac{V_m^2}{2} \right] + \dot{m}_s \left[h_s + \frac{V_s^2}{2} \right] \tag{27}$$

Shock occurs at "b" in Figure 3 and after the shock, the flow characteristics transfers into subsonic from supersonic flow. Rankine-Hugoniot equations are utilized to obtain the properties of the fluid after the shock occurs [43, 56]. Related equations are given below in which subscript "b" signifies "after-shock" thermodynamic properties of the refrigerant.

$$\frac{P_b}{P_a} = \frac{2 k M_a^2 - (k-1)}{k+1} \tag{28}$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{v_a}{v_b} = \frac{(k+1) M_a^2}{(k-1) M_a^2 + 2} \tag{29}$$

In Equations (28-29), Ma and k are Mach number and specific heat ratio (c_p/c_v) at "a" in Figure 3, respectively. Densities at "a" and "b" are ρ_a and ρ_b , respectively.

Specific enthalpy of the refrigerant at the exit of the diffuser part of the ejector (h_{15}) is determined by Equations (30-31). Equation (30) is obtained from conservation of energy principle and Equation (31) is

based on isentropic efficiency of the diffuser where $h_{15, is}$ is isentropic enthalpy of the refrigerant at the diffuser exit.

$$\dot{m}_{ERC} h_{15} = \dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{20} h_{20} \tag{30}$$

$$\eta_d = \frac{h_{15, is} - h_b}{h_{15} - h_b} \tag{31}$$

Energy interaction between the KNC and ERC takes place in HE II (Figure 2) which also acts as the condenser of the KNC (condenser I). Rate of heat transfer from KNC to ERC ($\dot{Q}_{in, II}$) is computed by means of Equation (32) as presented below. Additionally, rate of heat rejection by ERC to the surrounding ($\dot{Q}_{cond, II}$) and rate of heat absorbed from cooled space by the ERC (cooling capacity) (\dot{Q}_{ref}) are obtained by the following equations.

$$\dot{Q}_{in, II} = \dot{m}_{13} (h_{14} - h_{13}) \tag{32}$$

$$\dot{Q}_{cond, II} = \dot{m}_{ERC} (h_{15} - h_{16}) \tag{33}$$

$$\dot{Q}_{ref} = \dot{m}_{19} (h_{20} - h_{19}) \tag{34}$$

Rate of power consumption by pump II in ERC (\dot{W}_{p-II}) is determined by below equations.

$$\dot{W}_{p-II} = \frac{v_{17} (P_{13} - P_{17})}{\eta_{p-II}} \dot{m}_{13} \tag{35}$$

$$\dot{W}_{p-II} = \dot{m}_{13} (h_{13} - h_{17}) \tag{36}$$

3.3. System Output Parameters

Mathematical formulas to compute the net power production (\dot{W}_{net}) and energy efficiency (η_{cc}) of the combined cycle are seen in Equations (37-38), respectively.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{tur} - \dot{W}_{p-I} - \dot{W}_{p-II} \tag{37}$$

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{ref}}{\dot{Q}_{in-I}} \tag{38}$$

Regarding the mathematical expressions for system exergetic output parameters, exergy efficiency of the combined cycle (η_{ex}) is presented in Equation (39) where \dot{Ex}_{in-I} is the rate of exergy content of the energy provided to the combined cycle in HE I, \dot{Ex}_{Qref} is the rate of exergetic equivalent of the refrigeration capacity and \dot{Ex}_{Wnet} is the exergetic equivalent of the net power produced by the combined cycle. \dot{Ex}_{Qref} and \dot{Ex}_{in-I} are obtained by Equations (40-41) [29,31,57-59].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_{Wnet} + \dot{Ex}_{Qref}}{\dot{Ex}_{in-I}} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Ex}_{Qref}}{\dot{Ex}_{in-I}} \tag{39}$$

$$\dot{Ex}_{Qref} = \dot{m}_{19} [(h_{19} - h_{20}) - T_0 (s_{19} - s_{20})] \tag{40}$$

$$\dot{Ex}_{in-I} = \dot{m}_1 [(h_{12} - h_1) - T_0 (s_{12} - s_1)] \tag{41}$$

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the analysis indicate the effects of variation in considered operational parameters of KNC (turbine inlet temperature (T_2) and pressure (P_2)) to the selected system parameters of the combined cycle which are: energetic efficiency (η_{cc}), exergetic efficiency (η_{ex}), power generation (\dot{W}_{net}), rate of refrigeration (\dot{Q}_{ref}), exergy of produced power (\dot{Ex}_{Wnet}) and rate of refrigeration exergy (\dot{Ex}_{Qref}). T_2 and P_2 are chosen to be investigated in this study since these are the main operational parameters of KNC which directly effects the power production performance of the turbine. Operational conditions remain constant in the performed numerical analysis as presented in Table 1.

Table 1. Operational parameters (subscripted state-points are seen in Figures 1–3).

Parameter (unit)	
\dot{Q}_{in-I} (kW)	1000
T_3 (°C)	120
P_3 (kPa)	3500
T_9 (°C)	15
x_1 (%)	70
\dot{m}_1 (kg/s)	0.98
\dot{m}_{ERC} (kg/s)	0.85
$\eta_{p-I}/\eta_{p-II}/\eta_{tur}/\eta_m/\eta_s/\eta_d$ (%)	80/80/80/90/90/90
P_{c-ERC} (kPa)	850
P_{opr} (kPa)	415
P_{HE-II} (kPa)	2635.3

In Figure 4, variation of \dot{W}_{net} , \dot{Q}_{ref} and η_{cc} at different turbine inlet pressures (P_2) is presented. Work production potential of the KNC is directly influenced by P_2 and thereby, η_{cc} results are also affected by P_2 based on Equation (38). On the other side, turbine inlet pressures (P_2) is identical to HE I pressure and based on Equation (41), pressure of HE I quantifies the supplied exergy to the combined cycle (\dot{Ex}_{in-I}). Thus, P_2 also imposes a direct influence on η_{ex} results of the combined cycle based on Equation (39). Hence, among all the operational parameters, turbine inlet pressure (P_2) is expected to be one of the most prevailing parameters on the η_{cc} and η_{ex} efficiencies of the combined cycle. As seen in Figure 4, thermal efficiency (η_{cc}) rises but the rate of rise lowers as P_2 rises. It must be stated here that, among the three constituents of \dot{W}_{net} results (Equation (37)), \dot{W}_{tur} constitutes the greatest part, i.e., the effect of power consumption by the pumps (\dot{W}_{p-I} and \dot{W}_{p-II}) on \dot{W}_{net} are inconsiderable compared to that of \dot{W}_{tur} . In other words, magnitude of \dot{W}_{net} is almost entirely characterized by \dot{W}_{tur} . As presented in Equation (5), turbine power production is directly proportional to the rate of KNC working fluid mass flow which is dispatched to the turbine (\dot{m}_2) and enthalpy difference (h_2-h_6). It is seen that as P_2 heightens, enthalpy difference and mass flow rate display reverse patterns: (h_2-h_6) grows while \dot{m}_2 ascends. As a result, \dot{W}_{tur} gets

higher owing to the growing (h_2-h_6) but the rate of increase declines with decreasing \dot{m}_2 as P_2 rises (Figure 4). Since the operational parameters of ERC remains constant during the analysis, physical conditions and mass flow rate of the refrigerant are constant at the inlet and outlet of the evaporator, i.e., refrigeration generation by ERC (\dot{Q}_{ref}) is kept constant based on Equation (34) (\dot{Q}_{ref} is 44.65 kW). Hence, based on Equation (38), thermal efficiency (η_{cc}) of the combined cycle is predominantly affected by variation of \dot{W}_{net} and similar trends of the η_{cc} and \dot{W}_{net} curves are clearly seen in Figure 4.

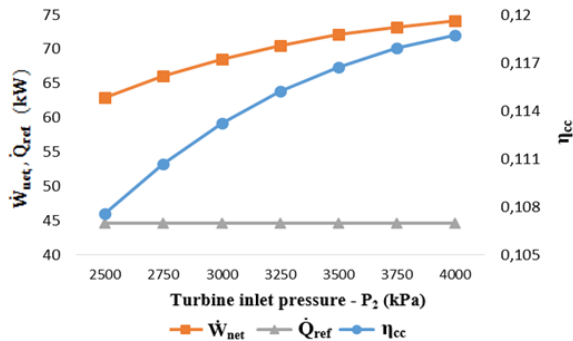


Figure 4. \dot{W}_{net} , \dot{Q}_{ref} and η_{cc} versus P_2 .

Figure 5 presents the effect of increasing turbine inlet pressure (P_2) on $\dot{E}x_{Wnet}$, $\dot{E}x_{Qref}$ and η_{ex} results of the considered combined cycle. Figure 5 indicates that exergy efficiency (η_{ex}) rises with growing P_2 . As mentioned above, in spite of the variation of P_2 , working parameters and physical properties of refrigerant remain constant in ERC. This brings constant $\dot{E}x_{ref}$ based on Equation (40) ($\dot{E}x_{Qref}$ is 12.22 kW). By definition, exergy of produced power ($\dot{E}x_{Wnet}$) is directly equal to \dot{W}_{net} while the rate of refrigeration exergy ($\dot{E}x_{Qref}$) is substantially less than \dot{Q}_{ref} . Thereby, $\dot{E}x_{ref}$ is considerably lower than $\dot{E}x_{Wnet}$ and hence, based on Equation (39), exergy efficiency (η_{ex}) results are prevalingly shaped by $\dot{E}x_{Wnet}$. As a result, η_{ex} and $\dot{E}x_{Wnet}$ curves exhibit a similar trend in Figure 5: both of them increases with increasing P_2 . Additionally, increasing results of η_{ex} is also supported by reducing $\dot{E}x_{in-I}$. (see Equation (39)) but its influence on η_{ex} is quite marginal owing to the slight drop of $\dot{E}x_{in-I}$ as P_2 rises.

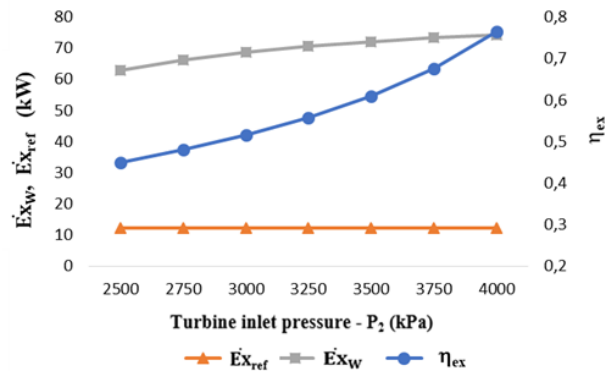


Figure 5. $\dot{E}x_{Wnet}$, $\dot{E}x_{Qref}$ and η_{ex} versus P_2 .

Figure 6 shows the \dot{W}_{net} , \dot{Q}_{ref} and η_{cc} results versus the temperature at the turbine inlet (T_2). Temperature of the KNC working fluid at the turbine inlet (T_2) has nonignorable impact on η_{cc} and η_{ex} results based on the similar reasons to those for P_2 : increasing T_2 affects \dot{W}_{tur} and hence \dot{W}_{net} in Equation (38) and $\dot{E}x_{Wnet}$ in Equation (39). The results of the performed analysis point out that \dot{m}_2 and (h_2-h_6) are ascending with increasing T_2 which directly yields rising \dot{W}_{tur} (it can be regarded as identical to \dot{W}_{net} with negligible error as stated above). Hence, rising \dot{W}_{net} yields increasing η_{cc} based on Equation (38). Therefore, direction of curves which represent the variation of \dot{W}_{net} and η_{cc} is upward with increasing T_2 in Figure 6. Since variation of T_2 has no influence on ERC operational conditions (which are constant as presented in Table 1), refrigerant properties and hence \dot{Q}_{ref} production of ERC is constant in Figure 6 (\dot{Q}_{ref} is 44.65 kW). Strong correlation between \dot{W}_{net} and η_{cc} (Figure 6) is also supported by constant \dot{Q}_{ref} based on Equation (38).

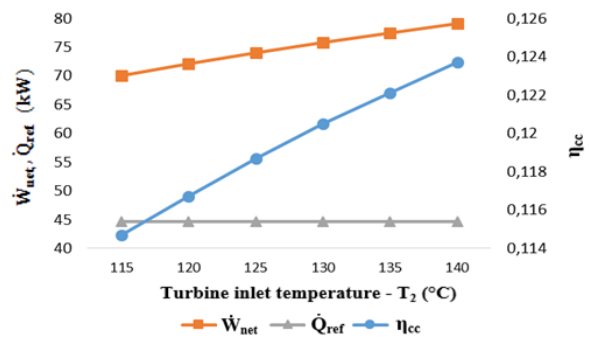


Figure 6. \dot{W}_{net} , \dot{Q}_{ref} and η_{cc} versus T_2 .

Figure 7 depicts the effect of increasing turbine inlet temperature (T_2) on $\dot{E}x_{Wnet}$, $\dot{E}x_{Qref}$ and η_{ex} results of the considered combined cycle. It is seen that, exergetic efficiency (η_{ex}) graph indicate a reverse characteristics to that of η_{cc} . η_{ex} results decrease but the rate of decrease gets lower as T_2 rises. Because magnitude of \dot{W}_{net} is directly equal to that of $\dot{E}x_{Wnet}$, rising $\dot{E}x_{Wnet}$ is seen in Figure 7 due to the above stated reasons for the rise of \dot{W}_{net} . On the other hand, it is determined that $\dot{E}x_{in-I}$ (rate of exergy supply to the combined cycle in HE I) is increasing with growing T_2 and the rate of

increase is greater than that of $\dot{E}x_{W_{net}}$. As a result, based on Equation (39), $\dot{E}x_{in-I}$ prevails η_{ex} of the combined cycle more than $\dot{E}x_{W_{net}}$ and η_{ex} gets lower in the analysed range of T_2 .

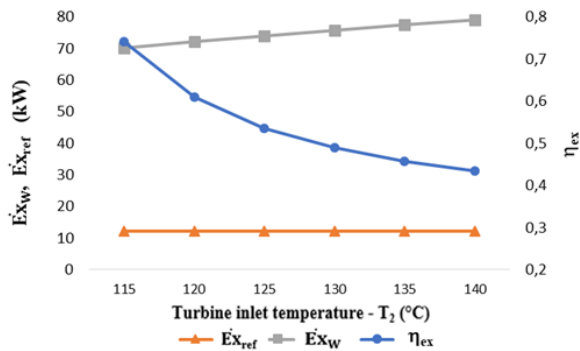


Figure 7. $\dot{E}x_{W_{net}}$, $\dot{E}x_{Q_{ref}}$ and η_{ex} versus T_2 .

V. CONCLUSION

In this current study, thermodynamic analysis of a combined cycle which consist of two innovative thermodynamic cycles for power and refrigeration generation (KNC and ERC) is presented. Heat recovery process with the proposed design Presented design of the heat recovery processes within the combined cycle is novel and has never been analyzed in the available literature. Combined cycle is designed in such a manner so that rejected heat by the KNC is transferred to the ejector refrigeration cycle. Proposed way of combination in the design of the The system is analyzed from energetic and exergetic aspects, obtained results are discussed to provide deeper understanding to the system's physical mechanism and to bring some light to the effect of operational conditions on energetic and exergetic performance of the considered combined cycle. The results indicate the effects of considered KNC operational parameters (P_2 and T_2) on output parameters of the system: rate of refrigeration generation (\dot{Q}_{ref}), rate of net power output (\dot{W}_{net}), energy and exergy efficiency (η_{cc} , η_{ex}) and exergy of produced power and refrigeration ($\dot{E}x_{W_{net}}$, $\dot{E}x_{Q_{ref}}$). The main findings of this research are outlined by the followings:

- As P_2 grows in the range from 2500 kPa to 4000 kPa, η_{cc} and η_{ex} curves exhibit a similar trend: η_{cc} and η_{ex} results are rising with increasing P_2 . In the considered interval of P_2 , η_{cc} and η_{ex} of the combined cycle increases by 10% and 70%, respectively. It is determined that P_2 directly effects the work production capacity of the turbine and hence, total energy and exergy produced by the combined cycle gets higher. As a result, increase of η_{cc} and η_{ex} is observed with rising P_2 .

- Rise of T_2 in the range of 115–140°C shows reverse pattern for η_{cc} and η_{ex} : η_{cc} heightens by 7% while η_{ex} drops by 41% in the analyzed range of T_2 . It is obtained

that increasing T_2 results in ascending results of \dot{W}_{net} and $\dot{E}x_{in-I}$ which lead the above mentioned reverse trends in η_{cc} and η_{ex} of the combined cycle.

- The results indicate that η_{cc} and η_{ex} of the combined cycle are highly prevailed by net power production (\dot{W}_{net}) which is almost identical to turbine power production in the KNC. Hence, operational parameters which effects the power production performance of the turbine must be primarily analyzed to operate the cycle with high energy or exergy efficiencies.

REFERENCES

- [1] Internal Energy Agency. "World Energy Outlook. Paris: Internal Energy Agency; 2012. [cited 2022 October 5]." (2012).
- [2] B. Herzog, P. Jonathan, K.A. Baumert. "Navigating the numbers- greenhouse gas data and international climate policy. Washington: World Resources Institute: [cited 2022 October 5]." (2005).
- [3] N. Ozalp. Utilization of heat, power, and recovered waste heat for industrial processes in the U.S. chemical industry. *J Energy Resour.*, 131, 022401-1- 022401-11, (2009).
- [4] A. Khaliq, R. Kumar, I. Dincer. Exergy analysis of an industrial waste heat recovery based cogeneration cycle for combined production of power and refrigeration. *J Energy Resour.*, 131, 022402-1- 022402-9, (2009).
- [5] K. Sarmah, P. Gupta. Refrigeration by waste heat recovery. *International Journal of Interdisciplinary Research*, 3, 1-7, (2017).
- [6] D. Brough, H. Jouhara. The aluminum industry: a review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *International Journal of Thermofluids*, 1-2, 1-39. (2020).
- [7] A.O. Arnas, D.D. Boettner, S.A. Norberg, G. Tamm, J.R. Whipple. On the teaching of performance evaluation and assessment of a combined cycle cogeneration system. *J Energy Resour*, 131, 025501-1- 025501-7, (2011).
- [8] U. Cakir, K. Comakli, F. Yuksel. The role of cogeneration systems in sustainability of energy. *Energy Convers Manage.*, 63, 196–202, (2012).
- [9] M.D. Chowdhury, E.M.A. Mokheimer. Recent developments in solar and low-temperature heat sources assisted power and cooling systems: A design perspective. *J Energy Resour*, 142, 040801-1 - 040801-17, (2020).
- [10] K. Comakli. Economic and environmental comparison of the natural gas fired conventional and condensing combi-boilers. *J. Energy Inst.*, 81, 242–246, (2008).
- [11] A. Abusoglu, M. Kanoglu. Exergetic and thermodynamic analyses of diesel engine powered cogeneration. Part 1. Formulations. *Appl. Therm. Eng.*, 29, 234–241, (2009).
- [12] O.M. Ibrahim, S.A. Klein. Absorption power cycles. *Energy*, 21, 21–27, (1996).

- [13] D.S. Ayou, J.C. Bruno, R. Saravanan, A. Coronas. An overview of combined absorption power and cooling cycles. *Renew Sustain Energy Rev.*, 21, 728–748, (2013).
- [14] N. Shokati, F. Ranjbar, M. Yari. Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renewable Energy*, 83, 527–542, (2015).
- [15] X.X. Zhang, M.G. He, Y. Zhang. A review of research on the kalina cycle. *Renew Sustain Energy Rev.*, 16, 5309–5318, (2012).
- [16] A.I. Kalina. Combined cycle and waste-heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation. *In 1983 Joint Power Generation Conference: GT Papers*, Indianapolis, IN, USA, 25–29 September, (1983).
- [17] A.I. Kalina. Combined cycle system with novel bottoming cycle. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 106, 737–742, (1984).
- [18] M. Jonsson. *Advanced power cycles with mixtures as the working fluid*. Diss. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, (2003).
- [19] C.H. Marston. Parametric Analysis of the kalina cycle. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 112, 107–116, (1990).
- [20] Y. Park, R. Sonntag. A preliminary study of the kalina power cycle in connection with a combined cycle system. *Int. J. Energy Res.*, 14, 153–162, (1990).
- [21] H.A. Mlcak. Kalina cycle concepts for low temperature geothermal. *Geotherm Res Counc Trans*, 26, 707–713, (2002).
- [22] C.E.C. Rodriguez, J.C.E. Palacio, O.J. Venturini, E.E.S. Lora, V.M. Cobas, D.M.D. Santos. Energetic and economic comparison of orc and kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil. *Appl. Therm. Eng.*, 52, 109–119, (2013).
- [23] W. Fu, J. Zhu, T. Li, W. Zhang, J. Li. Comparison of a kalina cycle based cascade utilization system with an existing organic rankine cycle based geothermal power system in an oilfield. *Appl. Therm. Eng.*, 58, 224–233, (2013).
- [24] M.H.D. Hettiarachchi, M. Golubovic, W.M. Worek, Y. Ikegami. The performance of the kalina cycle system 11(KCS-11) with low-temperature heat sources. *J Energy Resour*, 129, 243–247, (2007).
- [25] V. Zare, S.M.S. Mahmoudi. A thermodynamic comparison between organic rankine and kalina cycles for waste heat recovery from the gas turbine-modular helium reactor. *Energy*, 79, 398–406, (2015).
- [26] S. Li, Y. Dai. Thermo-economic comparison of kalina and CO₂ transcritical power cycle for low temperature geothermal sources in China. *Appl. Therm. Eng.*, 70, 139–152, (2014).
- [27] K. Chunnanond, S. Aphornratana. Ejectors: applications in refrigeration technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 8, 129–155, (2004).
- [28] C. Seckin, Effect of ejector internal efficiencies on cooling performance of an ejector expansion refrigeration cycle with a two phase ejector. *In International Conference on Energy and Thermal Engineering: ICTE 2017*, Istanbul, Turkey, 25–28 April, 152–161, (2017).
- [29] C. Seckin, Thermodynamic analysis of a combined power/refrigeration cycle: combination of kalina cycle and ejector refrigeration cycle. *Energy Convers. Manage*, 157, 631–643, (2018).
- [30] C. Seckin. Parametric analysis and comparison of ejector expansion refrigeration cycles with constant area and constant pressure ejectors. *J Energy Resour*, 139, s042005-1–042005-10, (2017).
- [31] Seckin, C. Effect of operational parameters on a novel combined cycle of ejector refrigeration cycle and kalina cycle. *J Energy Resour*, 142, 012001-1– 012001-11, (2020).
- [32] L. Boumaraf, A. Lallemand. Modeling of an ejector refrigerating system operating in dimensioning and off-dimensioning conditions with the working fluids R142b and R600a. *Appl Therm Eng*, 29, 265–274, (2009).
- [33] Z. Aidoun, K. Ameer, M. Falsafioon, M. Badache. Current advances in ejector modeling, experimentation and applications for refrigeration and heat pumps. part 1: single-phase ejectors. *Inventions*, 4, 1-73, (2019).
- [34] J. Wang, Y. Dai, T. Zhang, S. Ma. Parametric analysis for a new combined power and ejector absorption refrigeration cycle. *Energy*, 34(10), 1587–1593, (2009).
- [35] X.X. Xu, C. Liu, X. Fu, H. Gao, Y. Li. Energy and exergy analyses of a modified combined cooling, heating, and power system using supercritical CO₂. *Energy*, 86, 414–422, (2015).
- [36] J.F. Wang, P. Zhao, X. Niu, Y. Dai. Parametric analysis of a new combined cooling, heating, and power system with transcritical CO₂ driven by solar energy. *Appl Energy*, 94, 58–64, (2012).
- [37] A. Habibzadeh, M.M. Rashidi, N. Galanis. Analysis of a combined power and ejector refrigeration cycle using low temperature heat. *Energy Convers Manage*, 65, 381–391, (2013).
- [38] H. Ghaebi, H. Rostamzadeh, P.S. Matin. Performance evaluation of ejector expansion combined cooling and power cycles. *Heat Mass Transf*, 4, 1–17, , (2017).
- [39] O. Barkhordarian, A. Behbahaninia, R. Bahrampoury. A novel ammonia-water combined power and refrigeration cycle with two different cooling temperature levels. *Energy*, 120, 816–826, (2017).
- [40] W. Sun, X. Yue, Y. Wang. Exergy efficiency analysis of ORC (organic rankine cycle) and ORC-based combined cycles driven by low-

- temperature waste heat. *Energy Convers Manage*, 135, 63–73, (2017).
- [41] H. Ghaebi, T. Parikhani, H. Rostamzadeh, B. Farhang. Thermodynamic and thermo-economic analysis and optimization of a novel combined cooling and power (CCP) cycle by integrating of ejector refrigeration and kalina cycles. *Energy*, 139, 262–276, (2017).
- [42] G. Besagni, R. Mereu, F. Inzoli. Ejector refrigeration: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*, 53, 373–407, (2016).
- [43] J.A.E. Carrillo, S. de La Flor, J.M. Salmeron Lissen. Thermodynamic comparison of ejector cooling cycles. ejector characterization by means of entrainment ratio and compression efficiency. *Int. J. Refrig.*, 74, 371–384, (2017).
- [44] M. Sokolov, D. Hershgal. Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low grade heat. Part 1. Systems characterization. *Int. J. Refrig.*, 13, 351–356, (1990).
- [45] E. Thorin. *Power cycles with ammonia-water mixtures as working fluid - analysis of different applications and the influence of thermophysical properties*. Diss. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, (2000).
- [46] S. Ogriseck. Integration of kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study. *Appl. Therm. Eng.*, 29, 2843–2848, (2009).
- [47] R. Yapıcı, H.K. Ersoy. Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model. *Energy Convers. Manage.*, 46, 3117–3135, (2005).
- [48] H.K. Ersoy, S. Yalcin, R. Yapici, M. Ozgoren. Performance of a solar ejector cooling-system in the southern region of Turkey. *Appl. Energy*, 84, 971–983, (2007).
- [49] A. Khalil, M. Fatouh, E. Elgendy. Ejector design and theoretical study of R134a ejector refrigeration cycle. *Int. J. Refrig.*, 34(7), 1684–1698, (2011).
- [50] L. Cao, J. Wang, Y. Dai. Thermodynamic analysis of a biomass-fired kalina cycle with regenerative heater. *Energy*, 77, 760–770, (2014).
- [51] M. Ahmad, M.N. Karimi. Thermodynamic analysis of kalina cycle. *Int. J. Sci. Res.*, 5, 2244–2249, (2016).
- [52] G.K. Alexis, E.K. Karayiannis. A solar ejector cooling system using refrigerant R134a in the Athens area. *Renewable Energy*, 30, 1457–1469, (2005).
- [53] R.E. Henry, H.K. Fauske. The two-phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices, and short tubes. *J Heat Transf*, 93, 179–187, (1971).
- [54] C. Seckin. Investigation of the effect of the primary nozzle throat diameter on the evaporator performance of an ejector expansion refrigeration cycle. *J. Therm. Eng.*, 4, 1939–1953, (2018).
- [55] M. Hassanain, E. Elgendy, M. Fatouh. Ejector expansion refrigeration system: ejector design and performance evaluation. *Int J Refrig.*, 58, 1–13, (2015).
- [56] F.H. Shu, *The physics of astrophysics. Vol.2: Gas dynamics*. *University Science Books*, Mill Valley, (1991).
- [57] J. Szargut, D.R. Morris, F.R. Steward. Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. *Hemisphere Publishing Corporation*, NY, USA, (1988).
- [58] M. Atmaca, C. Ezgi. Three-dimensional CFD modeling of a steam ejector. *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 44, 2236–2247, (2022).
- [59] M. Gumus, M. Atmaca. Energy and exergy analyses applied to a CI engine fueled with diesel and natural gas. *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 35, 1017–1027, (2013).

A Preliminary Study on Purification and Characterization of Lipase(s) Produced by *Cryptococcus diffluens* D44

Esra BÜYÜK¹ , Orkun PİNAR¹ 

¹Marmara University, Faculty of Engineering, Department of Bioengineering, 34854, Maltepe, Istanbul, Turkey

Abstract

In the present work, preliminary purification, and characterization of lipases from *Cryptococcus diffluens* D44, which was isolated from petroleum sludge, were performed. In the purification steps, sequential to acetone precipitation, lipases from *C. diffluens* D44 were purified by DEAE Sepharose resulting in two different peaks, named Lip1 and Lip4. Sephadex G-100 size-exclusion chromatography was also performed for further purification of Lip1 and Lip4 and resulted in three different lipases as Lip1-1 (1.0 purification fold with 2.4% recovery), Lip1-2 (0.8 purification fold with 7.2% recovery), and Lip4-1 (1.2 purification fold with 4.5% recovery). As a result of characterization studies of these three lipases resulting from different peaks, optimum temperatures were found as 60 °C, 65 °C, and 65 °C for Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1, respectively. Furthermore, thermal stability studies were conducted at 50 °C, 60 °C, and 70 °C, and lipases of *C. diffluens* D44 maintained over 70% of their initial activity at 50 °C. The optimum pH for Lip1-1 and Lip1-2 was pH 9.0 although pH 5.0 was for Lip4-1. Considering the organic solvent effect on lipase activity, 10% methanol enhanced the relative activity of Lip1-1 and Lip4-1 while 10% ethanol caused a decrease in the relative activity of lipases except for Lip1-2. According to the indicated features based on the results, these different lipases from *C. diffluens* D44 could be promising candidates for industrial and biotechnological applications. To the best of our knowledge, this is the first study on the purification of lipases from *C. diffluens* D44.

Keywords: Lipase, *Cryptococcus diffluens* D44, purification, characterization

Öz

Bu çalışmada, petrol çamurundan izole edilmiş olan *Cryptococcus diffluens* D44'ten lipazların saflaştırılması ve karakterizasyonuna ait ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Saflaştırma çalışmalarında, aseton çöktürmesinin ardından, *C. diffluens* D44'ye ait lipazlar, DEAE Sepharose ile saflaştırılarak iki farklı tepe noktası elde edilmiş, Lip1 ve Lip4 olarak isimlendirilmiştir. Sephadex G-100 boyut ayırma kromatografisi kullanılarak, Lip1 ve Lip4'ün saflaştırılması sonucunda da, Lip1-1 (%2,4 geri kazanım ile 1,0 saflaştırma katında), Lip1-2 (%7,2 geri kazanım ile 0,8 saflaştırma katında) ve Lip4-1 (%4,5 geri kazanımla 1,2 saflaştırma katında) olmak üzere üç farklı lipaz elde edilmiştir. Farklı piklerden elde edilen bu üç lipazın karakterizasyon çalışmaları sonucunda, Lip1-1, Lip1-2 ve Lip4-1 için belirlenen optimum sıcaklıklar sırasıyla 60 °C, 65 °C ve 65 °C olarak bulunmuştur. Ayrıca, termal stabilite çalışmaları 50 °C, 60 °C ve 70 °C'de yürütülmüş, *C. diffluens* D44'ten elde edilen lipazlara ait enzim aktivitesi 50 °C'de başlangıç aktivitesinin %70'inin üzerinde korunabilmiştir. Optimum pH değerlerine bakıldığında, bu değerler, Lip1-1 ve Lip1-2 için pH 9.0 olarak bulunurken, Lip4-1 için pH 5.0 olarak belirlenmiştir. Ayrıca organik çözücülerin lipaz aktivitesi üzerindeki etkileri dikkate alındığında %10 metanol, Lip1-1 ve Lip4-1'in nispi aktivitesini artırırken, %10 etanol ise Lip1-2 dışındaki lipazların nispi aktivitesini azaltmıştır. Çalışmadaki belirlenen özelliklere göre, *C. diffluens* D44'ten elde edilen bu farklı lipazların, endüstriyel ve biyoteknolojik uygulamalar için umut verici adaylar olabileceği düşünülmüştür. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, *C. diffluens* D44'ten lipazların saflaştırılmasına ilişkin ilk çalışma niteliğindedir.

Anahtar Kelimeler: Lipaz, *Cryptococcus diffluens* D44, saflaştırma, karakterizasyon

I. INTRODUCTION

Lipases (EC 3.1.1.3) have the capacity to catalyze the hydrolysis of triacylglycerol to glycerol, and free fatty acids [1, 2]. The lipase enzyme was discovered in 1856 by Claude Bernard in pancreatic juice. Although pancreatic lipases are mostly used to treat digestive problems of humans, shortage of pancreas from animal sources and difficulty in collecting available material prevent the usage of pancreatic lipases in different industrial applications [3]. For that reason, researching other sources for lipases came to the fore in industry and since then, plants and various microbial sources consisting of yeast, fungi, bacteria, and archaea have been evaluated for lipolytic enzymes because of their rapid growth on cheap media giving high yield, more stable, higher yields, and ease of genetic manipulation. Moreover, their enzymes have high substrate specificity to various substrates with the capability of catalyzing diverse reactions including esterifications, transesterifications, and alcoholysis [4-11].

Corresponding Author: Orkun PİNAR, Tel: 0 216 777 3573, e-posta: orkun.pinar@marmara.edu.tr

Submitted: 30.11.2022, **Accepted:** 26.03.2023

Although different types of microorganisms have been evaluated as lipase producers, yeasts are preferable for industrial applications compared to bacteria [12-15]. *Candida rugosa*, the best-known yeast, has been frequently used for lipase synthesis. Moreover, different yeast species such as *Rhizopus*, *Rhizomucor*, other *Candida species*, and *Saccharomycopsis lipolytica* from various sources, have been investigated for their ability to produce lipases [16-18]. For large-scale and commercial lipase production, *Geotrichum candidum* and species belonging to *Candida* genus (*Candida antarctica*, *Candida cylindracea*, *Candida lipolytica*, and *Candida rugosa*), and *Aspergillus* sp., *Rhizomucor* sp., *Rhizopus* sp., *Yarrowia lipolytica*, and *Pseudomonas* sp. are mostly preferred yeast species [17, 19-21].

Besides these species, in 2014, *Cryptococcus diffluens* D44 isolated from petroleum refinery sludge was reported as a newly found lipase producer [22]. After a year, Yılmaz and Sayar [23] studied the characterization of crude D44 lipase having a molecular weight of 45.7 kDa. The optimum pH and temperature of D44 lipase were reported as pH 9.0 and 45 °C, and D44 lipase requires metal ions as co-factors for its activity. Besides these properties, one of the excellent properties of D44 lipase is its extensive stability in organic solvents, mainly 10% methanol.

To understand the lipase synthesized by *C. diffluens* D44, in the present work, D44 lipase was purified by using conventional purification methods. To the best of our knowledge, this is the first study on the purification of lipases from *C. diffluens* D44.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Strain and Chemicals

Cryptococcus diffluens (D44), were kindly supplied from Assoc. Prof. Dr. Hüsnüye Tansel Yalçın (Ege University, Faculty of Science). All chemicals were used in analytical grade and purchased from either Merck (Darmstadt, Germany) or Sigma-Aldrich (St Louis, MO), unless otherwise noted.

2.2 Production of Lipase(s) from *C. diffluens* D44

Preculture medium, containing malt extract (0.3%, w/v), yeast extract (0.3%, w/v), peptone (0.5%, w/v), and glucose (1.0%, w/v), was prepared as 20 mL in 100 mL Erlen-Meyer flask with an initial pH of 6.2. *C. diffluens* D44 stored at -80 °C in glycerol stocks (15%) were first transferred to a preculture medium including 1.5% (w/v) agar with a pH of 6.2 and inoculated at 28 °C for 2 days. After that, the preculture medium was inoculated with a single colony of *C. diffluens* D44 from agar plates and incubated at 28 °C and 180 rpm for 16 h. Yeast cells were then harvested, and the wet cell pellet was used to inoculate the production medium.

For lipase production, basal medium including yeast extract (0.1%, w/v), peptone (3%, w/v), MgSO₄·7H₂O (0.05%, w/v), KH₂PO₄ (0.1%, w/v), and NaNO₃ (0.3%,

w/v) supplied with olive oil (2%, v/v) was used as the production medium [23]. The initial pH of the medium was adjusted to 7.0 using 5 M HCl. All the media were sterilized by autoclave (121 °C for 15 min). The olive oil, was first sterilized by dry heat for 60 min at 180 °C in a drying-oven, was added to the culture medium after cooling [22]. Then, the wet cell pellet was resuspended and transferred to the lipase production medium to adjust the initial optical density (OD) of 1.0 at 600 nm. After 6 days of incubation at 250 rpm and 28 °C, yeast cells were harvested and supernatant including extracellular crude lipase was used in the purification experiments.

2.3. Purification of D44 Lipase(s)

In the first step of the purification, proteins were precipitated by using acetone as an organic solvent. The precipitation with acetone was carried out by using the method of Thermo Scientific "Acetone Precipitation of Proteins" [24]. Firstly, cold (-20 °C) acetone was added to the crude lipase solution in four times volumes of enzyme solution and the mixture was incubated at -20 °C for 1 h. Then, the solution was centrifuged at 13000 g for 15 min and pellets were held at room temperature for 30 min to evaporate the acetone residue. After that, these pellets were dissolved in sodium acetate buffer (50 mM, pH 5.6), and dialyzed against same buffer to remove the acetone residue completely at 4 °C overnight. The dialyzed lipase was stored at 4 °C for further applications.

2.3.1 Ion-exchange chromatography

DEAE Sepharose, a weak anion exchanger, was used to separate proteins based on ionic charges. For ion-exchange chromatography, the column was equilibrated with 5 column volumes (CV) of the binding buffer (Tris-HCl, 50 mM, pH 7.5) and then 10 mL of the concentrated enzyme was loaded onto the DEAE sepharose column and then washed with binding buffer to remove unbound proteins. After that, NaCl gradient elution was applied at a 3 mL/min flow rate using the binding buffer supplemented with 0.1 - 0.5 M of NaCl. During the elution, the fractions were collected, and the protein concentration of the fractions was measured at 280 nm spectrophotometrically. Fractions having higher 280 nm absorbance were applied to the lipase activity assay and active fractions were pooled and dialyzed against sodium acetate buffer (50 mM) at pH 5.6 to remove the NaCl from the enzyme solution. After ion-exchange chromatography, size exclusion chromatography was applied using Sephadex G-100 as the matrix for further purification.

2.3.2 Size exclusion chromatography

Sephadex G-100 was equilibrated with sodium acetate buffer (50 mM) at pH 5.6 for 24 h, and 2 mL of the concentrated enzyme obtained by anion exchange chromatography was loaded onto the size exclusion chromatography column. Fractions were collected at a 0.4 mL/min flow rate and the protein concentration of

the fractions was measured at 280 nm spectrophotometrically. Fractions having higher 280 nm absorbance were applied to the lipase activity assay and active fractions were pooled.

2.4. Determination of Lipase Activity and Protein Concentration

The lipase activity was determined by the method described by Yalçın et al. [22]. For the preparation of pNPP (p-nitrophenyl palmitate) substrate, 30 mg of pNPP was dissolved in 10 mL propan-2-ol which was emulsified in 90 mL of sodium acetate buffer (50 mM and pH 5.6) including 500 mg Triton X-100. 100 μ L enzyme solution and 2 mL of the pNPP containing emulsion were mixed well, and incubated at 37 °C for 3 min, and then, the reaction was stopped using sodium carbonate solution (150 μ L, 1 M). For the enzyme activity calculation, the absorbance was measured at 410 nm spectrophotometrically against the enzyme-free substrate solution as blank. Activity assay was performed with duplicate measurements for each sample. The definition of one unit of lipase activity (U) was the amount of enzyme that liberates one μ mol p-nitrophenyl for one min under the assay conditions. Bradford method [25] was applied for the determination of the protein concentration via developing a curve using series BSA (Bovine Serum Albumin) standards.

2.5. Characterization of Purified Lipase(s)

2.5.1 Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) analysis

SDS-PAGE was performed at 100-110 V for 120 min to represent the protein band(s) belonging to different fractions according to the method of Laemmli [26], using a pair of gels composed of stacking gel and resolving gel with 5% (w/v) and 12% (w/v) monomer concentration, respectively. BIO-RAD Precision Plus Protein Standards All Blue (161-0373) was used as the protein marker. Finally, Coomassie R250 staining was applied to stain the gel in order to visualize proteins in the resolving gel.

2.5.2 Effect of temperature on the activity and stability of purified lipase(s)

For the determination of the optimal temperature of the purified enzyme, the enzyme activity was determined at temperatures ranging between 30 – 70 °C and at pH 5.6. The thermal stability of purified enzymes was determined because of the great importance for industrial applications. The enzyme solution was incubated at 50 °C, 60 °C, and 70 °C, and samples were taken at certain time intervals. These samples were used to determine the residual lipase activity respecting the initial activity, which was taken as 100%, and then the enzyme was assayed.

2.5.3 Effect of pH on purified lipase activity

The optimum pH of the purified lipases was determined at the pH ranges between 4.0 – 10.0. For this pH range,

citrate buffer (50 mM) at pH 4.0, acetate buffer (50 mM) at pH 5.0, phosphate buffer (50 mM) between pH 6.0 and 8.0, glycine-NaOH buffer (50 mM) between pH 9.0-10.0 were used to prepare the substrate solution. The pH, at which the highest lipase activities were obtained, was considered as 100% and the other activities were shown as relative activity.

2.5.4 Effect of organic solvents on lipase activity

The effects of organic solvents on purified lipase(s) were investigated with the addition of ethanol and methanol to the reaction mixture at both 10% and 20% concentrations. Lipase activity assay was performed as 100 μ L enzyme solution and 2 mL of pNPP substrate solution prepared in sodium acetate buffer (50 mM, pH 5.6) containing 10% and 20% organic solvents in concentration were mixed well and reactions were incubated for 3 min at 40 °C. A control, not including organic solvents, was used considering as 100% activity, and activities were calculated as the relative activity.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Purification of *C. diffluens* D44 Lipase(s)

Production, purification, and characterization of new lipases to enhance industrial microbial lipase candidates are crucial since they have extensively been used as biocatalysts in industrial and biotechnological applications [10, 27, 28].

In the present work, for the purification of the extracellular D44 lipase (198 U/mg, 7.9 mg/mL protein), cell-free supernatant was first subjected to acetone precipitation followed by dialysis against sodium acetate buffer (50 mM) at pH 5.6. As seen from Table 1, the lipase produced by *C. diffluens* D44 was precipitated by using acetone with 76.9% yield, 0.9 purification fold, and 170 U/mg specific activity. D44 lipase(s) was enriched by using ion-exchange chromatography and size exclusion chromatography, sequentially.

3.1.1 Ion-exchange chromatography

When DEAE Sepharose chromatographic separation (Figure 1 and Table 1) was applied, two sharp peaks having lipase activity were obtained. The first peak denoted as Lip1, had the highest total activity as 440 U, belonging to the unbound fractions and the second peak denoted as Lip4, had second-highest total activity as 145 U, was obtained after 300 mM NaCl elution. Since DEAE Sepharose is a positively charged resin, this result suggested that D44 lipase in the unbound fraction (Lip1) may carry a net positive charge while the lipase present in Lip4 has negatively charged groups. Elution was also achieved by using 100 mM and 200 mM NaCl solutions. However, these peaks were excluded since enzyme activities in these fractions were low compared to 300 mM NaCl elution. Comparing the total activity and total protein content through Lip1 to Lip4 with

crude enzyme, the purification yield, and fold of the ion exchange column is 44.45% and 0.45, respectively.

As seen in Table 1, Lip1 has 28.1% purification yield and 122 U/mg specific activity while the sharp peak of bound fraction obtained after 300 mM NaCl elution (Lip4) resulted in 9.2% yield and 177 U/mg specific activity. Similar to our work, Syihab et al. [29] studied the purification of lipase from *Pseudoxanthomonas* sp. by acetone precipitation following DEAE Sepharose

fast flow. They obtained two different peaks eluted in sodium phosphate buffer (20 mM) containing 0.4 M and 0.6 M NaCl respectively, after DEAE Sepharose separation. In that study, specific activity, and enzyme recovery of the first peak was 1.7 and 55%, while the second peak gave 2.9 U/mg specific activity and 46% yield. In another study, Jermisuntiea et al. [30] reported that lipase purification of *Mortierella alliacea* resulted as 24% yield and 137 U/mg specific activity as a result of DEAE Sepharose separation.

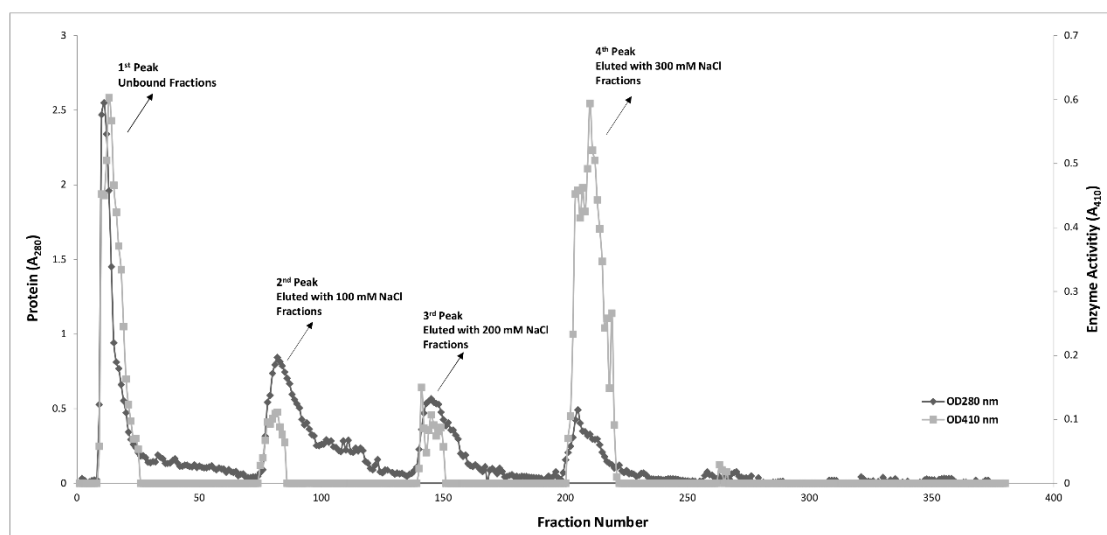


Figure 1. Elution profile of lipase on DEAE Sepharose column

In the study of Ai et al. [31], DEAE Sepharose was used the last purification step as polishing, giving 6.2% recovery with 18.657 U/mg specific activity. Comparing our results with the results obtained by Syihab et al. [29], Jermisuntiea et al. [30], and Hambarliiska et al. [32], our results are very close to their results. Moreover, Das et al. [9] studied the purification of lipase from *Aspergillus tamaris* JGIF06 by using DEAE Sepharose after ammonium sulphate precipitation. Although the purification yield reported for JGIF06 lipase [9] as 43.1% is close to our work, specific activity (260.21 U/mg) of purified lipase from strain JGIF06 is higher than Lip1 and Lip4 of D44 strain.

3.1.2 Size exclusion chromatography

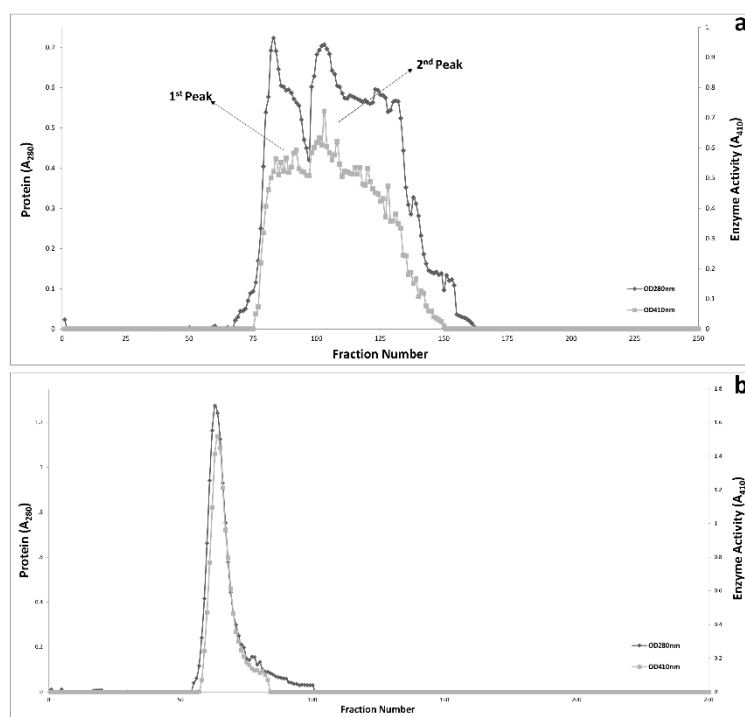
To increase the purity of the lipases, Lip1 and Lip4 were further subjected to size exclusion chromatography (SEC). Results for Sephadex G-100 purified lipase are shown in Figure 2 and Table 2. As seen in Figure 2, proteins in Lip1 were not separated effectively on Sephadex G-100 chromatography and were separated into two different peaks (indicated as

Lip1-1 and Lip1-2 fractions) (Figure 2 (a)) however, the purification of Lip4 by Sephadex G-100 resulted in a single sharp peak (indicated as Lip4-1 fraction) having 243.3 U/mg specific activity, 1.2 purification fold, and 4.5% yield was obtained (Figure 2 (b), Table 2).

Similar to our work, Jermisuntiea et al. [30] and Edupuganti et al. [10] applied size exclusion chromatography followed by acetone precipitation and ion-exchange chromatography for the purification of lipase from *M. alliacea* and *Staphylococcus epidermidis* (MTCC 10656), respectively. As the result of gel filtration chromatography, the specific activity obtained for both *M. alliacea* (179 U/mg) [30] and strain *S. epidermidis* MTCC 10656 (123.95 U/mg) [10] is lower than that obtained for Lip4-1 and Lip1-1, while the specific activity of Lip1-2 is higher than strain MTCC 10656 (123.95 U/mg) [10].

Table 1. Purification Table of *C. diffluens* D44 lipase using anion exchange chromatography

Purification Steps	Total Activity (U)	Total Protein (mg)	Specific Activity (U/mg)	Yield Recovery (%)	Fold
Crude extract	1568	7.9	198	100	1
Precipitated by Acetone & Dialyzed & Ultrafiltrated	1206	7.09	170	76.9	0.9
DEAE 1 st peak-Unbound fractions (Lip1)	440	3.60	122	28.1	0.6
DEAE 4 th peak -Eluted by 300 mM NaCl (Lip4)	145	0.82	177	9.2	0.9

**Figure 2.** Elution profile of a) Lip1 and b) Lip4 on Sephadex G-100

For the purification yield of SEC, 4% yield reported for *M. alliacea* lipase [30] is close to our results while SEC yield of lipase from MTCC 10656 (10) (7.5%) is higher than that obtained for both Lip1-1 and Lip4-1 but very

close to Lip1-2. However, considering the purification process, purification folds of Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 are lower than that obtained for *M. alliacea* [30] as 6.2 and *S. epidermidis* (MTCC 10656) [10] as 18.5.

Table 2. Purification of *C. diffluens* D44 lipase after anion exchange chromatography

Samples	Total Activity (U)	Total Protein (mg)	Specific Activity (U/mg)	Yield Recovery (%)	Fold
Lip1	440	3.6	122	28	0.6
Fraction Lip1-1	38	0.2	190	2.4	1.0
Fraction Lip1-2	113	0.74	153	7.2	0.8
Lip4	145	0.82	177	9.2	0.9
Fraction Lip4-1	70	0.29	243.4	4.5	1.2

3.2. Characterization Studies

3.2.1 SDS-PAGE analysis

To check the purity of the protein bands obtained after SEC, Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 were analyzed by SDS-PAGE electrophoresis (Figure 3). As shown in Figure 3, there were 2 different protein bands in lane 2 (Lip4-1) that one of them was around 75 kDa and the other one was around 50 kDa. Moreover, for unbound fractions subjected to SEC, three different bands were visualized between 50 and 75 kDa in lane 3 (Lip1-1), and five different bands were detected at 25, 37, and 50-75 kDa in lane 4 (Lip1-2). Although the determination of lipase activity in both unbound (Lip1) and bound (Lip4) fractions made us think that D44 has more than one gene that encoded lipases, this result requires further clarification.

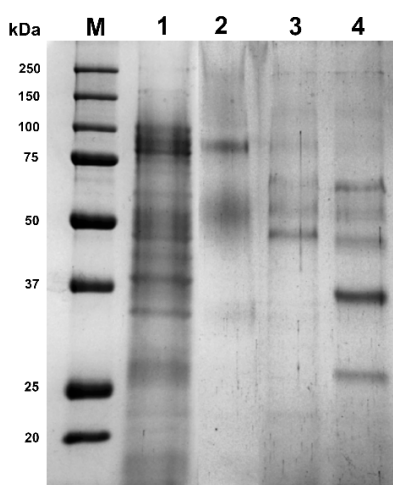


Figure 3. SDS-PAGE gel image represents the bands of lipases after purification steps. **M:** Protein Marker,

Lane 1: Crude lipase, **Lane 2:** Lip4-1 after size exclusion chromatography, **Lane 3:** Lip1-1 after size exclusion chromatography, and **Lane 4:** Lip1-2 after size exclusion chromatography

3.2.2 Effect of temperature on the activity and stability of purified lipase(s)

As seen in Figure 4, the purified lipases of *C. diffluens* D44 (Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1) were active between 30-70 °C. According to these experiments, the optimum temperature for Lip1-2 and Lip4-1 was found as 65 °C, while the optimum temperature for Lip1-1 was 60 °C. They showed thermophilic behaviour under these conditions. Similar to this study, Rade et al. [33] found the optimal temperature of lipase from *Rasamsonia emersonii* at around 65 °C and Syihab et al. [29] reported 70 °C and 50 °C for the optimal temperature of two lipases from *Pseudoxanthomonas sp.*

The effect of temperature on the stabilities of Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 are shown in Figure 5. When the thermal stability of Lip1-1 (Figure 5 (a)), Lip1-2 (Figure 5 (b)), and Lip4-1 (Figure 5 (c)) was

investigated, a 20% decrease in the activity of Lip1-1 was observed at 50 °C during the first 30 min. Then, Lip1-1 keeps its activity for 4 h. However, at 60 °C, and 70 °C, Lip1-1 lost 60% of its activity at 60 °C after 2 h of incubation. Therefore, Lip1-1 is more stable at 50 °C, and the thermal stability is reduced with increasing temperature. Lip1-2 and Lip4-1 showed a similar stability profile to Lip1-1 as they are stable at 50 °C, and their stabilities were decreased at higher temperatures. At 50 °C and 60 °C, Lip4-1 lost 25-30% of its initial activity, then the activity remained constant at a prolonged incubation time. However, the enzyme maintained only 30% of its activity for 30 min of incubation period at 70 °C. According to the thermal stability results of a lipase from *Aspergillus oryzae* ST11 by Paitaid et al. [34], the lipase activity was dramatically decreased after 55 °C, while the residual activity was found as 23% at 65 °C. Moreover, Ayinla et al. [35] reported that a small purified lipase from *Rhizopus oryzae* ZAC3 loses 45% and 78% of its activity after incubation for 90 min and 120 min at 65 °C, respectively. These results are also similar to the thermal stability characteristics of Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 lipases of *C. diffluens* D44.

3.2.3 Effect of pH on lipase activity

According to optimal pH determination, the optimal pH of Lip4-1 was determined at a pH between 4.0-10.0. The optimum pH for Lip1-1 and Lip1-2 was found as 9.0, while the optimum pH for Lip4-1 was 5.0 (Figure 6). Generally, the optimal pH range of yeast lipases is variable between 4.0 – 8.0, however, there are few examples having optimal pH values greater than 9.0 [13]. In the literature, different optimal pH values of lipases from yeast strains were reported. Rade et al. [33] reported a novel lipase from the thermophilic fungus *Rasamsonia emersonii* having higher enzyme activity at acidic conditions as pH 3.5 whereas, five different isolates of *Aspergillus niger* from oilseed had an optimal enzyme activity at pH 7.5 were introduced. Additionally, Syihab et al. [29] studied the effect of pH on two different lipases from *Pseudoxanthomonas sp.* and they found variable optimal pH values between these enzymes as pH of 10.0 and pH of 8.0 for Lip1 and Lip2, respectively.

As the most important part in the study of Yılmaz and Sayar [23], the crude lipase enzyme from D44 has an optimal pH of 9.0, which is similar to that obtained for Lip1-1 and Lip1-2 possesses similar optimal pH and completely different to that obtained for Lip4-1. This is another indication of the synthesis of more than one lipase from *C. diffluens* D44.

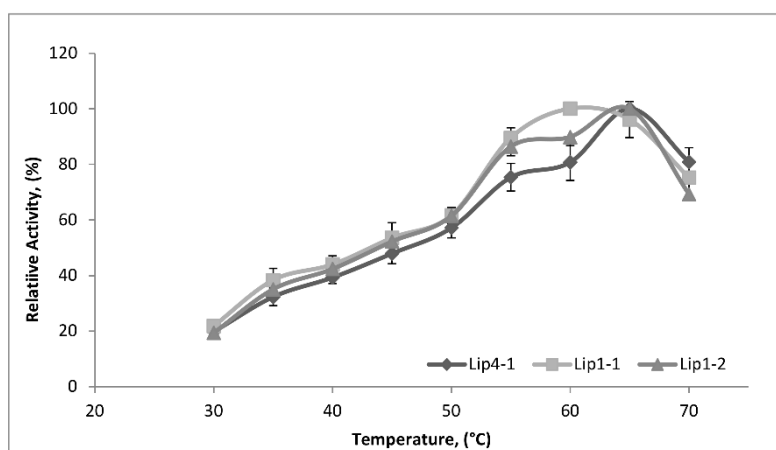


Figure 4. Optimal temperature of Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 lipases

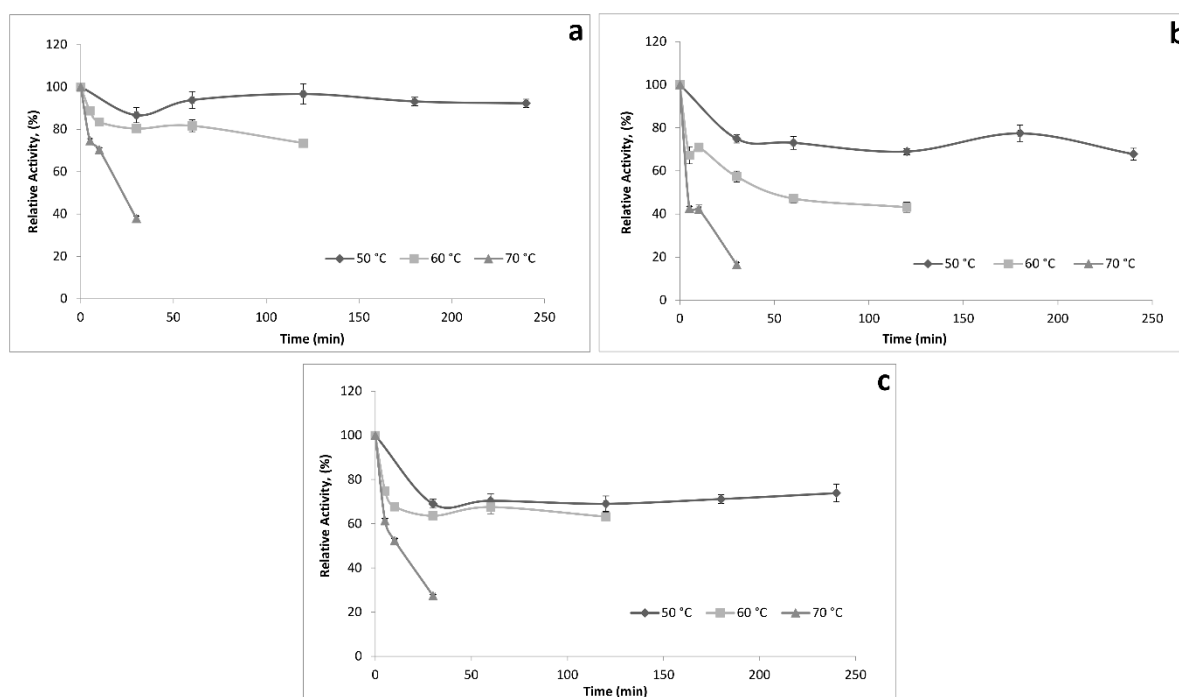


Figure 5. Thermal stability of lipases; a) Lip1-1, b) Lip1-2, and c) Lip4-1

3.2.4 Effect of organic solvent on lipase activity

Since the intense stability of crude *C. diffluens* D44 lipase in ethanol and methanol up to 20% [23] has been proven, the effects of ethanol and methanol on purified D44 lipase(s) were investigated by adding indicated organic solvents to the reaction mixture at 10% and 20% concentrations.

Table 3 represents the organic solvent tolerance of Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 activity. According to the

results from this table, the presence of ethanol decreased the Lip1-1 activity to 83% relative activity at 10% concentration, and at 20% concentration, the activity was completely inhibited. However, in the presence of methanol, it gave a higher relative enzyme activity than ethanol. At 10% methanol concentration, Lip1-1 had 130% relative activity and at 20% methanol concentration, it decreased to 115% relative activity with elevated methanol concentration, but it still had a higher relative activity than the control. When comparing the effects, it could be said that Lip1-1 is

more resistant to methanol than ethanol. Moreover, Lip1-2 is stable in the presence of 10% ethanol and methanol. However, increasing ethanol at a concentration from 10% to 20% caused to loss of whole Lip1-2 activity, while 27% of activity lost was observed by increasing methanol concentration from 10% to 20%. Lip4-1 lost 30% of its activity at a 10% concentration and 61% at a 20% concentration of ethanol. Nonetheless, the presence of methanol did not affect as low as ethanol affected. 10% methanol gave 146% relative activity while 20% methanol resulted in 138% relative activity (Table 3).

Table 3. Effect of organic solvent on Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1

Organic Solvent	Relative Activity (%)		
	Lip1-1	Lip1-2	Lip4-1
0 %, Control	100	100	100
10% Ethanol	83	119	70
20% Ethanol	0	0	29
10% Methanol	130	147	146
20% Methanol	115	73	138

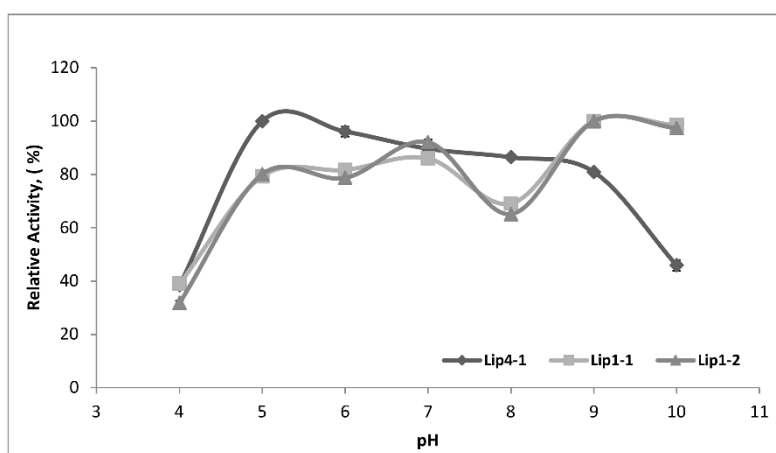


Figure 6. Effect of pH on Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 lipases

D44 lipases were also found to have more tolerance to methanol especially Lip4-1 but, they are not resistant to ethanol at high degrees except Lip1-2 at a 10% concentration of ethanol. Organic solvents generally have inhibitory effects on enzyme activity by denaturation of amino acid sequences and this was proved by Hernández-Rodríguez et al. [36] that lipase activities from *Rhizopus sp.* were decreased in the presence of isopropanol and ethanol. Comparing our results with the results reported for crude D44 lipase, contrary to Lip4-1, 10% and 20% ethanol enhanced the activity of crude D44 lipase [23].

IV. CONCLUSION

Recently, microbial lipases have become popular, and they are widely used in various industrial areas due to their regio-, chemo-, and enantioselectivity characteristics to different substrates. With the development of biochemistry and enhanced engineering applications on biology, the usage of lipases has opened remarkable opportunities in biotechnological applications for both research and industry. To develop an enzyme for industrial applications, it is necessary to know the structure of the enzyme. However, for known and new lipases, there is

limited information available about their characteristics.

Therefore, in the present work, lipase(s) produced by *C. diffluens* D44 were purified and analyzed. Our results suggested that *C. diffluens* D44 might produce at least two different lipases having negatively (Lip4) and positively charged (Lip1) groups since lipase activity was observed in both bound and unbound fractions of DEAE Sepharose chromatography. Three purified lipases from *C. diffluens* D44, Lip1-1, Lip1-2, and Lip4-1 are strongly resistant to high temperatures between 50 °C and 60 °C. Thus, this property makes these enzymes promising candidates not only for the detergent and food industry but also for biodiesel production because of their enhanced relative activity in the presence of methanol. Although relatively lower purity and yield were obtained compared to literature data, our results proposed that *C. diffluens* D44 produced different types of lipases having negatively and positively charged groups since lipase activity was observed in both bound and unbound fractions. Additionally, according to size-exclusion chromatography results, *C. diffluens* D44 has different genes that can encode different lipases (isozymes).

Nonetheless, D44 lipases and peptides that belong to these three lipases should be examined with additional detailed work to gain information about the structure and function of these superior methanol-stable D44 lipases. To the best of our knowledge, a limited number of studies have been achieved in terms of the structural characterization of lipases however this is the first research where the lipases from *Cryptococcus diffluens* D44 were purified, which is the first step in understanding the structural and biochemical characteristics of the enzyme.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to show our appreciation to Prof. Dilek Kazan (Department of Bioengineering, Marmara University) for her guidance and support with the present work. This work was supported by Marmara University, Scientific Research Projects Committee [grant number FEN-C-YLP-141118-0594].

REFERENCES

- [1] Saraswat, R., Bhushan, I., Gupta, P., Kumar, V., and Verma, V. (2018). Production and purification of an alkaline lipase from *Bacillus* sp. for enantioselective resolution of (\pm)-Ketoprofen butyl ester. **3 Biotech**, 8(12), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1506-6>
- [2] Priyanka, P., Kinsella, G., Henehan, G.T., and Ryan, B.J. (2019). Isolation, purification and characterization of a novel solvent stable lipase from *Pseudomonas reinekei*. **Protein Expr. Purif.**, 153, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2018.08.007>
- [3] Hasan, F., Shah, A.A., and Hameed, A. (2006). Industrial applications of microbial lipases, **Enzyme Microb. Technol.**, 39(2), 235–251. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.10.016>
- [4] Del Hierro, J.N., Gutiérrez-Docio, A., Otero, P., Reglero, G., and Martin, D. (2020). Characterization, antioxidant activity, and inhibitory effect on pancreatic lipase of extracts from the edible insects *Acheta domesticus* and *Tenebrio molitor*. **Food Chem.**, 309, 125742. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125742>
- [5] Singh, R.S., Singh, T., and Singh A.K. (2019). Biomass, Enzymes as diagnostic tools. In: Biofuels, Biochemicals: Advances in Enzyme Technology, R.S. Singh, R.R. Singhania, A. Pandey, C. Larroche (ed.), 1st edition, Elsevier, Netherlands, p. 225–271. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64114-4.00009-1>
- [6] Al-Zuhair, S. (2011). Biochemical catalytic production of biodiesel. In: Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies, R. Luque, J. Campelo, J. Clark (ed.), 1st edition, Woodhead Publishing, Elsevier Inc., Cambridge, p. 134–159. <https://doi.org/10.1533/9780857090492.2.134>
- [7] Anbu, P. (2013). Characterization of an Extracellular Lipase by *Pseudomonas koreensis* BK-L07 Isolated from Soil. **Prep. Biochem. Biotechnol.**, 44(3), 266-280. <https://doi.org/10.1080/10826068.2013.812564>
- [8] Priji, P., Unni, K.N., Sajith, S., Binod, P., and Benjamin, S. (2015). Production, optimization, and partial purification of lipase from *Pseudomonas* sp. strain BUP6, a novel rumen bacterium characterized from Malabari goat. **Biotechnol. Appl. Biochem.**, 62(1), 71-78. <https://doi.org/10.1002/bab.1237>
- [9] Das, A., Shivakumar, S., Bhattacharya, S., Shakya, S., and Swathi, S.S. (2016). Purification and characterization of a surfactant-compatible lipase from *Aspergillus tamaris* JGIF06 exhibiting energy-efficient removal of oil stains from polycotton fabric. **3 Biotech**, 6(131), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0449-z>
- [10] Edupuganti, S., Parcha, L., and Mangamoori, L.N. (2017). Purification and Characterization of Extracellular Lipase from *Staphylococcus epidermidis* (MTCC 10656). **J. Appl. Pharm. Sci.**, 7(1), 57-63. <https://doi.org/10.7324/JAPS.2017.70108>
- [11] Rios, N.S., Pinheiro, B.B., Pinheiro, M.P., Bezerra, R.M., dos Santos, J.C., Gonçalves, L.R. (2018). Biotechnological potential of lipases from *Pseudomonas*: Sources, properties and applications, **Process Biochem.**, 75, 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.09.003>
- [12] Kademi, A., Lee, B., and Houde, A. (2003). Production of heterologous microbial lipases by yeasts. **Indian J. Biotechnol.**, 2, 346-355.
- [13] Vakhlu, J., and Kour, A. (2006). Yeast lipases: enzyme purification, biochemical properties and gene cloning. **Electron J.**, 9(1), 717–3458. <https://doi.org/10.2225/vol9-issue1-fulltext-9>
- [14] Cesário, L.M., Pires, G.P., Pereira, R.F., Fantuzzi, E., da Silva Xavier, A., Cassini, S.T., and de Oliveira, J.P. (2021). Optimization of lipase production using fungal isolates from oily residues. **BMC Biotechnol.**, 21, 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12896-021-00724-4>
- [15] Szymczak, T., Cybulska, J., Podleśny, M., and Fraç, M. (2021). Various perspectives on microbial lipase production using agri-food waste and renewable products. **Agriculture**, 11 (6), (2021), 540. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060540>
- [16] Patel, R.N. (2008). Synthesis of chiral pharmaceutical intermediates by biocatalysis. **Coord. Chem. Rev.**, 252(5), 659-701. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2007.10.031>
- [17] Singh, A.K., and Mukhopadhyay, M. (2012). Overview of fungal lipase: a review. **Appl. Biochem.**, 166(2), 486-520. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9444-3>
- [18] Navvabi, A., Razzaghi, M., Fernandes, P., Karami, L., and Homaei, A. (2018). Novel lipases discovery specifically from marine organisms for

- industrial production and practical applications. *Process Biochem.*, 70, 61-70. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.04.018>
- [19] Mishra, S., and Baranwal, R. (2009). Yeast genetics and biotechnological applications. In: T. Satyanarayana, G. Kunze (ed.), *Yeast biotechnology: diversity and applications*, Springer, Dordrecht, p. 323-355. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8292-4>
- [20] Silveira, E.A., Tardioli, P.W., and Farinas, C.S. (2016). Valorization of palm oil industrial waste as feedstock for lipase production. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 179(4), 558-571. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2013-z>
- [21] Guerrand, D. (2017). Lipases industrial applications: Focus on food and agro industries. *OCL - Oilseeds fats Crops Lipids*, 24(4), D403.
- [22] Yalçın, H.T., Çorbacı, C., and Ucar, F.B. (2014). Molecular characterization and lipase profiling of the yeasts isolated from environments contaminated with petroleum. *J. Basic. Microbiol.*, 54, S85-S92. <https://doi.org/10.1002/jobm.201300029>
- [23] Yılmaz, D.E., and Sayar, N.A. (2015). Organic solvent stable lipase from *Cryptococcus diffluens* D44 isolated from petroleum sludge. *J. Mol. Catal.*, 122, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2015.08.021>
- [24] Thermo Fisher Scientific, Acetone Precipitation of Proteins, <https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/TR0049-Acetone-precipitation.pdf> (2009).
- [25] Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72(1-2), 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- [26] Laemmli, U.K. (1970). Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, 227(5259), 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
- [27] Palekar, A.A., Vasudevan, P.T., and Yan, S. (2000). Purification of Lipase: A Review. *Biocatal. and Biotransfor.*, 18(3), 177-200. <https://doi.org/10.3109/10242420009015244>
- [28] Ezema, B.O., Omeje, K.O., Bill, R.M., Goddard, A.D., Eze, S.O.O., and Fernandez-Castane, A. (2023). Bioinformatic characterization of a triacylglycerol lipase produced by *Aspergillus flavus* isolated from the decaying seed of *Cucumeropsis manni*. *J. Biomol. Struct. Dyn.*, 41(6), 2587-2601. <https://doi.org/10.1080/07391102.2022.2035821>
- [29] Syihab, S.F., Madayanti, F., Akhmaloka, A., and Widhiastuty, M.P. (2017). Purification and characterization of thermostable and alcohol tolerant lipase from *Pseudoxanthomonas* sp. *Afr. J. Biotechnol.*, 16(31), 1670-1677. <https://doi.org/10.5897/AJB2017.16044>
- [30] Jermisuntiea, W., Aki, T., Toyoura, R., Iwashita, K., Kawamoto, S., and Ono, K. (2011). Purification and characterization of intracellular lipase from the polyunsaturated fatty acid-producing fungus *Mortierella alliae*. *New Biotechnol.*, 28, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2010.09.007>
- [31] Ai, L., Huang, Y., and Wang, C. (2018). Purification and characterization of halophilic lipase of *Chromohalobacter* sp. from ancient salt well. *J. Basic Microbiol.*, 58(8), 647-657. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800116>
- [32] Hambarliiska, A.P., Dobрева, V.T., H.N. Strinska, B.Y. Zhekova, and G.T. Dobrev, Isolation and purification of lipase produced from *Rhizopus arrhizus* in solid state fermentation by fractional precipitation. *Bulg. Chem. Commun.*, 51, 184-188.
- [33] Rade, L.L., Da Silva, M.N., Vieira, P.S., Milan, N., De Souza, C.M., De Melo, R.R., Klein, B.C., Bonomi, A., de Castro, H.F., Murakami, M.T., and Zanphorlin, L.M. (2020). A novel fungal lipase with methanol tolerance and preference for macaw palm oil. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8, 304. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00304>
- [34] Paitaid, P., Buatong, J., Phongpaichit, S., and Aran, H. (2021). Purification and characterization of an extracellular lipase produced by *Aspergillus oryzae* ST11 as a potential catalyst for an organic synthesis. *Trends in Sci.*, 18(21), 45. <https://doi.org/10.48048/tis.2021.45>
- [35] Ayinla, Z.A., Ademakinwa, A.N., Gross, R.A., and Agboola, F.K. (2022). Biochemical and biophysical characterisation of a small purified lipase from *Rhizopus oryzae* ZAC3, *Biocatal. Biotransfor.*, 40(3), 195-208. <https://doi.org/10.1080/10242422.2021.1883006>
- [36] Hernández-Rodríguez, B., Córdova, J., Bárzana, E., and Favela-Torres, E. (2009). Effects of organic solvents on activity and stability of lipases produced by thermotolerant fungi in solid-state fermentation. *J. Mol. Catal.*, 61(3-4), 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2009.06.004>

Otomatik Depolama Vincinin Titreşiminin İleri Besleme Kuvveti ile Kontrolü ve Endüstriyel Alanda Uygulanması

Stacker Crane Vibration Control with Feedforward Force and Application in Industry

İ. Sina KUSEYRİ¹ 

¹Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Yapılan çalışmada depolama sistemlerinde kullanılan otomatik depolama vincinin titreşiminin kontrol edilmesi ve bu sayede ürün alma bırakma zamanının azaltılması için sisteme girilen sinyalin ileri besleme kontrolü ile uygulanması incelenmiştir. Kontrol edilmesi amaçlanan otomatik depolama vinci için yapının indirgenmiş bir modeli belirlenmiş ve buna uygun bir matematik model ortaya koyulmuştur. Kontrol edilecek sistem tek ekseninde çalışmakta ve bu eksen tek bir motor kontrol etmektedir. Sistemin aldığı komuta göre takip edeceği trapezoid biçimdeki yörünge planlaması tasarlanan bir algoritma ile belirlenmiştir. Algoritmaya girilen konum, hız, ivme ve jerk değerleriyle ve algoritmadan jerk türevi çıktısı alınmıştır. Sisteme giren jerk türevi komutu, asenkron motora tork komutu olarak girilmiş ve diğer hatalar PID geri-beslemeli kontrol ile azaltılmıştır. Sistemin Simulink ortamında modeli hazırlanmış, örnek bir 10 metrelik komut ile sistem simülasyonu yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Otomatik depolama cihazı, titreşim kontrolü, depolama, ASRS

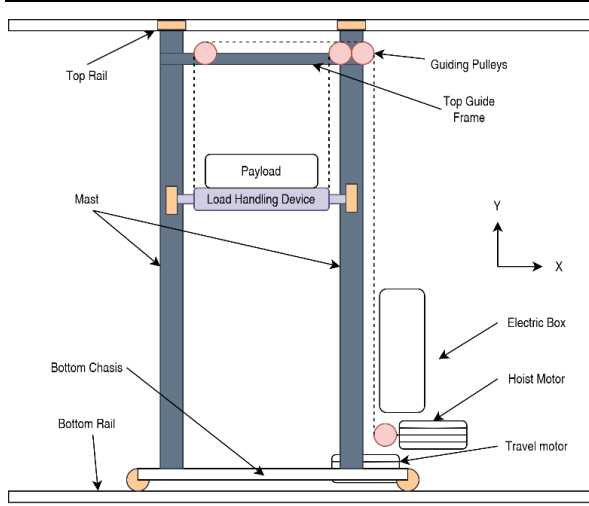
Abstract

In this paper we study the feed-forward control of vibrations in the ASRS stacker crane, hence reducing the pick & place time of the payload that it is carrying. The stacker crane structure in our study has been simplified and an expedient mathematical model has been presented. In accordance with the reference command signal, a trapezoidal trajectory to follow is constructed by an algorithm. With the position, velocity, acceleration and jerk inputs to the algorithm, the derivative of the jerk is taken as an output. The jerk derivative command translates as a torque command to the asynchronous motor and errors are reduced by PID feed-back control. The model of the system is constructed in the Simulink environment, and the system was simulated with a sample 10-meter displacement command.

Keywords: Stacker crane, vibration control, storage, ASRS

I. GİRİŞ

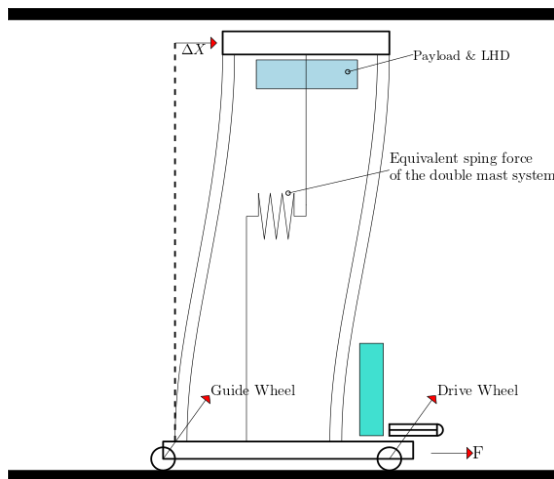
Otomatik depolama sistemleri, günümüzün hızla artan lojistik ihtiyacına bağlı olarak, kullanımı günden güne artmak zorunda olan kritik robotik sistemler arasında yer almaktadır. Depolama sistemlerinde ürünlerin teslim alınması, yerleştirilmesi, sayımı, toplaması, kontrolü ve gönderilmesi gibi adımlar yer almaktadır. Otomatik depolama sistemleri sayesinde depolarda harcanan ölü alanlar azaltılmakta, operatör hatalarının önüne geçilebilmekte ve standart forklift sistemlerinin ulaşamayacağı yüksekliklerde yüksek kapasiteli depolama yapılabilmektedir. Kurulan depolar, sistemden alınması beklenen saatlik ürün transferi sayısına göre çeşitli konfigürasyonlarda tasarlanabilir ve buna göre uygun robotik sistemler sisteme entegre edilir. Standart depolarda istenilen yüksek taşıma kapasiteleri (+500 kg), hızlar (+4 m/s) ve ivmelenmeler (+2 m/s²) sebebiyle yapıda oldukça yüksek dinamik yükler ortaya çıkmaktadır. Yatırım maliyetlerini mümkün olduğunca azaltmak için, robotik sistemin kule tasarımında direngenliğin azaltılması durumuyla karşı karşıya kalınmakta ve bu sebeple sistemde yüksek titreşimler meydana gelmektedir.



Şekil 1. Otomatik depolama vinci bileşenleri

Her gün şehirlerdeki alanlar daha değerli hale geldiğinden doğal olarak depolama alanları da kısıtlı alanlarda yüksek yapılar haline gelmiştir. Bugüne kadar birçok çalışmada otomatik depolama vinçlerinin titreşimi üzerine çalışılmış çeşitli modeller ve kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Otomatik depolama vinci temelde bir kiriş olduğundan, çoğu araştırmada sistem bölümlendirilmiş bir kiriş olarak incelenmiştir. Post ve arkadaşları, eğer titreşim azaltıcı komutlar yaratılabilirse, esnek modellenen bir sistemin davranışının performansının artırılabilceğini ortaya koymuşlardır [1]. Staudecker ve arkadaşları, zaman optimal bir yörünge takip etmesi hedefiyle, düzlemsel diferansiyel kontrol teorisi kullanarak sistemi açık çevrim döngüyle kontrol etmişlerdir [2]. Otomatik depolama vinci için çift kuleli kontrolü üzerine çalışan tek çalışma ise Sasaki [3] tarafından yapılmıştır. Çalışmasında sistemin modellenmesi ve Lyapunov teorisini kullanarak kararlı bir kontrolcü tasarlanması alanlarında sonuçlar ortaya koymuştur.

II. SİSTEMİN MODELLENMESİ



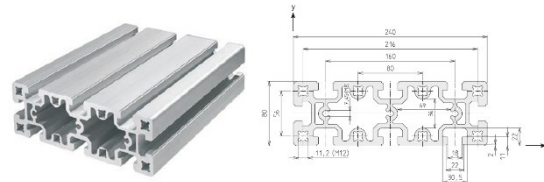
Şekil 2. Sistemin deformasyon modeli

Çift kule yapısına sahip otomatik depolama vinci için dinamik modeli sistemin katılığı bulunarak ortaya koyulabilir. Sistem modellenirken yük taşıma cihazının en üst pozisyonda bulunduğu kabul edilmiştir. Modelleme sırasında yapının toplam kinetik enerjisinin sabit kalması göz önünde bulundurularak kulelerin ağırlığı sistemin en üst noktasına indirgenmiş ve Şekil 2 de belirtildiği üzere sistem alt yapıyı, en üste indirgenmiş kütleyle bağlayan bir yay olduğu kabul edilerek modellenmiştir.

Sistemin yatay direngenliği iki kulenin toplam direngenliğine eşit olacaktır. Kuleler birbirine paralel olarak yerleştirildiği düşünülürse sistemin toplam direngenliği tek bir kulenin direngenliğinin iki katı olacaktır. Kulelerin her biri en üst noktasından birbirine bağlandığından, dönme oluşmuyor olarak kabul edilebilir. Yani her bir kule iki ucu sabitlenmiş bir kiriş olarak modellendiğinde direngenliği aşağıdaki gibi verilmektedir [4].

$$k = \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad (1)$$

Kulelerin oluşturulmasında aşağıda belirtilen özelliklere sahip profiller, sistemin yük taşıma aygıtının yönlendirici ekipmanlarının yerleştirme kolaylığı olması, hafifliği ve genel kullanım kolaylığı sebebiyle seçilmiştir.



Şekil 3. Kulede kullanılan profil Rose+Kriger D-80x240 Alüminyum Sigma Profil

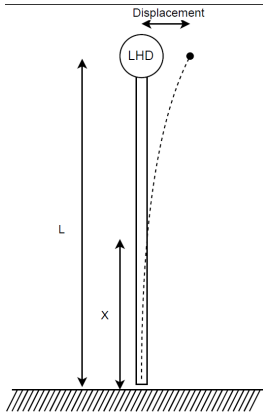
2.1. Yapının toplam direngenliğinin hesaplanması

Kullanılan profilin güçlü kesitinin atalet momenti $4268,2 \text{ cm}^4$ ve kütlesi 20 kg/m olarak verilmiştir. Profil sistemin hareket doğrultusunda güçlü yönde yerleştirildiğinde sistemin toplam yatay direngenlik katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır. Kulenin yüksekliği 7000 mm olarak alınmıştır.

$$k_{\text{kiriş}} = 104.52 \text{ kN/m} \quad (2)$$

$$k_{\text{esdeğer}} = k_1 + k_2 = 209 \text{ kN/m} \quad (3)$$

Sistemin Şekil 4'te görüldüğü gibi noktasal kütleyle indirgenmesi için Rayleigh teoremi kullanılabilir. Yük taşıma cihazı ile birlikte kulenin yayılı ağırlığının tek bir noktaya toplanması gerekmektedir.



Şekil 4. Yapının indirgenmiş modeli

Sistemdeki enerjilerin korunumu göz önünde bulundurulduğunda, şekil değiştirmeden yola çıkılarak indirgeme sağlanabilir.

$$KE = \frac{1}{2} m \cdot \dot{\delta}^2(L) \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde δ yer değiştirmeyi ve KE ise kinetik enerjiyi ifade eder.

$$\dot{\delta}(x) = \frac{x}{L} \dot{\delta}(L) \quad (5)$$

Otomatik depolama makinesinde kulenin ağırlığı yapının ağırlığının büyük bir bölümünü oluşturduğundan ihmal edilemez. Sistemdeki yer değiştirme kulenin en üst kısmına kadar lineer olduğu kabul edilirse, toplam kinetik enerji (KE'):

$$KE' = \frac{1}{2} M_{LHD} \dot{\delta}^2(L) + \frac{1}{2} \int_0^L \rho \dot{\delta}(x) dx \quad (6)$$

(5) denklemi kullanılıp, düzenlenirse;

$$KE' = \frac{1}{2} \left(M_{LHD} + \frac{\rho \cdot L}{2} \right) \dot{\delta}^2(L) \quad (7)$$

Elde edilen denklemde görüldüğü gibi kulenin ağırlığı noktaya indirgenmiştir. Yük taşıma cihazının ağırlığı 300 kg alındığında noktasal kütle indirgenmiş ağırlığı 346 kg olarak bulunur.

2.2. Matematiksel Modelin Oluşturulması

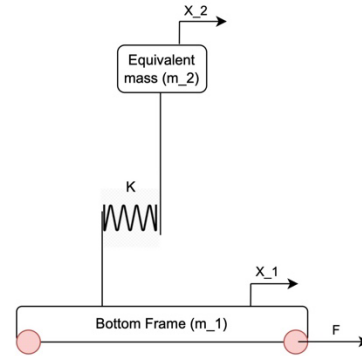
x_1 ve m_1 , x_2 ve m_2 , sırasıyla alt ve üst kütlelerin, konum ve ağırlıklarını ifade eder. Sistem dinamiği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k(x_1 - x_2) + F. \quad (8)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k(x_1 - x_2) \quad (9)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{-k(x_1 - x_2)}{m_1} + \frac{F}{m_1} \quad (10)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{k(x_1 - x_2)}{m_2} \quad (11)$$



Şekil 5. Eşdeğer kütle ve yayla hareket

2.3. Doğal Frekansların Belirlenmesi Sistemin doğal frekanslarının bulunması rezonansın engellenmesi açısından oldukça önemlidir. Denklem (8) ve (9) düzenlenirse

$$m_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x_2) = F \quad (12)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k(x_1 - x_2) = 0 \quad (13)$$

Elde edilen denklemler serbest titreşim için analiz edildiğinde

$$x_1 = a_1 \sin(\omega t - \alpha) \quad (14)$$

$$x_2 = a_2 \sin(\omega t - \alpha) \quad (15)$$

İvmelenme için konum denklemlerin çift türevi alınır.

$$\ddot{x}_1 = -a_1 \omega^2 \sin(\omega t - \alpha) \quad (16)$$

$$\ddot{x}_2 = -a_2 \omega^2 \sin(\omega t - \alpha) \quad (17)$$

Denklemler matris formuna dönüştürüldüğünde;

$$\begin{bmatrix} k - m_1 \omega^2 & -k \\ -k & k - m_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Sıfır olmayan vektör durumunda determinantı sıfır yapan pozitif değerler aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\begin{vmatrix} k - m_1 \omega^2 & -k \\ -k & k - m_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$m_1 m_2 \omega^4 - \omega^2 (m_1 k + m_2 k) = 0 \quad (20)$$

m_1 kütlelerinin ağırlığı 800 kg olarak belirlenmiştir, m_2 indirgenmiş kütlesi ise 346 kg olarak bulunmuştur. Yerine koyulduğunda, sistemin doğal frekansı tek bir değer olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\omega = 29.41 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (21)$$

$$f = 4.68 \text{ Hz} \quad (22)$$

III. KONTROL ALGORİTMASI

Sistemin kontrol edilebilmesi için elde edilen sistem dinamiği denklemleri kullanılarak durum-uzay yapısı oluşturulmuştur.

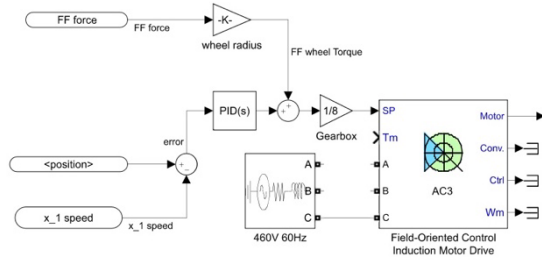
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(x) \quad (23)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k}{m_1} & \frac{k}{m_1} & 0 & 0 \\ \frac{k}{m_2} & -\frac{k}{m_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (25)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

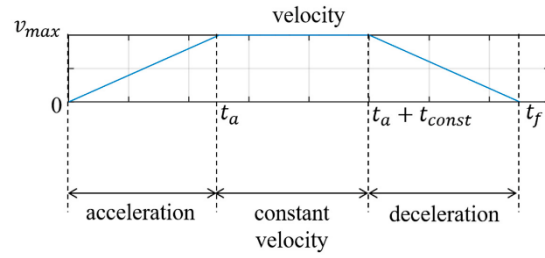
A matrisi sistem dinamiğini, B matrisi giriş ilişkisini ve C matrisi ise ölçümleri temsil eder. Sistemin tek giriş sinyali alt gövdeye bağlı olan motor redüktör ile sağlanır. Motorda oluşturulan tork teker sayesinde sistemi ileri itme kuvvetine dönüştürür. Kontrol modeli Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Kontrol yapısı

Motor iç çevrimde tork modunda sürülmektedir. Dış çevrimde ise yapılan ölçümün geri beslenmesi ile çalıştırılan PID kontrol bloğu görülmektedir. Motor giriş sinyali iki kısımdan oluşmaktadır. İlki Madde IX'da belirtilen ileri besleme kuvvetinin teker yarıçapı ile çarpıldığı bir kazanç bloğundan motora verilmektedir. İkincisi ise yapılan ölçümün ileri-besleme bloğunda hesaplanan referans değerden çıkartılması ile elde edilen hata sinyalinden oluşmaktadır.

3.1. Yörünge Oluşturulması



Şekil 7. Trapezoid hız profili

Otomatik depolama vinci ürünleri alma&bırakma komutlarını ana işlemciden almaktadır. Sisteme komut geldiğinde, hareket etmesi gerekli olan mesafe hesaplanıp bir yörünge oluşturulur. Sistemin yörünge planlamasında, endüstriyel sistemlerde sıklıkla kullanılan trapezoid hız profili kullanılmıştır.

Kullanılan trapezoid profilde jerk ve ivme sonsuz büyüklükte kullanıldığından, hız profilinde keskin köşeler oluşmakta ve bu da sistemde titreşimlere sebep olmaktadır. Gerçekliğe yaklaşmak için sistem yörüngesi jerk'ün türevi kullanılarak oluşturulmaktadır. Jerk ve jerk'in türevini sınırlayan parametre motor kontrolcüsüdür. Sistemde kullanılan motor kontrolcüsüne göre bu sınırlar sırasıyla 500 m/s³ ve 30 m/s⁴ olarak belirlenmiştir. Sistemin ivme ve hızını ise kullanılan motor, redüktör ve teker çapı belirlemektedir. Motor gücüne göre sistem ivmesi, devrine göre sistem hızı belirlenir. İvme ve hız sırasıyla 3 m/s² ve 5 m/s olarak alınmıştır.

Sistemdeki jerk'ün türevinin oluşturulmasında ve Simulink hesaplamalarında [5] kullanılmıştır. Trapezoid hız profilinde 15 kez jerk türevi sinyali değişimi vardır, bu sinyallerin zaman aralıkları sistem üst limitleri ile belirlenir. Örnek olarak, $t_0 - t_1$ zaman aralığının hesaplanması aşağıdaki gibi yapılır. Diğer zaman aralıklarının hesaplanması hakkında detaylı bilgi için [5]'e bakılabilir.

$$j(t) = d_0 + j_0 \quad (27)$$

$$a(t) = \frac{1}{2}d_0t^2 + j_0t + a_0 \quad (28)$$

$$v(t) = \frac{1}{6}d_0t^3 + \frac{1}{2}j_0t^2 + a_0t + v_0 \quad (29)$$

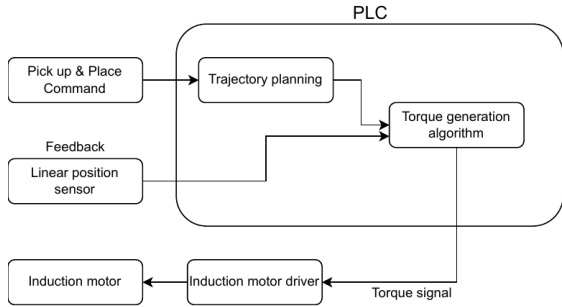
$$x(t) = \frac{1}{24}d_0t^4 + \frac{1}{6}j_0t^3 + a_0t^2 + v_0t + x_0 \quad (30)$$

3.1. İleri Besleme Kuvvetinin Hesaplanması

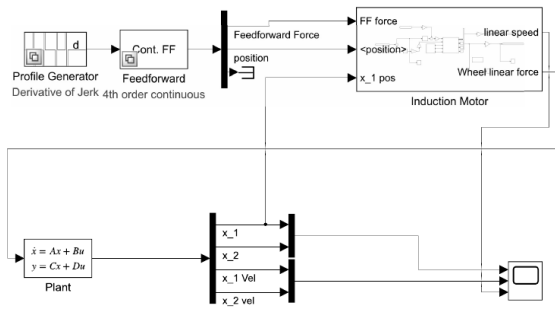
Sistemin titreşiminin azaltılması için ileri besleme kuvveti sistem dinamikleri denklemlerinin Laplace dönüşümleri kullanılır [5].İleri beslemeli kontrolcünün tasarımına temel teşkil eden transfer fonksiyonu aşağıda verilmektedir.

$$F = \frac{1}{k} \cdot \{m_1 m_2 \cdot s^4 + (m_1 + m_2)k \cdot s\} \cdot x_2 \quad (31)$$

3.2. Simulink Modeli



Şekil 8. Kontrol akış şeması



Şekil 9. Simulink modeli

Şekil 8 ve Şekil 9 'da görüldüğü gibi sistem, aldığı alma/bırakma komutunu ve ekseninde bulunan konum sensörünü kullanarak, PLC ile birlikte motora sürücüsüne girecek olan tork sinyalinin oluşturur. Otomatik depolama sistemlerinde daha önce yapılan çalışmalarda motor ihmal edilmiş olup, bu çalışmada endüstriyel alana yönelik yapıldığından motorun nasıl kullanılmasının açıklanması büyük önem taşır. Sistemde Simulink'de bulunan AC3 motor ve sürücü kullanılmıştır. FOC (Field Oriented Control) algoritması kullanılan bu sürücüye sistem içinde yaratılan tork sinyali giriş olarak verilmiş, çıkışında motor gücü ve açısal hızı alınmıştır. Motor çıkışında kullanılan redüktör ve teker, kazanç olarak sisteme eklenmiş, bu sayede motor torku lineer güce ve hıza çevrilmiştir.

3.3. Bant Durduran (Notch) Filtre Tasarımı

Kontrol komutları mükemmel modellenmiş otomatik depolama vinci için oluşturulmuştur. Ancak, gerçek şartlarda, malzeme özelliklerindeki farklılıklar, üretim hataları, sürtünme ve kılavuz rayın düzgünsüzlüğü gibi bozucu etkiler nedeniyle sistemde titreşimler oluşabilir. Bu etkilerden biri veya birkaçı otomatik depolama vincinin rezonans frekansında bulunan bir giriş oluşturabilir. Sistemin doğal frekansıyla aynı frekansta

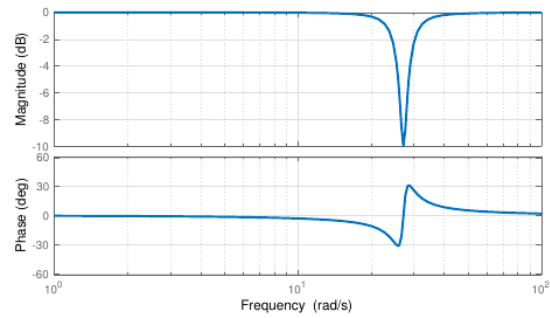
oluşan bu etkinin kontrolcüye girmesini engellemek oldukça önemlidir, aksi takdirde sistemin daha fazla uyarılmasına ve rezonansa girmesine neden olabilir.

Kritik frekanstaki sinyallerin kontrolcüye girişini engellemek için bant durduran filtre tasarımı yapılmıştır. Kontrolcüye giren sinyalin filtrelenmesiyle sistemin muhtemel rezonansı engellenmiştir. Bant durduran filtrenin kısıtladığı merkez frekans Bölüm 2.3'de analizi yapılan sistemin doğal frekansdır $(29.41 \frac{rad}{sn})$.

Filtre için oluşturulan transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

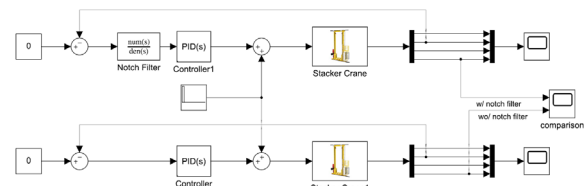
$$\frac{s^2 + 1.532s + 739.8}{s^2 + 4.846s + 739.8} \quad (32)$$

Tasarlanan filtrenin Bode grafiği aşağıdadır.



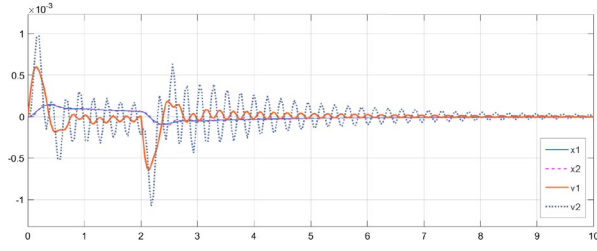
Şekil 10. Bant durduran filtre Bode grafiği

Tasarlanan filtrenin testi Şekil 11'de gösterilen şekilde Simulink ortamında yapılmıştır.

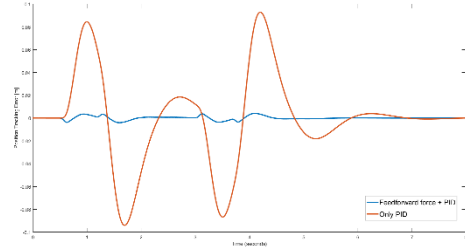


Şekil 11. Bant durduran filtre testi için hazırlanan Simulink modeli

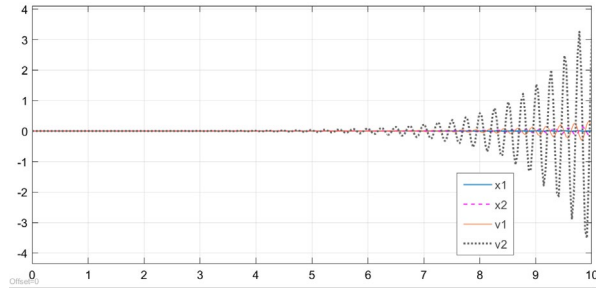
Filtre kullanılan ve kullanılmayan sistemlerin cevabı Şekil 12 ve Şekil 13'de yer almaktadır.



Şekil 12. Bant durduran filtre bulunan sistemin giriş sinyaline cevabı



Şekil 15. Yük taşıma aygıtı yörünge takibi hatası

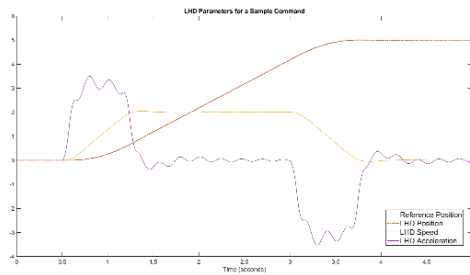


Şekil 13. Bant durduran filtre bulunmayan sistemin giriş sinyaline cevabı

IV. SONUÇLAR

Sistemin performansı yük taşıma aygıtının ne kadar kısa sürede verilen konuma oturduğu ile ölçülmektedir. Alma bırakma işlemi sırasında istenen maksimum yer değiştirme $\pm 1 \text{ mm}$ olduğundan, sistemin bu değerin altına en hızlı şekilde inmesi gerekmektedir.

Şekil 14 'de görüldüğü gibi sistem verilen hız yörüngesine minimal bir hatayla oturmaktadır.



Şekil 14. Yük taşıma aygıtı yörünge takibi

Sistemin ileri beslemesiz versiyon ile karşılaştırılması için sadece PID ve PID+İleri-besleme yörünge takip hataları Şekil 15'te belirtilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] Post, B., Mariuzza, A., Book, W. & Singhose, W. (2011). Flatness-Based Control of Flexible Motion Systems. **ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium On Fluid Power And Motion Control DSCC 2011.1.**
- [2] Staudecker, M., Schlacher, K. & Hansl, R. (2008). Passivity Based Control and Time Optimal Trajectory Planning of a Single Mast Stacker Crane. **IFAC Proceedings Volumes.** 41, 875-880.
- [3] Sasaki, M., Shimizu, T., Ikai, K. & Ito, S. (2007). Stabilized controller design for a flexible stacker crane. **SICE Annual Conference** 874-878.
- [4] Tongue, B. (2002). Principles of Vibration (2nd Edition). **Oxford University Press.**
- [5] P. Lambrechts, M. Boerlage, and M. Steinbuch. (2005). Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems. **Control Engineering Practice**, 13(2), 145-157.

Uzaktan Eğitim Sistemi ile Gerçekleştirilen İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Çalışan Memnuniyetine Etkisinin İncelenmesi

Investigation of the Effect of Occupational Health and Safety Training Provided by Distance Education System on Employee Satisfaction

Orkun DALYAN^{1*} , Hatice DALYAN² , Mehmet PİŞKİN^{3*} , Ömer Faruk ÖZTÜRK⁴ 

¹Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 17020, Çanakkale, Türkiye

²Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 17020, Çanakkale, Türkiye

³Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, Çanakkale Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, 17020, Çanakkale, Türkiye

⁴Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Kimya Bölümü, Fen Fakültesi, 17020, Çanakkale, Türkiye

Öz

Covid-19 salgını sonrası uzaktan eğitim sistemine yönelim ciddi şekilde artmıştır. Salgın hastalıklar sebebiyle iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin de uzaktan eğitim yöntemi ile verilmesi son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, çalışanların almakta oldukları iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin uzaktan eğitim sistemi ile verilmesine yönelik memnuniyetinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik toplam 30 ifadeden oluşan ölçek araştırmacı tarafından geliştirilmiştir. Ölçek Çanakkale ilinde inşaat sektöründe görevli 84 beyaz yaka iş görene uygulanmış, veriler Sosyal Bilimler için İstatistik Programı (SPSS) ile analiz edilmiştir. Faktör analizine göre varyansın %78,28'ini açıklayan ve 6 faktörü (diğer eğitim sistemleri ile kıyaslama, sistem kullanımı, sistemin avantajı, bilgi edinimi, kariyer beklentisi ve sosyal yaşam) içeren ölçeğin, araştırma amacına uygun olduğunu belirlenmiştir. Demografik özelliklerin uzaktan eğitim sistemi memnuniyet derecesine etkisi incelendiğinde ise medeni durum değişkeninin çok büyük, daha önce eğitim alma değişkeninin büyük düzeyde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: COVID-19, Çanakkale, Çalışan Memnuniyeti, İSG Eğitimi, Uzaktan Eğitim Sistemi

Abstract

After the Covid-19 epidemic, the orientation to the distance education system has increased significantly. Due to epidemics, it has become widespread in recent years that occupational health and safety training is given by distance education method. This study aims to examine employees' satisfaction regarding the delivery of occupational health and safety training with the distance education system. For this purpose, the researcher developed a scale consisting of a total of 30 statements. The scale was applied to 84 white-collar employees working in the building sector in Çanakkale, and the data were examined by the Statistics Program for Social Sciences (SPSS). According to the factor analysis, it was determined that the scale, which explains 78.28% of the variance and includes 6 factors (comparison with other education systems, system use, the advantage of the system, knowledge acquisition, career expectancy, and social life), is suitable for the research purpose. When the effect of demographic characteristics on the degree of satisfaction with the distance education system was examined, it was determined that the variable of marital status was very high, and the variable of previous education was highly effective.

Keywords: Eco-composites, Recycling, Disposable masks, Nano-Graphene, Micromechanical models

I. GİRİŞ

Uzaktan eğitim sistemi, ilk olarak 19. yüzyılda ABD'de Chicago Üniversitesi'nde kullanılmıştır. Avrupa'da yazışma kurslarında kullanılması sonucunda e-öğrenme adı ile tanınırlığı artmıştır [1]. 1980'lerin sonlarında ise tüm dünyada tanınmış ve kullanımı artmıştır. Ülkemizde ise 2000'li yıllardan sonra teknolojiye yaşanan hızlı gelişmeler neticesinde yerini almaya başlamıştır. 2019 yılından sonra ise Covid-19

salgını sonucunda alternatif eğitim modelinden zorunlu eğitim modeline doğru evrilmiştir [2]. Uzaktan eğitim sistemi ya da e-öğrenme, temel olarak fiziki bir ortama ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilen eğitim faaliyetleri olarak tanımlanabilir [3]. Uzaktan eğitim sistemi bir konfor aracından ziyade zorunluluklar neticesinde ortaya çıktığı söylenebilir. Salgın hastalıklar, coğrafi ya da sağlık sorunları nedeniyle devam edilemeyen eğitim faaliyetlerine avantaj olarak yorumlamak gereklidir [4]. Ayrıca eğitimde fırsat eşitliği ilkesi gereği bireylerin öğrenme ihtiyaçlarının karşılanması sağlanması konusunda da uzaktan eğitim sisteminin önemi büyüktür [5]. Covid-19 salgını sonrasında ülkemizde uzaktan eğitim sistemi daha da yaygınlaşmıştır. İnşaat sektöründe görev yapan personellerin iş sağlığı ve güvenliğine (İSG) yönelik bilgi ve tutumlarının incelendiği bir çalışmada, Tekirdağ ili Ergene ilçesinde faaliyet gösteren inşaatlarda görev yapan 40 personel ile görüşme gerçekleştirilen araştırmada, personellerin eğitim seviyesinin düşük olduğu, İSG konusunda yeterli bilgiye sahip olmadığı ve verilen eğitimlerin kalitesi ve süresinin yeterli olmadığı, inşaat sektöründe iş kazası sıklık oranının yüksek olmasında, personellerdeki eğitim faktörünün önemli olduğu bildirilmiştir [6]. İSG eğitimlerinin veriminin artırılması amacıyla inşaat sektöründe görevli personeller ile gerçekleştirilen bir araştırma çalışmasında, üç farklı eğitim sunuş türünün tehlike algısına etkisi incelenmiştir. 150 personel ile gerçekleştirilen araştırma sonuçlarına göre hem ofis ortamında hem de çalışma alanında sunulacak verilen karma eğitimin diğer eğitim türlerine göre daha etkili olduğu bildirilmiştir [7]. İnşaat sektöründe görevli personellerin iş güvenliği algısı ile iş doyumu arasındaki ilişkinin tespiti amacıyla 161 personel ile bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, iş güvenliği algısı ile iş doyumu arasında çok zayıf olmak üzere pozitif bir bağlantı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca 26-35 yaş aralığında olan çalışanların iş güvenliği algı düzeylerinin diğer gruplara göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir [8]. Finlandiya'da inşaat sektöründe görev yapan personeller ile İSG eğitimlerinin sunulmasında günümüz teknolojilerinin kullanımı konusunda bir araştırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Klasik ve sanal gerçeklik ile sunulan İSG eğitimleri 1 ay sonra tekrarlanarak ilk ve son eğitim puanları arasındaki farklar incelenmiştir. İSG eğitiminin sanal gerçeklik (VR) teknolojisi ile uygulanması sonucunda, güvenlik kültürünün diğer gruba göre daha yüksek olduğu bildirilmiştir [9]. İnşaat sektöründe en çok ölümlü kazanın yaşandığı çalışma şekli olan yüksekte çalışma ile ilgili, personellerin farkındalık seviyeleri ile eğitim düzeyleri arasındaki ilişkinin araştırılması amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 300 personel ile gerçekleştirilen anket analizi sonrasında, yüksekte çalışma eğitimlerine karşı bakış açısı eğitim seviyesi yüksek olan çalışanların olumlu, düşük olanların olumsuz olduğu rapor edilmiştir [10]. İSG biliminde çalışanlara eğitim verilmesi, kanuni zorunluluğun

yanında güvenlik kültürünün oluşturulması ve yaygınlaştırılması için anahtar bir faaliyettir [7]. Eğitim ve tecrübe eksikliği sebebiyle kaza meydana gelme durumunun işyeri risk faktörleri sebebiyle kaza meydana gelme durumundan önem derecesi açısından daha yüksek olmaktadır [11]. Çalışanlara verilmesi gereken eğitim konuları, süresi, eğitmenin yetkinliği vb. kriterler mevzuatta detaylı olarak tanımlanmıştır [12]. İşletmelerde personellere, ziyaretçilere ve tedarikçilere verilmesi gerekli olan çeşitli İSG eğitim türleri mevcuttur [13]. Günümüze kadar işletmelerde verilen İSG eğitimleri yüz yüze yöntem ile verilmekteydi. Covid-19 salgını ile uzaktan eğitim sistemlerinin kullanımını artırmaya başlamış, literatürde de konu hakkında çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Gerçekte Covid-19 salgını dönemi öncesinde İSG mevzuatında yapılan revizyon ile kısıtlı da olsa İSG eğitimlerinde uzaktan eğitim verilmesinin zemini hazırlanmıştı [14]. Salgın hastalıklar ve mevzuattaki belirtilen değişimler araştırmacıları İSG alanında uzaktan eğitim sistemleri konusunda çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Bu çalışmada, uzaktan eğitim sistemi ile verilen İSG eğitimlerinin geliştirilmesi için personel memnuniyetini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve sorunlara çözüm önerileri getirilmesi ileride gerçekleştirilecek bilimsel araştırmalara ışık tutabilir. Bu araştırma, Çanakkale merkez ilçesinde bina inşaatı faaliyeti yürüten firmada görevli beyaz yaka personellerin görüşleri, uzaktan eğitim sisteminde mevzuatın belirlediği uzaktan eğitim sistemi kriterleri ile sınırlıdır. Bu nedenle genelleme yapılırken araştırma sınırlılıkları dikkate alınmıştır [15:16].

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Amaç

Araştırmada, iş sağlığı ve güvenliği alanında çalışanlara verilen eğitimlerin uzaktan eğitim sistemi ile verilmesinde personel memnuniyetinin ölçülmesini amaçlamaktadır. Bu çalışmada uzaktan eğitim sistemleri ve İSG eğitimleri ile ilgili literatür taranarak ölçek ifadeleri hazırlanmıştır. Araştırmacılar tarafından hazırlanan ölçek Ek-1'de verilmiştir.

2.2. Evren-Örneklem

Çanakkale ili merkez ilçesinde, çok tehlikeli sınıfta yer alan 41.2 NACE (Avrupa Topluluğundaki Ekonomik Faaliyetlerin Sınıflandırılması) kodu ile bina inşaatı yapan firma bünyesinde yer alan beyaz yaka personelleri (N=105) evreni oluşturmaktadır [17]. Örneklem tespitinde araştırmacıların etkisini azaltan basit tesadüfi örnekleme yöntemi tercih edilmiştir [18]. Ankete 87 personel katılmış ancak anketi tamamlamak istemeyen ve verileri eksik olan 3 personelin anketi değerlendirmeye alınmamıştır. Araştırmanın örneklemini Krejcie ve Morgan tarafından oluşturulan tabloya göre 84 personel oluşturmuştur [19]. Madde sayısı ile örneklem tespitinde araştırmada kullanılan ölçegin 25 madde olması sebebiyle örnekleme 84 olan araştırma grubuyla araştırmaya devam edilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir [20:21].

2.3. Eğitim Uygulaması

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen uzaktan İSG eğitimleri, işyerinde halihazırda kurulan olan uzaktan eğitim yönetim sistemi vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Personellere verilen eğitimlerin konuları mevzuat gereği tanımlanmış olup temel eğitim olarak isimlendirilmektedir. Video kayıt sistemi ile eğitimlerde geçen süre, eğitimlerin tamamlanma durumu kontrol edilmiştir. Eğitimler sonucunda, mevzuatın belirlediği kriterlerde ölçme ve değerlendirme uygulanmıştır [12].

2.4. Ölçek

İşyerlerinde çalışanlara verilen İSG eğitimlerinin uzaktan eğitim sistemi ile verilmesinin çalışanlardaki memnuniyet düzeylerine etkisini analiz etmek ve varsa sorunları tespit etmek amacıyla anket hazırlanmıştır. Konu hakkında literatür taraması yapıldıktan sonra konuyla ilgili bilimsel çalışmalar sunan akademisyenler ve 10 yıldan fazla mesleki tecrübeye sahip iş güvenliği uzmanlarının görüşleri alınmıştır. Anketin ilk beş sorusu katılımcıların kişisel özelliklerini (cinsiyet, medeni durum, yaş, daha önce alınan İSG eğitim sayısı ve görevi) belirlemeye yöneliktir. Anketin diğer bölümünde ise personellerin İSG uzaktan eğitim sistemi memnuniyetini değerlendirmeye yönelik 5'li Likert tipi ölçek kullanılmış 25 adet soru bulunmaktadır. Seçenekler, 1 (Kesinlikle Katılmıyorum) ile 5 (Tamamen Katılıyorum) arasındadır. Oluşturulan anket, işyerinde personeller ile yüz yüze gerçekleştirilmiştir. 40 personel ile gerçekleştirilen pilot uygulama neticesinde ölçek maddelerinde değişiklik yapılmasına gerek görülmemesi üzerine, pilot uygulama verileri de araştırma örnekleme dahil edilmiştir. Pilot çalışma için hedef kitleyi temsil eden 30-50 katılımcının yeterli olduğu belirtilmiştir [22]. Araştırmanın verileri 01.01.2022–01.03.2022 tarihleri arasında elde edilmiştir.

2.5. Veri Analizi

Bu çalışmada elde edilen verilerin analizleri SPSS 24.0 ile gerçekleştirilmiştir. Ölçek ortalamasının güvenilirlik katsayısı, güvenilir bir değer olarak kabul edilen $\alpha=0.839$ olarak bulunmuştur. Bartlett's testinin 0.05'ten küçük olması Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) değerinin 0.773 olması faktör analizi için yeterli olduğunu kanıtlamıştır [23]. 40 personel ile gerçekleştirilen pilot uygulama verilerinin Açıklayıcı Faktör Analizi (AFA) neticesinde, varyansın %78,28'ini açıklayan 6 faktör olduğu belirlenmiştir. AFA sonucunda elde edilen faktörlerin ana uygulama verilerine uygunluğunu değerlendirmek için Doğrulayıcı Faktör Analizi (DFA) yapılmıştır. Ölçek alt boyutlarının normallik analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Anket verilerinin ve alt boyutlarının çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) değerleri kontrol edilerek dağılımın normal olduğu sonucuna varılarak parametrik test grubundaki Bağımsız

Örnekleme t-Testi ve Tek Yönlü Varyans (ANOVA) analizleri kullanılmıştır [24:25]. Farklılar arasındaki pozitiflik, negatiflik ile bu değişikliğin şiddetinin belirlenmesinde ise çoklu karşılaştırma testleri (Post Hoc) uygulanmıştır [26]. Değişkenler arasındaki etki büyüklüğü bilimsel yöntemlerle hesaplanmıştır [27]. Alt boyutlar arasındaki ilişkinin yönü ve şiddetinin tespiti için parametrik test grubunda yer alan Pearson korelasyon analizleri kullanılmıştır [28]. Sonuçlar eksi değer ise bir değişken artarken diğeri azalma, pozitif değer ise bir değişken artarken diğeri de artma eğiliminde olduğu yorumlanır [25]. Veriler %5 hata payı ve %5 anlamlılık seviyesinde detaylandırılmıştır [29].

Tablo 1. Ölçek ve alt boyut normallik dağılımı analiz sonuçları

Alt Boyut	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro-Wilk		Çarpıklık	Basıklık
	Statistic	Sig.	Statistic	Sig.		
Diğer Eğitim Sistemleri ile Kıyaslama	.199	.000	.841	.000	.006	-1,15
Sistem Kullanımı	.338	.000	.708	.000	1,14	.973
Sistem Avantajı	.259	.000	.829	.000	-.626	-1,18
Bilgi Edinimi	.136	.001	.945	.001	-.156	-.075
Kariyer Beklentisi	.298	.000	.785	.000	.857	-.509
Sosyal Yaşam	.190	.000	.845	.000	-.071	-1,08

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Katılımcıların kişisel bilgilerine ait frekans (n) ve yüzdeleri (%) Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Katılımcıların kişisel özellikleri

Değişken	Düzye	n	%
Cinsiyet	Kadın	74	88,1
	Erkek	10	11,9
Medeni Durum	Evli	45	53,6
	Bekar	39	46,4
Yaş	18-26	9	10,7
	27-35	45	53,6
	36-45	16	19,0
	45 Yaş Üzeri	14	16,7
Daha Önce İSG Eğitimi Alma Durumu	1 Defa	5	6,0
	2-5 Defa Arası	26	31,0
	6-9 Defa Arası	26	31,0
	10 Defadan Fazla	27	32,1
Görevi	Mühendis	74	88,1
	Şef	7	8,3
	Müdür	3	3,6
Toplam		84	100,0

Tablo 2'ye göre, katılımcıların 74'ü (%88,1) kadın, 10'u (%11,9) erkektir. Katılımcıların 45'i (%53,6) evli, 39'u (%46,4) bekârdır. Katılımcıların 9'u (%10,7) 18

ile 26 yaş aralığında, 45'i (%53,6) 27 ile 35 yaş aralığında, 16'sı (%19,0) 36 ile 45 yaş aralığında ve 14'ü (%16,7) 45 yaşın üzerindedir. Katılımcılardan 5'i (%6,0) 1 defa, 26'sı (%31,0) 2 ile 5 defa arası, 26'sı (%31,0) 6 ile 9 defa arası ve 27'si (%32,1) 10 defadan fazla İSG eğitimi almıştır. Katılımcıların 74'ü (%88,1) mühendis, 7'si (%8,3) şef ve 3'ü (%3,6) müdür pozisyonunda görev almaktadır.

Tablo 3. İş görenlerin ölçek ifadelerine verdikleri yanıtlar hakkındaki bulgular

Soru No	1		2		3		4		5		Ort. \bar{X}	Std. Sap. Sd
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%		
Soru 1	1	1,2	7	8,3	55	65,5	8	9,5	13	15,5	3,29	0,87
Soru 2	0	0	5	6,0	64	76,2	2	2,4	13	15,5	3,27	0,79
Soru 3	0	0	0	0	64	76,2	7	8,3	13	15,5	3,39	0,74
Soru 4	0	0	5	6,0	56	66,7	10	11,9	13	15,5	3,36	0,81
Soru 5	0	0	9	10,7	59	70,2	3	3,6	13	15,5	3,23	0,84
Soru 6	0	0	4	4,8	36	42,9	16	19,0	28	33,3	3,80	0,96
Soru 7	0	0	0	0	27	32,1	22	26,2	35	41,7	4,09	0,85
Soru 8	0	0	11	13,1	19	22,6	16	19,0	38	45,2	3,96	1,10
Soru 9	0	0	0	0	31	36,9	17	20,2	36	42,9	4,05	0,89
Soru 10	0	0	0	0	25	29,8	26	31,0	33	39,3	4,09	0,83
Soru 11	0	0	1	1,2	16	19,0	36	42,9	31	36,9	4,15	0,76
Soru 12	0	0	3	3,6	19	22,6	34	40,5	28	33,3	4,03	0,84
Soru 13	0	0	6	7,1	21	25,0	33	39,3	24	28,6	3,89	0,90
Soru 14	9	10,7	20	23,8	10	11,9	42	50,0	3	3,6	3,11	1,14
Soru 15	9	10,7	20	23,8	11	13,1	41	48,8	3	3,6	3,10	1,14
Soru 16	0	0	5	6,0	29	34,5	11	13,1	39	46,4	4,00	1,02
Soru 17	0	0	0	0	45	53,6	6	7,1	33	39,3	3,85	0,95
Soru 18	0	0	5	6,0	35	41,7	8	9,5	36	42,9	3,89	1,04
Soru 19	0	0	7	8,3	34	40,5	5	6,0	38	45,2	3,88	1,09
Soru 20	0	0	6	7,1	37	44,0	5	6,0	36	42,9	3,84	1,06
Soru 21	0	0	0	0	35	41,7	15	17,9	34	40,5	3,98	0,91
Soru 22	0	0	51	60,7	20	23,8	9	10,7	4	4,8	2,59	0,86
Soru 23	0	0	48	57,1	28	33,3	8	9,5	0	0	2,52	0,66
Soru 24	0	0	1	1,2	31	36,9	19	22,6	33	39,3	4,00	0,90
Soru 25	10	11,9	24	28,6	5	6,0	6	7,1	39	46,4	3,47	1,57

Gruplar: 1=Kesinlikle Katılmıyorum, 2=Katılmıyorum, 3=Kararsızım, 4=Katılıyorum, 5=Kesinlikle Katılıyorum

Tablo 3'te katılımcıların ölçek ifadelerine verdikleri yanıtların frekans, yüzde değerleri, ortalama (\bar{X}) ve standart sapmaları (Sd) sunulmuştur. Tablo 3'e göre, en yüksek ortalama değerine sahip ifade, "Uzaktan iş sağlığı ve güvenliği eğitim sisteminden edinilen teorik bilgiler çalışma hayatı için gereklidir" ($\bar{X} = 4,15$), en düşük ortalama değerine sahip ifade ise "Uzaktan iş sağlığı ve güvenliği eğitim sistemi kariyerimin geliştirilmesine yardımcıdır" ($\bar{X} = 2,52$) dir. Ölçek ortalama değerinin bağımsız t-testi sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Ölçek ortalama değerinin bağımsız t testi sonuçları

Değişken	Düzyen	n	\bar{X}	Sd	S.E.Mean	t	p	d
Cinsiyet	1. Kadın	74	3,63	0,41	0,04	-0,472	0,638	-
	2. Erkek	10	3,70	0,57	0,18			
Medeni Durum	1. Evli	45	3,89	0,36	0,05	7,226	0,000*	1,63
	2. Bekar	39	3,34	0,31	0,05			

*= $p < .05$, S.E.Mean= Ortalamanın standart hatası

Tablo 4 incelendiğinde, kadın personellerin ölçek ortalama değeri $\bar{X}_{kadın} = 3,63 \pm 0,04$, erkek personellerin ölçek ortalama değeri $\bar{X}_{erkek} = 3,70 \pm 0,18$ 'tir. T testi sonuçlarına göre ölçek ortalama değeri ile cinsiyet değişkeni açısından anlamlı bir farklılık yoktur [$t_{(82)} = -0,472$, $p > .05$]. Medeni durum değişkeni incelendiğinde, evli personellerin ölçek ortalama değeri $\bar{X}_{evli} = 3,89 \pm 0,05$, bekâr personellerin ölçek ortalama değeri $\bar{X}_{bekar} = 3,34 \pm 0,05$ 'tir. T testi sonuçlarına göre, ölçek ortalama değeri ile medeni durum değişkeni arasında evli katılımcılar lehine anlamlı farklılık vardır [$t_{(82)} = 7,226$, $p < .05$]. Cohen d ($d = 1,63$) etki büyüklüğü katsayısına göre, evli katılımcıların ölçek ortalama değerine etkisi çok yüksek düzeydedir. Ölçek ortalama değerinin yaş, daha önce İSG eğitimi alma durumu ve görev değişkenlerine göre ANOVA sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Ölçek ortalama değerinin yaş, daha önce İSG eğitimi alma, görev değişkenlerine göre ANOVA sonuçları

Değişken	Düzye	n	\bar{X}	Sd	F	p	η^2	Anlamlı Fark
Yaş	1. 18-26	9	3,56	0,38	1,414	0,245	-	-
	2. 27-35	45	3,72	0,50				
	3. 36-45	16	3,57	0,29				
	4. 45 yaş üzeri	14	3,48	0,28				
Daha Önce İSG Eğitimi Alma Durumu	1. 1 defa	5	3,32	0,29	22,775	0,000*	.46	3>1 3>2
	2. 2 ile 5 defa arası	26	3,27	0,19				
	3. 6 ile 9 defa arası	26	3,99	0,39				
Görev	4. 10 defadan fazla	27	3,70	0,36	1,820	0,169	-	-
	1. Mühendis	74	3,60	0,44				
	2. Şef	7	3,90	0,27				
	3. Müdür	3	3,81	0,39				

η^2 =Eta-kare etki büyüklüğü, 1=1 defa, 2=2-5 defa arası, 3=6-9 defa arası, 4=10 defadan fazla

Tablo 5 incelendiğinde, daha önce İSG eğitimi alma durumu değişkeni ile ölçek ortalama değeri arasında anlamlı farklılık gözlenmiştir [$F_{(3-80)} = 22,775, p<.05$]. Anlamlı farkın 6 defadan fazla İSG eğitimi alanlar ile diğer gruplar arasında 6 defadan fazla İSG eğitimi alanlar tarafında olduğu belirlenmiştir. Eta-kare ($\eta^2 = .46$) değerine göre, 6 defadan fazla İSG eğitimi alma durumunun ölçek ortalama değerine etkisi yüksek düzeydedir. ANOVA testi sonuçlarına göre yaş ve görev değişkenlerinin test ortalamaları açısından manidar bir bağlantı yoktur [Yaş $F_{(3-80)} = 1,414, p >.05$, Görevi $F_{(2-81)} = 1,820, p >.05$].

Ölçek alt boyutlarına ait istatistiksel değerler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Ölçek alt boyutlarının istatistikleri

Alt Boyut	Madde Sayısı	Cronbach's Alpha Güvenilirlik Katsayısı	Varyans	Ortalama	Standart Sapma
Diğer Eğitim Sistemleri ile Kıyaslama	7	0,922	29,149	3,93	0,82
Sistem Kullanımı	6	0,914	20,589	3,44	0,68
Sistem Avantajı	3	0,953	9,207	3,39	1,07
Bilgi Edinimi	4	0,722	7,668	4,04	0,61
Kariyer Beklentisi	2	0,667	6,522	2,55	0,66
Sosyal Yaşam	3	0,814	5,150	3,76	1,01

Tablo 6 incelendiğinde, diğer eğitim sistemleri ile kıyaslama, sistem kullanımı ve sistem avantajı alt boyutlarının yüksek derecede güvenilir (0.90-1.00), bilgi edinimi, kariyer beklentisi ve sosyal yaşam alt boyutlarının oldukça güvenilir (0.60-0.90) düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Alt boyutlar arasındaki korelasyon analizi sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Alt boyutlar arasındaki korelasyon analizi sonuçları

Alt Boyut	1	2	3	4	5	6
1- Diğer Eğitim Sistemleri ile Kıyaslama	r 1					
	p -					
2-Sistem Kullanımı	r 0,406	1				
	p 0,000*	-				
3-Sistem Avantajı	r -0,130	0,173	1			
	p 0,239	0,115	-			
4- Bilgi Edinimi	r 0,156	-0,72	-0,197	1		
	p 0,155	0,118	0,073	-		
5- Kariyer Beklentisi	r -0,067	0,096	0,125	-0,032	1	
	p 0,544	0,383	0,256	0,773	-	
6- Sosyal Yaşam	r 0,535	0,274	-0,285	0,287	-0,183	1
	p 0,000*	0,012*	0,009*	0,008*	0,096	-

r=Pearson Korelasyon Katsayısı (2-yönlü), p=Anlamlılık Değeri, * $p<.05$

Tablo 7 incelendiğinde, diğer eğitim sistemleri ile kıyaslama alt boyutu ($\bar{X}=3,93, Sd=.82$) ve sistem kullanımı alt boyutu ($\bar{X}=3,44, Sd=.68$) arasında orta düzeyde, pozitif yönde ve anlamlı bir ilişki bulunmuştur [$r_{(82)}=.406, p<.05$]. Diğer eğitim sistemleri ile kıyaslama alt boyutu ($\bar{X}=3,93, Sd=.82$) ve sosyal yaşam alt boyutu ($\bar{X}=3,76, Sd=1,01$) arasında orta mertebede, olumlu yönde ve manidar bir bağlantı bulunmuştur [$r_{(82)}=.535, p<.05$]. Sistem kullanımı alt boyutu ($\bar{X}=3,44, Sd=.68$) ve sosyal yaşam alt boyutu ($\bar{X}=3,76, Sd=1,01$) arasında alçak mertebede, olumlu yönde ve manidar bir bağlantı bulunmuştur [$r_{(82)}=.274, p<.05$]. Sistem avantajı alt boyutu ($\bar{X}=3,39, Sd=1,07$) ve sosyal yaşam alt boyutu ($\bar{X}=3,76, Sd=1,01$) arasında alçak mertebede, olumsuz yönde ve manidar bir bağlantı bulunmuştur [$r_{(82)}=-.285, p<.05$]. Bilgi edinimi alt boyutu ($\bar{X}=4,04, Sd=.61$) ve sosyal yaşam alt boyutu ($\bar{X}=3,76, Sd=1,01$) arasında alçak mertebede, olumlu yönde ve manidar bir bağlantı bulunmuştur [$r_{(82)}=.287, p<.05$].

Anket cevap ortalamaları dikkate alındığında; uzaktan eğitim sistem kullanımının memnuniyet derecesine etkisinde medeni durum değişkeninin çok büyük, daha önce İSG eğitimi alma durumu değişkeninin ise büyük düzeyde etkili olduğu söylenebilir. Katılımcıların anket sorularına verdikleri cevaplar incelendiğinde; 27-35 yaş arası, daha önce 6'dan fazla İSG eğitimi almış ve firmada şef pozisyonunda görev yapan personellerin İSG eğitimlerinin uzaktan eğitim sistemi ile verilmesine daha olumlu baktığı belirlenmiştir.

Kore'deki göçmen çalışanlara verilen İSG eğitimlerinin uzaktan eğitim sistemi verilmesi ile memnuniyet derecelerini etkileyen faktörlerin

incelendiği bir çalışmada, sadece göçmen milliyetlerinin anlamlı bir farklılık oluşturduğu raporlanmıştır [30]. Atatürk Üniversitesi Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi (AÜUZEM) öğrencilerinin uzaktan eğitim sistemi memnuniyeti araştırılan bir çalışmada, kişisel uygunluk, öğrenme ve program değerlendirilme alt faktörleri ile araştırmaya katılan öğrencilerin yaşları arasında anlamlı bir farklılık olduğu raporlanmıştır [31]. Çanakkale ilinde inşaat sektöründe görevli beyaz yaka personeller ile yüz yüze ve uzaktan İSG eğitimlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, 45 yaş üzerindeki personellerin uzaktan eğitim sistemine daha yatkın olduğu rapor edilmiştir [32]. Bu çalışmada uzaktan İSG eğitim sistemi memnuniyeti ile personellerin yaş değişkenleri arasında anlamlı bir farklılık bulunamamıştır. Ancak 27-35 yaş aralığındaki personellerin diğer yaş grubundaki personellere göre uzaktan İSG eğitim sistemi memnuniyetinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar arasındaki farklılık örneklem özellikleri ya da sağlanan eğitimin farklılığından olabileceği düşünülmektedir.

AÜUZEM’de bazı lisans ve ön lisans bölümü öğrencilerinin uzaktan eğitim sistemi memnuniyeti araştırılan bir çalışmada, “uzaktan eğitimin mekan ve zaman esnekliği sağlaması” ifadesi kişisel uygunluk alt faktörü arasındaki en yüksek ortalamaya sahip ifade olduğu raporlanmıştır [31]. İSG uzaktan öğretim ön lisans programı mezunları ile e-öğrenme memnuniyeti üzerine gerçekleştirilen bir araştırmada, ders esnekliği faktörü ile öğrenci memnuniyeti arasında anlamlı farklılık olmadığı rapor edilmiştir [33]. Sakarya Üniversitesi personellerine İSG eğitimlerinin uzaktan eğitim sistemi ile verilmesi sonucu personellerin memnuniyetlerinin ölçüldüğü bir araştırmada, akademik personellerin zamanı daha verimli olarak kullanabildiklerinden dolayı idari personellere göre daha memnuniyet duyduğu rapor edilmiştir [34].

Çanakkale ilinde inşaat sektöründe görevli beyaz yaka personeller ile yüz yüze ve uzaktan İSG eğitimlerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, evli olan personellerin uzaktan İSG eğitim sistemini tercih ettikleri rapor edilmiştir [32]. Bu çalışmada benzer şekilde, evli personeller tarafında farklılık olduğu belirlenmiştir. Belirtilen farklılık, evli olan çalışanların eğitim konusunda zaman ve mekana bağlı kalmasından kaynaklanabilir. Uzaktan eğitim sisteminin tercihinde bu sistemin evli olan personellere zaman konusunda daha fazla esneklik sağlamasının etkili olduğu söylenebilir.

İSG uzaktan öğretim ön lisans programı mezunları ile e-öğrenme memnuniyeti üzerine gerçekleştirilen bir araştırmada, teknoloji alt faktörü olarak kodlanan sistemin kullanılması ile öğrencilerin memnuniyeti arasında anlamlı farklılık olmadığı rapor edilmiştir [33]. Bu çalışmada sistem kullanımı alt faktörü ile

sadece sosyal yaşam alt faktörü arasında alçak mertebede manidar bir bağlantı olduğu gözlenmiştir.

IV. SONUÇ

İşyerlerinde uzaktan eğitim sistemi ile verilen İSG eğitim memnuniyetinin ölçülmesi ve analizi amacıyla Çanakkale merkezinde inşaat sektöründe görevli 84 beyaz yaka personel ile gerçekleştirilen araştırma verileri SPSS 24.0 programı vasıtasıyla analiz edilmiştir. Ölçeğin güvenirlik değeri $\alpha=0.839$ olarak bulunmuştur. Analizler sonucunda elde edilen veriler konu hakkında geçmişte gerçekleştirilmiş araştırmaların verileri ile karşılaştırılmış ve İSG eğitiminin uzaktan yöntemle verilmesini destekleyici öneriler sunulmuştur.

Ölçek ortalama değeri ile 6’dan fazla İSG eğitimi almış personellerin lehine anlamlı bir farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bu sonucun ortaya çıkmasında daha önce alınan İSG eğitimlerinin yüz yüze eğitim sistemi ile alınmış olması ve uzaktan eğitim sistemi ile kıyaslanabilmesinden kaynaklanabilir.

İşyerlerinde uzaktan eğitim sistemlerinin yaygınlaştırılması ve sistemin daha iyi tanınabilmesi için çeşitli aktiviteler uygulanabilir. Uzaktan eğitim sistemini tanıtıcı, personelleri bilgilendirici ve motive edici eğitim, kurs, seminerler düzenlenebilir. Çalışmada kullanılan ölçeğin etkili öğretimin gerçekleştirilmesine katkı sağlaması amacıyla farklı örneklemelerde de uygulanarak test edilmesi ve sonuçların karşılaştırılarak sistemin geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca özel politika gerektiren grupların eğitimlerinde de uzaktan İSG eğitim sisteminin uygulanması, sistemin başka bir boyutta geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Metin, A. E., Karaman, A. ve Şaştım, Y. A. (2017). Öğrencilerin uzaktan eğitim sistemine bakış açısı ve uzaktan eğitim İngilizce dersinin verimliliğinin değerlendirilmesi: *Banaz Meslek Yüksekokulu. Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(2), 640-652.
- [2] Koç, E. S. (2021). Nasıl bir uzaktan eğitim? 1 Yılın sonunda yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. *International Anatolia Academic Online Journal Social Sciences Journal*, 7(2), 13-26.
- [3] Kaya, Z. (2002). Uzaktan Eğitim. Pegem A Yayıncılık, Ankara.
- [4] Kaysi, F. (2020). Covid-19 Salgını sürecinde Türkiye’de gerçekleştirilen uzaktan eğitimin değerlendirilmesi. 5. Uluslararası Bilimsel Araştırma Kongresi, IBAD-2020, İstanbul, Türkiye, 1-2 Eylül.
- [5] Yeşilçınar, L., Dalyan, O., Dalyan, H. ve Pişkin, M. (2022). Çevrimiçi eğitimin lise düzeyindeki öğrencilerin tutumlarına etkisi: Çanakkale örneği.

- Turkish Journal of Educational Studies*, 9(2), 355-372.
- [6] Günaydın, D. ve Yüksel, A. (2022). İnşaat sektöründe çalışanların iş sağlığı ve güvenliğine yönelik tutumları: Tekirdağ/Ergene ilçesinde bir araştırma. *Sosyal Güvençe*, 21, 810-839.
- [7] Dalyan, O., Canpolat, E. ve Pişkin, M. (2021a). İş sağlığı ve güvenliğinin eğitimlerinde tehlike algılarının incelenmesi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(4), 670-676.
- [8] Demir, E., Ensari Özay, M., Uçan, R. ve Kayhan, H. (2021). İş doyumunu ile iş güvenliği algısı arasındaki ilişki: İnşaat işçileri örneği. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(1), 58-63.
- [9] Nykänen, M., Puro, V., Tiikkaja, M., Kannisto, H., Lantto, E., Simpura, F., Uusitalo, J., Lukander, K., Räsänen, T. ve Teperi, A. (2019). Evaluation of the efficacy of a virtual reality-based safety training and human factors training method: study protocol for a randomised-controlled trial. *Injury Prevention*, 26(4), 1-10.
- [10] Genç, Ö. ve Ulusoy, I. (2019). İş sağlığı ve güvenliği farkındalığının eğitim düzeyi perspektifinden incelenmesi: İnşaat sektöründe yüksekte çalışanlar üzerinde bir araştırma. *OHS Academy*, 2(2), 58-66.
- [11] Erdal, H. (2019). İş sağlığı ve güvenliği için Dematel-Aras tabanlı risk değerlendirme metodolojisi ve bir uygulama. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(2), 1831-1853.
- [12] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2013). Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelik. Resmî Gazete Sayı:28648, 15/05/2013.
- [13] Dalyan, O. ve Pişkin, M. (2021). İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi ve Tehlike Algıları. Efe Akademi Yayınları, İstanbul.
- [14] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2018). Çalışanların İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Usul ve Esasları Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Resmî Gazete Sayı:30430, 24/05/2018.
- [15] Ercikan, K. ve Roth, W.-M. (2014). Limits of Generalizing in Education Research: Why Criteria for Research Generalization Should Include Population Heterogeneity and Uses of Knowledge Claims. *Teachers College Record*, 116(4), 1-28.
- [16] Kaçan, A. ve Gelen, İ. 2020. Türkiye'deki Uzaktan Eğitim Programlarına Bir Bakış, *International Journal of Education Science and Technology*, 6 (1), 1-21.
- [17] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı. (2012). İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği. Resmî Gazete Sayı:28509, 26/12/2012.
- [18] Yıldız, S. (2017). Sosyal bilimlerde örnekleme sorunu: Nicel ve nitel paradigmalardan örnekleme kuramına bütüncül bir bakış. *Kesit Akademi Dergisi*, 3(11), 421-442.
- [19] Krejcie, V. R. ve Morgan, W. D. (1970). Determining sample size for research activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30(3), 607-610.
- [20] Kline, P. (1994). An Easy Guide to Factor Analysis. Routledge, New York.
- [21] Catell, R. (1978). The Scientific Use of Factor Analysis. Plenum, New York.
- [22] Şeker, H., ve Gençdoğan, B. (2014). Psikolojide ve Eğitimde Ölçme Aracı Geliştirme. Nobel Yayıncılık, Ankara.
- [23] Çokluk, Ö., Şekercioğlu, G. ve Büyüköztürk, Ş. (2012). Sosyal Bilimler için çok Değişkenli İstatistik: SPSS ve Lisrel uygulamaları. Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara.
- [24] Kalaycı, Ş. (2008). SPSS Uygulamalı çok Değişkenli İstatistik Teknikleri. Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [25] Eymen, E. (2007). SPSS 15.0 Veri Analiz Yöntemleri. İstatistik Merkezi, Ankara.
- [26] Kayri, M. (2009). Araştırmalarda gruplar arası farkın belirlenmesine yönelik çoklu karşılaştırma (Post-Hoc) teknikleri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(1), 51-64.
- [27] Kılıç, S. (2014). Etki büyüklüğü. *Journal Of Mood Disorders*, 4(1), 44-46.
- [28] Büyüköztürk, Ş., Çokluk, Ö. ve Köklü, N. (2006). Sosyal Bilimler için İstatistik. Pegem Akademi Yayıncılık, Ankara.
- [29] Özdamar, K., Odabaşı, Y., Hoşcan, Y., Bir, A. A., Kırcaali-İftar, G., Özmen, A. ve Uzuner, Y. (1999). Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- [30] Lee, Y. J. ve Lee, D. (2015). Factors influencing learning satisfaction of migrant workers in Korea with e-learning-based occupational safety and health education. *Safety and Health at Work*, 6(3), 211-217.
- [31] Eygü, H. ve Karaman, S. (2013). Uzaktan eğitim öğrencilerinin memnuniyet algıları üzerine bir araştırma. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(1), 36-59.
- [32] Dalyan, H., Dalyan, O., Öztürk, Ö. F. ve Pişkin, M. (2021b). İş sağlığı ve güvenliğinde yüz yüze ve uzaktan eğitim sistemlerinin karşılaştırılması. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 5(3), 219-228.
- [33] Nam, S. ve Tutar, S. (2019). İş sağlığı ve güvenliği eğitiminde e-öğrenmenin etkinliği. *International Journal Entrepreneurship and Management Inquiries Dergisi*, 3(4), 71-93.
- [34] Bayram, M. (2020). Uzaktan iş sağlığı ve güvenliği eğitim kalitesinin katılımcıların memnuniyet algıları üzerinde etkisi. *The Journal of Social Science*, 4(7), 110-120.

Poliglisidol Esaslı Çok Dallanmış Üretan Metakrilat/POSS/Gümüş Nanopartikül İçeren Nanokompozitlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Synthesis and Characterization of Polyglycidol Based Hyperbranched Urethane Methacrylate/ POSS/ Silver Nanoparticle Nanocomposites

Gülay BAYRAMOĞLU¹ 

¹ Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksek Okulu, Tekstil Teknolojisi Bölümü, Yalova, Türkiye

Öz

Bu çalışmada çok dallanmış poliglisidol oligomeri (PG) ve poliglisidol esaslı çok dallanmış üretan metakrilat (PGUM) oligomeri glisidol ve 2-izosiyanatoetil metakrilat (IEM) kullanılarak sentezlenmiştir. Oligomerlerin yapıları FT-IR ile aydınlatılmıştır. Daha sonra PGUM, Metakril-POSS, fotobaşlatıcı (Irg-184), çapraz bağlayıcı olarak trimetilolpropan triakrilat (TMPA) ve AgNO₃ karıştırılarak hibrit nanokompozit film hazırlanmıştır. Hibrit nanokompozit filmlerin mekanik ve termal özelliklerinin yanısıra kaplama performansları incelenmiştir. Metakrilik grupların çapraz bağlanması, gümüş iyonlarının kararlı nanopartiküllere (AgNP) indirgenmesi ve AgNP'lerin nanokompozitlere dahil edilmesi için UV ışığı kullanılmıştır. AgNP'lerin oluşumu TEM analizi ile doğrulanmıştır. Hibrit nanokompozit filmlerin Gram-pozitif ve Gram-negatif bakterilere karşı antibakteriyel aktiviteside ayrıca gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gümüş nanopartikül, Nanokompozitler, Fotopolimerizasyon

Abstract

In this study, hyperbranched polyglycidol oligomer (PG) and methacrylated hyperbranched polyglycidol oligomers (PGUM) were synthesized using glycidol and 2-izosiyanatoetil metakrilat (IEM). The structures of oligomers were characterized by FT-IR. Then, hybrid nanocomposite film were prepared by mixing PGUM, Methacryl-POSS, photoinitiator (Irg-184), trimethylolpropane triacrylate (TMPA) as cross linker and AgNO₃. Along with the mechanical and thermal properties, coating performance of hybrid nanocomposite films were examined. UV exposure was used for cross linking of methacrylic groups, reduction of silver ions to stable nanoparticles (AgNP) and introduction of AgNPs into nanocomposites. The formation of AgNPs was verified by TEM analysis. The antibacterial activity of the hybrid nanocomposite films against Gram-positive and Gram-negative bacteria was also observed.

Key Words: silver nanoparticles, hybrid nanocomposites, photopolymerization

I. GİRİŞ

Nanokompozit malzemeler, bir matris içerisinde dağılmış bileşenlerinden en az birinin 100 nm' den daha küçük boyutlara sahip olduğu ve bileşenlerinin ayrı ayrı özelliklerini bir araya toplayan çok fazlı malzemeler olarak tanımlanırlar. Bu malzemelerde ana hedef matrisin fiber ya da tanecikler ile istenen amaç için kuvvetlendirilmesidir. Polimer nanokompozitler ise ana matrisin polimer olduğu, en az bir boyutta nanometrik ölçüdeki dolgunun polimer içinde dispers edildiği ve geleneksel dolgulu polimerlere kıyasla daha üstün performans sağlayan kompozit türüdür. Boyutları nedeniyle daha geniş yüzey alanına sahip nanopartiküller, polimer zincirleri ile daha fazla noktada temas ettiklerinden daha çok etkileşime girebilmekte ve böylece mikro boyuttaki özdeşlerine kıyasla muazzam farklılıklar sergilerler. Bilhassa mekanik ve kimyasal mukavemette artış, ısı geçiş ve bozunma sıcaklıklarında istenen yönde gelişme, ısı ve elektrik iletkenliklerinde büyük oranda iyileşme gösterdiği bildirilmiştir [1]. Polimer nanokompozitler, bahsi geçen bu özelliklerindeki performansları nedeniyle çok bileşenli polimer esaslı sistemler içinde gerek araştırma geliştirme gerek ticari amaçla olsun dünya çapında en çok tercih edilen malzeme sınıfı olmuştur. Başta bariyer özellikleri nedeniyle gıda ambalajlarında, mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle boyalı devre elemanlarından başlayarak ambalajlamaya kadar elektronik endüstrisinde, yeni tip akıllı ilaç salınım sistemlerinde, yüksek çözünürlüklü ekranlarda kullanılan elektrokromik araçlarda, spor malzemelerinde olmak üzere

birçok alanda kullanılmaktadırlar[2,3]. Nanokompozit malzemelerin yanı sıra polimerle inorganik parçaları bir araya getiren bir diğer sistem hibrit malzemelerdir. Nanokompozit malzemelerden farkı, inorganik kısmın organik matris ile zayıf etkileşimlere dayanan bağlar (Van Der Walls, Hidrojen Bağları) ya da organik ve inorganik kısımların birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmalarıdır. Nanoparçacık yüzeylerinin çeşitli reaktif kimyasallar kullanılarak modifiye edilmesinin ardından polimer matris içerisinde dağıtılması ve uygun şartlar altında polimer ve modifiye tanecığın kimyasal bağ oluşturması ile elde edilirler[4,5]. Polihedral oligomerik silseskioksanlar (POSS)'lar ilk keşfedildikleri 1946 yılından itibaren giderek artan bir ilgi ile karşılaşılmıştır. POSS'lar genel olarak silika esaslı kafes şeklinde anorganik yapıdaki bir çekirdeğin (Si_3O_{12}) köşelerinde sekiz adet organik grubun bağlı olduğu nano boyutta partiküller olarak tanımlanmaktadır. Dahil oldukları polimerik matrisin zincirleri ile etkileşime girerek moleküler seviyede zincir hareketlerini kontrol eder ve böylelikle matrisi istenen ölçüde etkin bir şekilde güçlenmesini sağlarlar [6,7]. Bir taraftan sahip oldukları reaktif fonksiyonel grupların polimerik matris ile etkileşmesine bağlı olarak hibrit malzemelerin diğer taraftan sadece dolgu olarak nanokompozitlerin tasarımı ve üretiminde kullanılmaktadırlar. Nanokompozitlerin üretiminde sıkça kullanılan bir diğer dolgu türü metal nano parçacıklardır. Metal nano parçacıklar kimyasal olarak kontrol edilebilir boyut ve şekillerinin sağladığı fiziksel özelliklerine bağlı olarak ön plana çıkmaktadır [8]. Giderek değer kazanan metal nanoparçacıkların başında gümüş nano parçacıklar (AgNP) başı çekmektedir. AgNP'ler küresel yapıları ve boyutları nedeniyle yüzey plasmon rezonansına bağlı olarak görünür bölgede kuvvetli absorban organik kromoförlere göre daha şiddetli absorpsiyon bandı gösterirler[9]. Aynı şekilde yapı, şekil, fizikokimyasal çevre, ve partikül büyüklüğü dağılımına bağlı olarak antibakteriyel ve katalitik aktiviteler gösterirler[10]. Genel olarak, AgNP taneciklerin şekil, boyut ve boyut dağılımları farklı sentez yöntemleri, indirgeyici ajanlar ve stabilizatörler kullanılarak çeşitlendirilir[11-13]. Bu taneciklerin sentezlerinde buharlaşma/kondenzasyon ve lazerle kesme gibi yöntemleri içeren fiziksel yaklaşımlar ya da metal-iyon çözeltilerini indirgeyici ortamlarda küçük metal yığın/birikintileri haline getiren kimyasal yaklaşımlar kullanılmaktadır[14-16]. AgNP/polimer nanokompozitlerinin hazırlanmasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. “*ex-situ*” yönteminde nanoparçacıklar daha önceden ayrı bir yerde hazırlanır. Bu tanecikler çoğunlukla konsantre edilmiş gümüş kolloidi ya da kurutulmuş tanecikler halindedir. Polimerize olacak formülasyon içerisine katılarak kompozit hazırlanır[17,18]. “*in-situ*” yaklaşımda ise AgNP'ler polimerize olacak ortam içerisinde katyonik öncül kimyasalların kimyasal ya da fotokimyasal indirgenmesiyle oluşturulur[19,20]. Bu iki yöntemde farklı dezavantajlara sahiptir. “*ex-situ*” yöntemde parçacıkların polimer matris içerisindeki homojen dağılımlarının kontrolü oldukça zorken, “*in-situ*” yöntemde kolloidin taşıyıcı fazının hacminin çok olması işleme esnasında sorunlara yol açar. Stabilize AgNP'lerin polimer matrisi içinde dağılımı hem polimerin hem de AgNP'nin molekül ağırlığına karşı duyarlıdır. Polimerin suda

çözünebilmesi de etkili bir diğer faktördür. Yapılan birçok çalışma suda çözünebilir AgNP'lerin polivinil alkol ve akrilik asit gibi suda çözünebilen matrislere katılmasını incelemektedir[21-23]. Balan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada AgNP'ler polimer matris içerisinde “*in-situ*” olarak doğrudan foto-indirgeme ve foto-uyarılma yöntemlerini kullanılarak sentezlenmiş ve AgNP'lerin oluşumu akrilik polimerin foto-polimerizasyonu ile eş zamanlı olarak 4 gerçekleştirilmiştir[24]. Daha az kimyasal daha çevre dostu yöntemler sistemler geliştirmek için yeşil sentez methodu bilinen yöntemde AgNP'ler farklı bitkilerden elde edilen ekstratlar kullanılarak üretilmiştir[25-28]. Gerek nanokompozit gerek hibrit üretimi için bir başka çevreci yaklaşım da UV ile sertleşen polimerik sistemlerin kullanılmasıdır. Bu tür sistemlerin en önemli avantajları düşük enerji tüketimi, solvent içermemesi sebebiyle çevre dostu olması, yatırım maliyetlerinin düşük, üretimin seri olmasıdır[29]. Apohan ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada üreten akrilat oligomeri, “*ex-situ*” olarak hazırlanan AgNP'ler ve sol-gel kullanılarak anti-bakteriyel hibrit kaplamalar üretilmiştir[30]. Bu çalışmada trimetoksisilan termine bis[(4-β-hidroksietoksi)fenil]metil fosfin oksit üreten bileşiği ve üreten akrilat oligomeri sentezlenmiştir. Sentezlenen bileşiklere *ex-situ* olarak hazırlanan AgNP ler ve başlatıcı eklenerek UV ile sertleştirilen kaplamalar hazırlanmıştır. Hazırlanan kaplamanın E.coli ve S.aureus bakterilerine karşı yüksek antibakteriyel etki gösterdiğini gözlemişlerdir. Oktay ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise N-phidroksifenilmaleimid 3-isosiyano propiltrimetoksisilan ile reaksiyona sokularak yeni bir alkoksisilan monomeri hazırlanmıştır. Yeni monomer, polidimetilsiloksan esaslı üreten akrilat oligomeri ve *ex-situ* olarak hazırlanan AgNP lerden oluşan karışım polikarbonat plakalara uygulanmış ve UV ile sertleştirildikten sonra antibakteriyel özellikleri *in-vitro* olarak incelenmiştir[31]. Benzer bir başka çalışma ise yine Oktay ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş, trietoksi silan temrine edilmiş polidimetilsiloksan ve polidimetilsiloksan esaslı üreten akrilat oligomeri ve *ex-situ* olarak hazırlanan AgNP lerden oluşan karışım polikarbonat plakalara uygulanmış ve UV ile sertleştirildikten sonra antibakteriyel özellikleri *in-vitro* olarak incelenmiştir[32]. Yapılan tüm bu çalışmalarda fotopolimerizasyon sadece ana hibrit kaplama malzemesini sertleştirmek için kullanılmış AgNP lerin eldesi için tercih edilmemiştir. Tüm kaplamaların ısıl ve mekanik analizleri de yapılmıştır. Yapılan literatür çalışmasında konu hakkındaki dikkat çekici en büyük eksikliğin hazırlanan AgNP'lerin belirli tipte stabilizatörlerle üretilmesi, daha geleneksel yöntemlerin kullanılmasına bağlı olarak yenilikçi ve çevreci yöntemlerin daha az tercih edilmesi olduğu gözlenmiştir. Özellikle fonksiyonel gruplarla cap edilmiş AgNP'lerin farklı polimerizasyon yöntemlerinde çok az kullanıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada, UV ışınları kullanarak ile sertleştirme metodu ile AgNP ve POSS partikülleri içeren antibakteriyel özellik kazandırılmış farklı nanokompozitler üretilmiştir. Çevreye duyarlı bu yöntemin kullanılmasıyla hem AgNP üretimi *in-situ* olarak fotokimyasal yöntem ile gerçekleştirilmiş hem

metakrilat fonksiyonlu POSS taneciklerinin kovalent bağlar ile yapıya dahil olması sağlanmıştır. Literatürde yer alan muadillerine göre uygulanması kolay, daha az enerji gerektiren, solvent içermeyen ve yüksek performanslı ürünler olması hedeflenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Malzeme

POSS olarak Hybrid Plastics firmasının ürettiği Metakril-POSS® cage ($C_7H_{11}O_2$)₈(SiO_{1.5})₈ kullanıldı. Gümüş nitrat (AgNO₃), Diklorometan (CH₂Cl₂) ve Tetrahidrofuran (THF) Merck firmasından; 2-izosiyanoetil metakrilat (IEM) (97 %) TCI firmasından; Glisidol (96%) ve N-metilpirolidon (NMP) Aldrich firmasından; Dabco T12 (dibutiltin dilaurate) Evonik firmasından ve 1-Hidroksi sikloheksil fenil keton (Irgacure 184) Ciba Speciality Chemicals firmasından satın alındı ve hiçbir işleme tabi tutulmadan doğrudan kullanıldı.

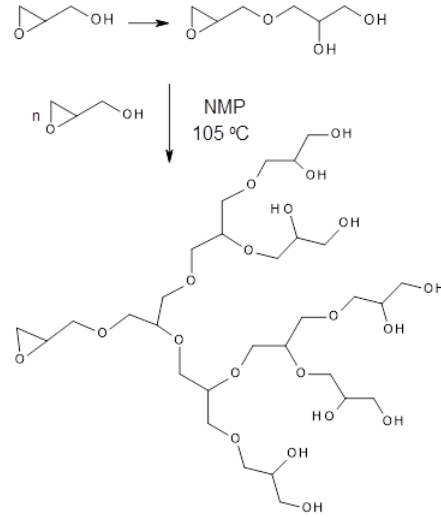
2.2. Nanokompozitlerin Karakterizasyonu

Oligomerlerin sentezi sırasında gerçekleşen reaksiyonlar Perkin Elmer markalı Spektrum 100 model spektrofotometre kullanılarak 4000-650 cm⁻¹ dalga boyu aralığında incelendi. Sentezlenen oligomerlerin yapısı ¹H-NMR spektrometre ile ayrıca doğrulandı. Numuneler DMSO da çözüldükten sonra Varian marka NMR spektrometresi kullanılarak 500 MHz de analizler gerçekleştirildi. Farklı formülasyonlarda hazırlanmış nanokompozitlerin ısı kararlılıkları SEIKO markalı EXSTAR SII TG/DTA 6300 model TGA cihazı kullanılarak ölçüldü. Ölçümler atmosfer koşulları altında 10 °C/dak ısıtma hızıyla, oda sıcaklığından 750°C ' ye kadar ısıtılarak gerçekleştirildi. Nanokompozitlerin germe-gerilme mukavemetleri başta olmak üzere elastik modülleri ve kopma uzaması değerlerini ölçmek amacıyla Zwick marka Z010 model tensilon cihazı kullanıldı. Yapılan testler için çekme hızı 5 mm/dak olarak ayarlandı. Her bir örnek için 4 ayrı test yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alındı. Nanokompozitlerin morfolojik karakterizasyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak incelendi. SEM analizi için Philips marka Philips XL-30 model ESEM-FEG cihazı kullanıldı. Analiz öncesinde düşük iletkenliğine bağlı olarak numunenin yanmaması ya da deforme olmaması için örneklere platin kaplama yapıldı. TEM analizi için JOEL 2100 HR-TEM cihazı 200 kV da kullanıldı. Kürlenmemiş formülasyonlar yaklaşık 20 kat THF ile seyreltikten sonra Cu-grid üzerine spreylendi ve grid UV ışığına maruz bırakılarak kürlenme işlemi gerçekleştirildi.

2.3. Çok dallanmış polioli (PG) sentezi (Poliglisidol Sentezi)

Üç boyunlu 1000 ml' lik balon, geri soğutucu, damlatma hunisi, mekanik karıştırıcı, termometre ve azot gazı girişinden oluşan reaksiyon düzeneği kurularak bir yağ banyosu içerisinde yerleştirildi. Balon içerisine 10 ml kuru N-metil pirolidon (NMP) yüklendi. Bir başka beherde 100 g kuru glisidol 225 ml tetrahidrofuran (THF) içerisinde çözünerek monomer

karışımı hazırlandı. Hazırlanan çözelti damlatma hunisi yardımıyla reaksiyon kabına oldukça yavaş bir şekilde damlalar halinde ilave edildi. Çözelti ilavesi yaklaşık 18 saat devam etti ve bu süre zarfında reaksiyon sıcaklığı 105°C de sabitlendi. İlave tamamlandıktan sonra yaklaşık 4 saat reaksiyona devam edildi. Reaksiyonun sonlanması FT-IR spektrumunda oksiran halkalarına ait piklerin yok olmasından anlaşıldı. Balon yağ banyosundan çıkarılarak yaklaşık 30 dk soğumaya bırakıldı. Solvent vakum altında buharlaştırıldı. Reaksiyonun ilerleyişi Şekil 1 de gösterilmiştir.



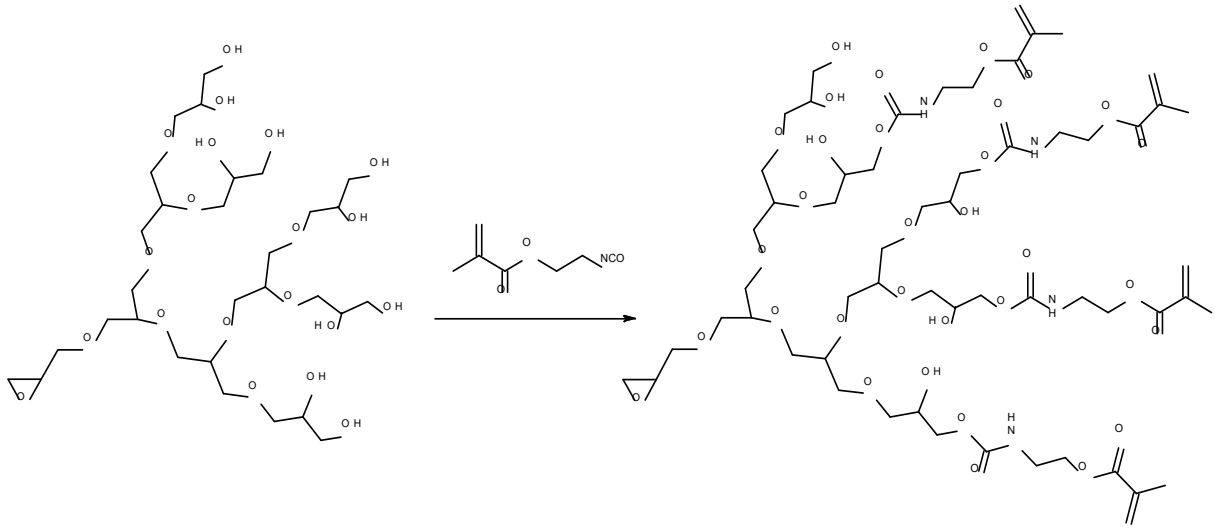
Şekil 1. Poliglisidol oligomerinin sentezi

2.4. 2-izosiyanoetil metakrilat Kullanılarak Metakrililenmiş Poliglisidol (PGUM) (Poliglisidol esashlı üretan metakrilat) Sentezi

Üç boyunlu 250 ml' lik balon, geri soğutucu, damlatma hunisi, manyetik karıştırıcı, termometre ve azot gazı girişinden oluşan reaksiyon düzeneği kuruldu. İzosiyanat grupları neme karşı oldukça duyarlı oldukları için reaksiyon düzeneğinde kullanılacak cam malzemeler önce etüv içerisinde 5 saat boyunca kurutuldu. Düzenek bağlantıları yapıldıktan sonra sistemden kuru azot gazı akışı sağlandı. Azot gazı akımı altında bir Bunsen beki yardımıyla düzenek ısıtıldı ve cam yüzeylere tutunan nem tabakası uzaklaştırıldı. Azot akışı kesilmeden soğumaya bırakılan balon içerisine 50 ml kuru CH₂Cl₂ ve daha önceden sentezlemiş olduğumuz poliglisidol oligomerinden 10.0 gr yüklendikten sonra oligomerin tamamen çözünmesi sağlandı. Tamamen homojen hale gelen ve 200 rpm sabit hızda karıştırılan çözelti üzerine 5.34 mL IEM olası yan reaksiyonların gerçekleşmemesi için bir damlatma hunisi yardımıyla damlalar halinde yavaşça ilave edildi. İlave sonrası sisteme 0.02g Dabco T12 katalizörü yüklendi. Belirli zaman aralıklarında ortamdan alınan numune FTIR spektrometresi yardımıyla incelendi ve reaksiyona oda sıcaklığında FT-IR spektrumunda 2275 cm⁻¹ de gözlenen izosiyanat gruplarına ait karakteristik bant kaybolana dek devam edildi. Yaklaşık 72 saat süren

reaksiyon sonunda ürün içerisindeki CH_2Cl_2 döner buharlaştırıcı yardımıyla vakum altında uzaklaştırıldı ve koyu renkli bir numune kabı içerisine alınarak

buzdolabında saklandı. Reaksiyonun ilerleyişi Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2. Poliglisidol esaslı üretan metakrilat Sentezi

2.5. UV Işınları ile Sertleştirilen Filmlerin Hazırlanması

Sentezlen oligomer, çapraz bağlayıcı, AgNO_3 ve foto başlatıcı Tablo 1’ de verilen oranlarda 10 mL’lik beher içerisine alınarak dört farklı kompozisyonda kompozisyon elde edildi. Germe-şekil değiştirme testlerinde kullanılmak üzere hazırlanan kompozisyonlar, kuvvetli bir karıştırma ile homojen hale getirildikten sonra hem oluşan hava kabarcıklarının uzaklaştırmak hem de kalıplara rahat dökülebilmek amacıyla vakum altında 40°C ’ de yaklaşık 10 dk bekletildi. Kabarcıkların giderilmesinden sonra formülasyonlar UV ile sertleştirme işlemi için yüzeyi temizlenmiş silanize cam kalıbın 5 x 1 x 0.1 cm boyutlarındaki bölmelerine döküldü.

Formülasyonların kalıp içerisine düzgün bir şekilde yayılmasını ve sertleşme işlemi sırasında havadaki oksijenin inhibe edici özelliğinden korunmasını sağlamak ve ayrıca reçinenin kalıp kapağına yapışmasını önlemek amacıyla bölmeleri tamamen örtecek boyutlara sahip 0,1 mm kalınlığında saydam bir teflon film kalıp üzerine yayıldı. Yüzeyde oluşabilecek dalgalanmaları önlemek üzere cam kalıp kapağı yerleştirildikten sonra kalıp düzeneği 15 cm mesafeden 2 dakika süre ile UV ışınlarına maruz bırakıldı. Sertleşen filmler kalıptan çıkarıldıktan sonra kenarları su zımparası kullanılarak törpülenerek olası pürüzler giderildi.

Tablo 1. Hazırlanan formülasyonların içeriği

Örnek	AgNO_3 (g)	Standart Çözelti (10 g)			
		Metakril- POSS® (g)	PGUM (g)	Çapraz Bağlayıcı (g)	Fotobaşlatıcı (g)
M-0	-	-	8	1,8	0,2
M-1	-	0,1	8	1,7	0,2
M-5	-	0,3	8	1,6	0,2
M-10	-	0,5	8	1,5	0,2
Mag-0	0,08	-	8	1,8	0,2
Mag-1	0,08	0,1	8	1,7	0,2
Mag-5	0,08	0,3	8	1,6	0,2
Mag-10	0,08	0,5	8	1,5	0,2

2.6. Kaplanmış Alüminyum Plakaların Hazırlanması

Hazırlanan nanokompozitlerin koruyucu kaplama olarak performanslarının belirlenmesi amacıyla Tablo 1’ de verilen oranlarda hazırlanan formülasyonlar 10 x 15 cm boyutlarına sahip eloksallanmış alüminyum plakalar üzerine kaplandı. Levha üzerindeki koruyucu film kaldırılarak olası yapışkan artığı kalmaması için aseton ile silindi. Düz bir zemin üzerine alınan plakanın dar kenarı boyunca bir köşesinden diğer köşesine bir hat şeklinde dökülen formülasyonlar 30µ’luk aplikatör yardımıyla sabit hızda çekilerek plaka üzerine kaplandı. Kaplanan plakalar 13,2 amper enerjiye sahip UV lambası ile donatılmış ve konveyör hızı 2m/dakika olarak ayarlanmış UV makinesinden 4 kez geçirilerek sertleştirildi.

2.7. Hazırlanan Kaplama Yüzeyine Uygulanan Testler

Kaplama işlemi tamamlanmış alüminyum plakalar, kaplama performanslarının belirlenmesi amacıyla temel kaplama testleri olan kalınlık, yapışma, sertlik ve parlaklık testlerine tabi tutuldu.

Kalınlık Testi: Uygulanan kaplamanın performansının özdeş olabilmesi homojen bir kalınlığa sahip olması gereklidir. Bu amaçla kaplama yapılmış levhaların kalınlıkları PCE-CT 27 kaplama test cihazı yardımıyla 5 farklı noktadan ölçülerek elde edilen değerlerin ortalaması alındı.

Yapışma Testi: Ölçümler sonunda homojen bir kalınlığa sahip olan kaplanmış plaka yüzeyine kesme aralığı 1 mm olan 11 dişli bir bıçak yardımıyla dik açılı bir kafes deseni şeklinde kesikler atıldı. Kesi üzerine ASTM D 3359 standardına uygun bir bant yapıştırıldıktan sonra bant sabit bir hızla çekildi. Yumuşak bir fırça yardımıyla yüzey temizlendi. Levha üzerinde tam ya da kısmen kalan kare sayısı standarda uygun bir şekilde değerlendirildi.

Sertlik Testi: ASTM D 4366 standardına göre yapılan testlerde kaplamaların sarkaç sertliği ölçülmüştür. Kaplama yüzeyine sarkacın oturmasını sağlayan, 5 mm çapında ve birbirinden 30 mm uzaklıktaki iki çelik bilyeden oluşan aryak yerleştirildi ve ardından 200 g ağırlığındaki sarkaç salınma bırakıldı. Sarkacın sönümlenene kadar yaptığı salınım sayısı köniğ cinsinden belirlendi.

Parlaklık Testi: Parlaklık ölçme cihazı yardımıyla kaplanmış levha üzerine 20°, 60°, 85°’lik açılarla ışık düşürülerek yansıyan ışığın şiddeti ölçüldü.

2.8. Antibakteriyellik Testleri

in-situ fotokimyasal yöntemle gümüş nano tanecikleri üretilen filmlerde gerek yöntemin etkinliği gerek üretilen kaplama malzemesinin antibakteriyellik performansını ölçmek amacıyla “Zon İnhibizasyonu” olarak bilinen test uygulandı. Antibakteriyel aktivite testi Mueller Hinton Agar üzerinde disk difüzyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi (Valgas et al., 2007). Test edilecek örnek disklerinin antibakteriyel aktivite testlerinde kontrol soyları olarak Escherichia

coli ATCC 8739 ve Staphylococcus aureus ATCC 29213 kullanıldı. Gram negatif (E.coli) ve Gram pozitif (S. aureus) hücre duvarı yapısına sahip olmaları nedeniyle bu bakteri soyları seçildi. Petri plakları 4 bölgeye ayrıldı. Her bir parça test edilecek örneklerin antibakteriyel aktivite testleri için kullanıldı. Ek olarak; bir Petri plağı da pozitif kontrol olarak kullanılacak 30µgr chloramphenicol içeren (C30) (HIMEDIA) antibiyotik diskinin E.coli ve S. aureus’ a karşı test edilmesi için kullanıldı. E.coli ve S. aureus kontrol soylarının başlangıç hücre süspansiyonları, Mueller Hinton sıvı besiyerinde büyütülen her iki bakterinin taze kültürlerinden nephelometer (Crystal Spec™, Becton Dickenson, USA) kullanılarak, 0.5 McFarland’ a [E.coli için 108 cfu (colony forming unit)/ml, S.aureus için 8 x 108 cfu/ml] %0.85 (w/v) steril fizyolojik tuzlu su (FTS) içinde hazırlandı. Test edilecek pozitif ve negatif örnek diskleri MHA içeren Petri plakları üzerine yerleştirildi. İnoküle edilmiş Petri plakları 37°C’ ta 24 saat inkübe edildiler. İnkübasyon periyodunun ardından, agar yüzeyinde test edilen örnek disklerinin etrafında oluşan 31 inhibisyon zonları ölçülerek mm olarak kaydedildi. Test tüm örnek diskler için iki tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirildi. Ek olarak, başlangıç hücre sayısını belirlemek amacı ile her bir bakteri soyunun 0,5 McFarland süspansiyonundan 100 µl mikropipet ile çekildi ve 900 µl steril FTS içeren Eppendorf tüplerine sırasıyla aktarıldı. Her bir bakteri süspansiyonu için 10-1 den 10-8 ’ e kadar seri dilüsyonlar hazırlandı. Her bir dilüsyondan 100’ er µl alınarak MHA üzerine swab yardımı ile ekildiler ve 37°C’ ta 24 saat inkübe edildiler. İnkübasyon periyodunun ardından, 30-300 koloninin agar yüzeyinde görünür hale geldiği dilüsyona ait Petri plağı üzerindeki bakteri kolonileri sayıldı ve test başlangıç hücre sayısını hesaplamak için kullanıldı.

2.9. Jel İçeriğinin Belirlenmesi

UV ile serleştirilen nanokompozit filmlerin jel içerikleri Soxhlet ekstraksiyonu ile belirlendi. Bu amaçla sabit tartımları alınan örnekler kartuş içerisine yerleştirildikten sonra saf aseton ile muamele edildi. Ortalama 8 saat süren ekstraksiyon işlemi sonunda örnekler sabit tartıma gelene dek 40°C’lik vakum etüvünde kurutuldu. Jel içeriğinin hesaplanmasında Eşitlik (1) kullanıldı.

$$Q (\%) = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100 \quad (1)$$

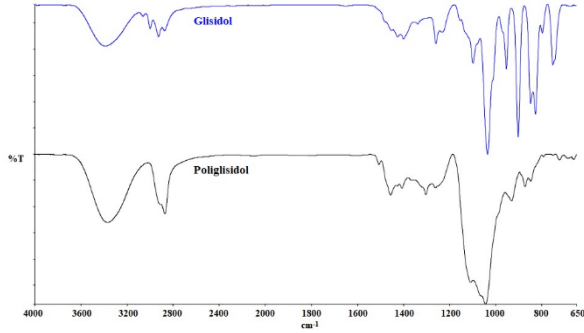
Eşitlik (1) de Q jel içeriğini, W₁ başlangıç ağırlığını W₂ ise son ağırlığı ifade etmektedir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. FTIR Analiz Sonuçları

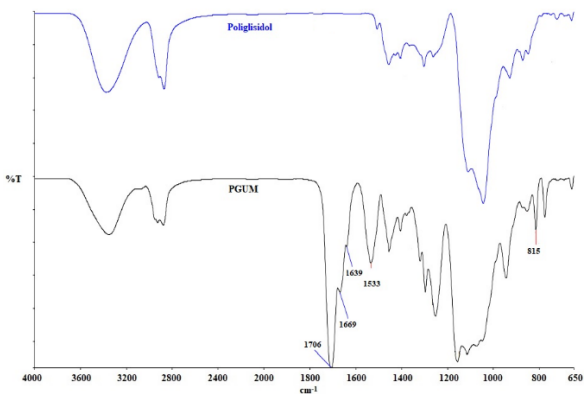
Poligliseridol sentezinde, reaksiyonun ilerleyişi Şekil 3’de verilen FT-IR spektrumu yardımıyla izlendi. FT-IR spektrumundan görüleceği üzere reaksiyonun başarıyla gerçekleştiği, epoksi gruplarına ait 835 cm⁻¹

de karakteristik C-O gerilme bandı ile 905 cm^{-1} de yer alan karakteristik C-O deformasyon bandının kaybolması ile anlaşılmaktadır. Halka açılması polimerizasyonu sonucunda epoksit halkalarının açılarak meydana getirdiği ikincil -OH grupları da, 3450 cm^{-1} de bulunan -OH gruplarına ait karakteristik yayvan bandın şiddeti arttırmaktadır.



Şekil 3. Glisidol ve Poliglisidole ait FTIR spektrumu

Poliglisidol Esaslı Üretan Metakrilat sentezinde, reaksiyonun ilerleyişi izosiyanat grupları üzerinden izlenmiştir. Şekil 4'de verilen FT-IR spektrumunda görüldüğü üzere 2275 cm^{-1} 'de görülmesi gereken NCO gruplarına ait karakteristik asimetrik gerilme titreşim bandının olmayışı; üretan bağları üzerinde yer alan karbonil ($\text{C}=\text{O}$) grubuna ait gerilim bandının 1706 cm^{-1} 'de, -NH grubuna ait deformasyon bandının 1533 cm^{-1} 'de ve C-O bağına ait titreşim bandının 1320 cm^{-1} 'de oluşması reaksiyonun tamamlandığını göstermektedir. Ayrıca 1639 cm^{-1} 'de omuz şeklinde görülen bant ile 815 cm^{-1} de görülen bant metakrilat grubu üzerinde yer alan C=C çift bağına ait olup elde edilen sonuçlardan UV ile sertleşme için gerekli fonksiyonel grupların kazandırıldığı anlaşılmaktadır.

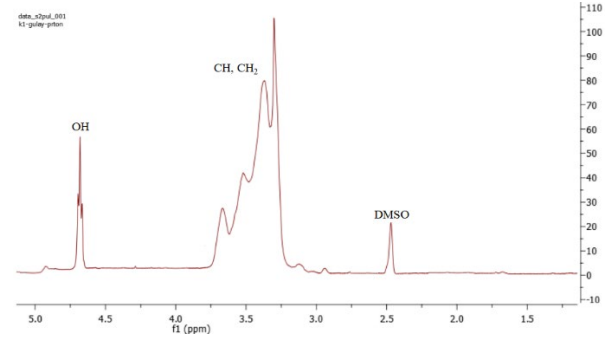


Şekil 4. Poliglisidol Esaslı Üretan Metakrilat Reçinesine ait FTIR spektrumu

3.2. NMR Analiz Sonuçları

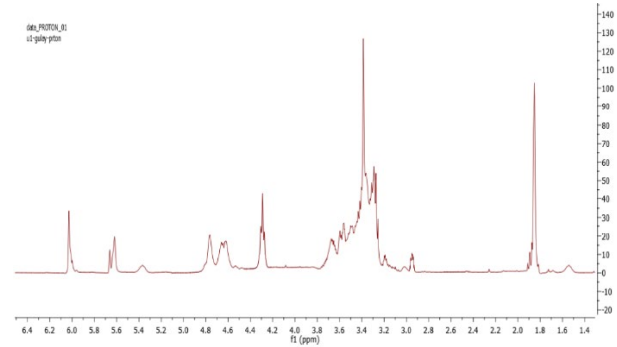
Sentezlenen oligomerlerin yapıları FT-IR analizi dışında $^1\text{H-NMR}$ spektrometresi kullanılarak doğrulandı. Poliglisidol oligomerine ait Şekil 5'de verilen $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda -CH ve -CH₂

protonlarına ait geniş multipler 3,4 ppm ila 4,0 ppm arasında gözlenirken -OH protonlarına ait pik ise 4,65 ppm de gözlemlendi.



Şekil 5. Poliglisidol oligomerine ait $^1\text{H-NMR}$ spektrumu

Poliglisidol Esaslı Üretan Metakrilat oligomerine ait Şekil 6'da verilen $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda poliglisidol bloğu üzerinde bulunan -CH ve -CH₂ protonlarına ait geniş multipler 3,4 ppm ila 4,0 ppm arasında gözlenirken metakrilat bloğu üzerinde bulunan -CH₂ protonlarına ait pikler 4,28 ppm ve 3,3 ppm de, H-C=C-H çift bağ protonlarına ait pikler 6,08 ppm ve 5,63 ppm de ve -CH₃ protonlarına ait pikler 1,94 ppm de gözlemlendi. 4,65 ppm de gözlenen -OH protonlarına ait pikin şiddetinin azalması ve 5,38 ppm de -NH protonlarına ait pikin oluşması oligomerin başarıyla sentezlendiğini gösterdi.



Şekil 6. Poliglisidol esaslı üretan metakrilat oligomerine ait $^1\text{H-NMR}$ spektrumu

3.3. Çekme (Germe-Şekil Değiştirme) Analizleri

Hazırlanan nanokompozitlere ait germe-şekil değiştirme test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. PGUM oligomeri içeren örneklerde çeşitli oranlarda metakril-POSS katılarak elde edilen nanokompozitlerde elastik modül %5 katkı oranına erişene dek küçük bir artış göstermiş ardından elastik modülde bir düşme gözlemlenmiştir. POSS içermeyen formülasyonun kopma mukavemeti 1,84 Mpa iken POSS içeriğinin artmasıyla bu değer 2,93 Mpa'ya erişmektedir. 1% ve 5% Metakril-POSS ilavesi ile kopma uzaması 6,4% değerinden bir düşüş sergilemiştir. Ortama katılan

metakrilat grupları arttıkça çapraz bağlanma oranı da artarken POSS gruplarının varlığı da zincir hareketliliğinin kısıtlamaktadır. Ancak 10% katkılama oranına çıkıldığında tekrar bir artış göstererek 5,5% değerine ulaşmıştır. Bu durumun nedeni olarak POSS gruplarının, metakrilat bağları arasına girerek çapraz bağlanmayı kısıtlamaya başlaması olduğu düşünülmektedir. Filmlerin reaksiyona girmemiş monomer içeriklerindeki artışta bu durumu desteklemektedir.

Tablo 2. Nanokompozitlere ait germe-gerilme değerleri

Örnek	Kopma Anındaki Mukavemet (Mpa)	Kopma Uzaması (%)	Modül (Mpa)
M-0	1,84	6,4	31,2
M-1	2,34	4,5	40,5
M-5	2,43	4,4	42,0
M-10	2,93	5,5	37,6
Mag-0	1,11	3,9	23,6
Mag-1	1,46	4,3	33,5
Mag-5	1,53	4,2	28,2
Mag-10	1,80	6,2	22,3

Nanokompozit formülasyonlarına AgNO₃ ilavesi, UV ile kürlenme başlar başlamaz ortamda gümüş nanopartiküllerinin oluşmasına neden olmuştur. Ortamda gümüş partiküllerinin oluşması ile malzemenin kopma mukavemeti ve kopma uzamasından gümüş içermeyen numunelere kıyasla bir düşüş gözlenmiştir. Bu durum gümüş nano taneciklerinin oluşması ile kompozitlerin renginin giderek koyulaşması, UV ışığı dolayısıyla fotobaslatıcı etkinliğinin azalarak çapraz bağ yoğunluğunu düşürmesine bağlanabilir. Buna karşın gümüş içeren örneklerde metakril-POSS içeriği arttıkça mukavemet ve kopma uzamasının arttığı görülmüştür. Oluşan gümüş nanopartiküllerinin nispeten daha büyük POSS

molekülleri etrafında oluşması ve nano boyutta homojen dağılım sergilememesi nedeniyle gümüş içermeyen örneklerin daha mukavim oldukları söylenebilir.

3.4. Kaplama Testleri

Serbest filmlere yapılan testler dışında alüminyum plakaların yüzeyi söz konusu formülasyonlar ile kaplanmış ve hazırlanan nanokompozitlerin kaplama malzemesi olarak sergiledikleri özellikler de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3' de gösterilmiştir. Kaplama malzemesinin dışarıdan uygulanan mekanik etkilere karşı sergilediği direnç sertlik olarak adlandırılırken kaplamanın alt tabakadan ayrılmasına, çatlamasına veya meydana gelebilecek deformasyona karşı sergilediği direnç ise esneklik olarak adlandırılır. Sarkaç sistemi ile yapılan testler bilinenin aksine kaplama sertliği değil kaplama malzemesinin elastik ve visko-elastik davranışını belirlemek için gerçekleştirilirler. Kaplama malzemelerinin sert ve rijit yapıda olmasından ziyade koruyucu özellikler sergileyebilmeleri için yüksek değerlerde sert ancak elastik olması istenir. Bu nedenle sarkaç testinde ölçülen sönümlenme süresi kaplama malzemesinin esnekliği hakkında bilgi verir. Kohing-Albert Pendulum sarkacı ile gerçekleştirilen sarkaç sertlik test sonuçlarına göre alüminyum plakayı kaplamada kullanılan gümüş içermeyen örneklerin sarkaç sertlikleri, König sertlik birimi olarak, çapraz bağ yoğunluğunun düşük olması nedeniyle genel olarak düşük kalmakla birlikte seri içinde POSS miktarına bağlı olarak bir artış gözlenmektedir. Gümüş nano partiküllerinin oluşması ile seri içinde artış devam etmekte ancak ölçülen sarkaç sertlik değerleri gümüş tanecikleri içermeyen örneklerden daha düşük kalmaktadır. AgNP'lerin oluşması ile kaplama renginin giderek koyulaşması buna bağlı olarak da ışık geçirgenliğinin düşmesi çapraz bağlanma oranını azaltıcı etkide bulunmaktadır. Soxhlet ile yapılan ekstraksiyon işlemleri sonrasında ölçülen jel içerikleri de bu durumu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Kaplama malzemesinin karakterizasyonu

Örnek	Kalınlık (Mpa)	Yapışma*	Parlaklık (85°)	Sertlik (König)	Jel miktarı (%)
M-0	33	Gt5	94	48	81
M-1	31	Gt5	90	46	84
M-5	32	Gt5	92	56	85
M-10	33	Gt5	95	68	84
Mag-0	32	Gt5	63	41	78
Mag-1	31	Gt4	47	37	82
Mag-5	29	Gt4	62	42	81
Mag-10	31	Gt3	66	53	78

*Gt 5 en iyi yapışma, Gt0 en kötü yapışmayı belirtmektedir.

Kaplama yüzeyine düşen ışınların geri yansımaları parlaklık olarak ifade edilir. Parlaklık kaplamanın içindeki maddelerin miktarına, formülasyonun karıştırılma işleminin yeterli derecede yapıldığına ve kalınlığına bağlı olarak değişimler gösterir. Parlaklık test sonuçlarında, genel olarak metakrilat grup içeriğinin artmasına bağlı olarak bir artış gözlenmiştir. Buna karşın POSS içeriğindeki artış, her ne kadar seri içindeki artış karakterini değiştirmese de amorf yapısından dolayı genel akrilik esaslı kaplamalara kıyasla düşük kalmaktadır.

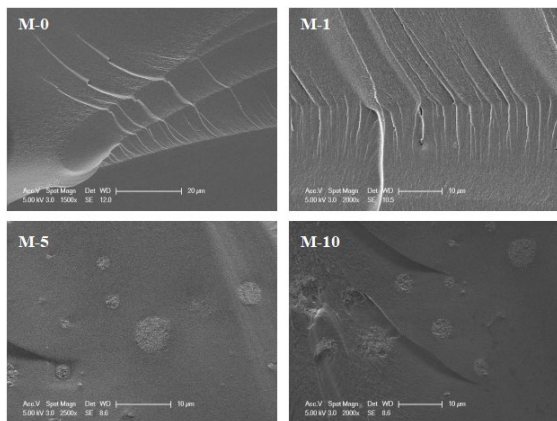
Gümüş nano partiküllerinin oluşması ile kaplama parlaklığı düşmektedir. Yapı içindeki gümüş nano partiküllerinin POSS partikülleri etrafında oluşmasına bağlı olarak moleküler düzeye homojen dağılması ve ışığı farklı ve düzensiz açılarla yansıtması nedeniyle parlaklık düşmektedir.

Yapışma test sonuçlarına göre, gümüş içermeyen kaplamaların yapışma performansı yüksektir. POSS içeriğinin artmasına bağlı olarak artan homojen olmama durumu kaplama malzemesinin yapışma performansı üzerinde de etkilidir. Kümelenme eğilimi arttıkça gümüş nano partikülleri eloksallı tabaka ile kaplama malzemesi arasına girerek aralarındaki etkileşimi zayıflatmaktadır.

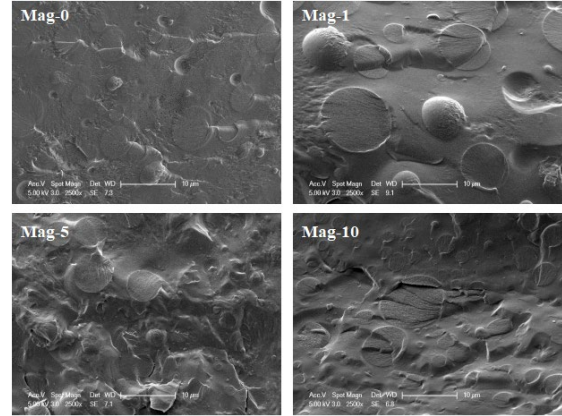
3.5. Morfolojik Özellikler

3.5.1. SEM analizi

Şekil 7'de AgNP içermeyen nanokompozitlere ait SEM görüntüleri verilmiştir. Filmlerin kırık yüzeylerinde elde edilen görüntüler incelendiğinde metakrilat POSS içeriği arttıkça bir kümelenmenin başladığı görülmektedir. POSS içeriği arttıkça POSS kümelerinde kesilen çatlak ilerlemesi görülmektedir. M-0 ve M-1 numunelerinde görülen Şekil 8'da verilen gümüş tuzu ile hazırlanmış formülasyonlara ait görüntüler incelendiğinde POSS içeriği arttıkça faz ayrımı oluştururcasına küresel formların oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu küresel formların kırık yüzeyleri boyunca AgNP içermeyen nanokompozitlere göre daha pürüzlü bir çatlak yayılması mevcuttur.



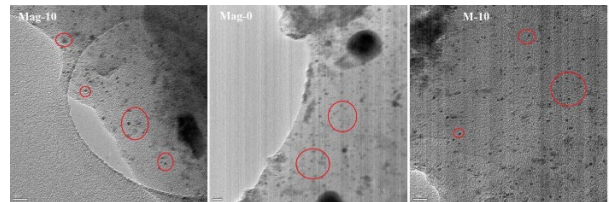
Şekil 7. AgNP içermeyen nanokompozitlere ait SEM görüntüleri.



Şekil 8. AgNP içeren nanokompozitlere ait SEM görüntüleri.

3.5.2. TEM analizi

Şekil 9'da verilen kompozitlere ait TEM görüntüleri incelendiğinde gümüş içermeyen Mag-0 kodlu formülasyonda yaklaşık 5-8 nm boyutlara ve küresel şekillere sahip AgNP'lerin olduğu ve nispeten homojen dağılım sergiledikleri; sadece POSS partikülleri içeren M-10 kodlu formülasyonda ise 3-5 nm boyutlara sahip ancak AgNP'lerin aksine kare şekilli POSS moleküllerinin varlığı ve homojen dağılım sergiledikleri görülmektedir. Hem POSS hem de AgNP içeren Mag-10 kodlu formülasyonda ise her iki nanopartikülün de varlığı, diğer örneklerle göre homojen dağılımın azaldığı ve AgNP'lerin POSS molekülleri arasında kümelenmeye başladıkları görülmektedir. Bu durum POSS varlığından bağımsız, *in-situ* olarak gümüş nano taneciklerinin başarı ile elde edildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Mag-10, M-10 ve Mag-0 kodlu nanokompozitlere ait TEM görüntüleri.

3.6. Antibakteriyellik Testi

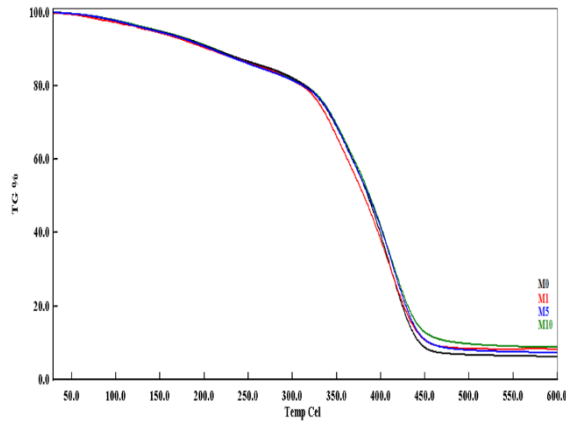
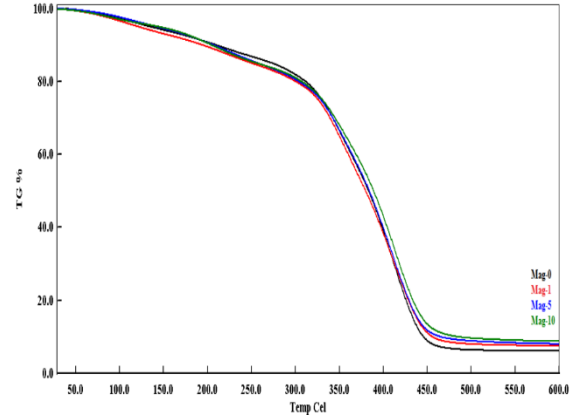
Gram (+) bir bakteri olan *Staphylococcus aureus* ve Gram (-) bir bakteri olan *Escherichia coli* kullanılarak gerçekleştirilen antibakteriyellik test sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hazırlanan gümüş içeren kaplamaların *E.Coli* için 12 mm, *S.Aureus* için 16 mm zone çapına ulaştıkları görülmektedir. Gram (+) bakteriler için daha yüksek olmakla beraber kaplamaların genel olarak antibakteriyel özellik gösterdiği görülmüştür. Kaplamaların antibakteriyel özellik göstermiş olmaları sertleşme sürecinde fotobaşlatıcı ve UV ışığı yardımıyla gümüş nano taneciklerinin oluştuğunu da ayrıca doğrulamaktadır.

Tablo 4. Nanokompozitlere ait antibakteriyellik test sonuçları

Örnek	Standart bakteri soyları ve Ölçülen zon çapları (mm)	
	<i>E. coli</i> (ATCC 8739)	<i>S. aureus</i> (ATCC 29213)
	M-0	-
Mag-0	11	15
M-1	-	-
Mag -1	11	15
M-5	-	-
Mag -5	12	16
M-10	-	-
Mag -10	12	15

3.7. TGA Analizleri

Hazırlanan nanokompozitlerin ısı kararlılıklarını belirlemek amacıyla Termal Gravimetrik Analiz (TGA) yöntemi kullanıldı. Yapılan analiz sonucu elde edilen ve Şekil 10 ve Şekil 11'de verilen bozunma termogramları ile Tablo 5'de verilen sonuçlara göre nanokompozitler iki ana basamakta bozunma davranışı sergilerken 205-210 °C sıcaklık aralığında % 20'lik kütle kaybına uğramaktadır. 380 °C üzerinde ise ikinci bozunma basamağı bir başka deyişle maksimum kütle kaybı gerçekleşmektedir. Kütle kaybının en yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği formülasyon %10 metakril-POSS içeren formülasyondur. Elde edilen sonuçlardan hazırlanan nanokompozitlerin ısı kararlılıklarının yüksek olduğunu ve yapının içerisine gümüş nano partiküllerinin ilavesi ile keskin farklılıklar oluşmadığını göstermektedir. Geri kalan, kül (char) miktarı örneklerimizdeki POSS molekülünden gelen Si miktarının artışı ile paralel yönde davranarak artmaktadır.

**Şekil 10.** AgNP içermeyen nanokompozitlere ait TGA termogramları**Şekil 11.** AgNP içeren nanokompozitlere ait TGA termogramları**Tablo 5.** Nanokompozitlere ait TGA sonuçları

Malzeme	T_{d20} (°C)	Maksimum Bozunma Sıcaklığı (°C)	550°C deki kalıntı miktarı (%)
M-0	210	385	6,2
M-1	204	381	8,1
M-5	207	386	7,3
M-10	211	388	8,8
Mag-0	209	383	6,2
Mag-1	193	380	7,5
Mag-5	206	384	8,0
Mag-10	203	389	8,8

IV. SONUÇ

Sonuç olarak yapılan çalışmada; glisidol esalı oligomerlerin sentezi ve karakterizasyonu, metakrilik fonksiyonlu oligomerlerin sentezi ve karakterizasyonu; fonksiyonel POSS kullanılarak poligliserol esalı oligomerlerin modifikasyonu; gümüş tuzu, metakrilik fonksiyonlu oligomerler, fotobaslatıcı ve UV ışınları kullanılarak nanokompozitlerin hazırlanması, karakterizasyonu ve çeşitli yöntemlerle performansının incelenmesi olarak belirlenen hedeflere ulaşılmıştır. Elde edilen veriler ışığında izosiyanatoetil metakrilat kullanılarak metakrililenmiş poligliserol oligomerinin bilhassa fiziksel performansını arttırmak için üretilen bağlarının sayısının (dolayısıyla metakrilat fonksiyonlarının) artırılabilirliği; formülasyona katılan gümüş tuzu miktarının değiştirilerek antibakteriyel performansın artırılabilirliği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK'IN 114M049 numaralı projesinin desteği ile gerçekleştirilmiştir. Germe-Şekil değiştirme analizlerinin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Arş.Gör. Mehmet Mudu' ya teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Balaz, A.C., Emrick, T., Russel, T.P. (2006). Nanoparticle Polymer Composites: Where Two Small Worlds Meet. *Science*, 314 (5802), 1107-1110.
- [2] Sen, M. (2020). Nanocomposite Materials. In (Ed.), *Nanotechnology and the Environment*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93047>
- [3] Darwish, M.S.A., Mostafa, M.H., Al-Harbi, L.M. (2022). Polymeric Nanocomposites for Environmental and Industrial Applications. *Int. J. Mol. Sci.*, 23(3),1023. <https://doi.org/10.3390/ijms23031023>
- [4] Judeinstein, P., Sanchez, C. (1996). Hybrid organic-inorganic materials: A land of multidisciplinary. *J. Mater. Chem.*, 6,511.
- [5] Mutin, P.H., Guerrero, G., Vioux, A. (2003). Organic-inorganic hybrid materials based on organophosphorus coupling molecules: from metal phosphonates to surface modification of oxides. *C. R. Chim.*, 6, 1153-1164.
- [6] Su, C.H., Chiu, Y.P., Teng, C.C., Chiang, C.L. (2010). Preparation, characterization and thermal properties of organiceinorganic composites involving epoxy and polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS). *J Polym Res.*, 17, 673-81,
- [7] Marcinkowska, A., Przadka, D., Dudziec, B., Szczesniak, K., Andrzejewska, E. (2019). Anchor Effect in Polymerization Kinetics: Case of Monofunctionalized POSS. *Polymers*, 11(3), 515. <https://doi.org/10.3390/polym11030515>
- [8] Wani, I.A., Khatoon, S., Ganguly, A., Ahmed, J., Ahmad, T. (2013). Structural characterization and antimicrobial properties of silver nanoparticles prepared by inverse microemulsion method. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 101, 243–250.
- [9] Balan, L., Malval, J., & Lougnot, D. (2010). In Situ Photochemically assisted Synthesis of Silver Nanoparticles in Polymer Matrixes. In (Ed.), *Silver Nanoparticles*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/8504>
- [10] Abid, J.P., Wark, A.W., Brevet, P.F., Girault, H.H. (2002). Preparation of silver nanoparticles in solution from a silver salt by laser irradiation. *Chem Commun.*, 7, 792-793.
- [11] Sun Y, Xia Y. (2002). Shape-controlled synthesis of gold and silver nanoparticles. *Science*, 298, 2176-2179.
- [12] Zhang, Y., Yang, P., Zhang L. (2012). Size- and shape-tunable silver nanoparticles created through facile aqueous synthesis. *Journal of Nanoparticle Research*, 15, 1329.
- [13] Shenashen, M.A., El-Safty, S.A., Elshehy, E.A. (2014). Synthesis, Morphological Control, and Properties of Silver Nanoparticles in Potential Applications. *Particle & Particle Systems Characterization*, 31(3), 293-316.
- [14] Malina, D., Sobczak-Kupiec, A., Wzorek, Z., Kowalski Z. (2012). Green synthesis of silver nanoparticles using Argemone. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 7(4), 1527-1534.
- [15] Lue J.T. (2007). . Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Ed: Nalwa H.S., Valencia CA: American Scientific Publishers.
- [16] Amendola, V., Polizzi, S., Meneghetti, M. (2007). Free silver nanoparticles synthesized by laser ablation in organic solvents and their easy functionalization. *Langmuir*, 23, 6766–70.
- [17] Balan L., Burget, D. (2006). Synthesis of metal/polymer nanocomposite by UV-radiation curing. *European Polymer Journal*, 42(12), 3180–3189.
- [18] Sawada, H., Sasaki, A., Sasazawa, K., Toriba, K., Kakehi, H., Miura, M., Isu, N. (2008). Preparation of Colloidal Stable Fluoroalkyl End-Capped Oligomer/Silver Nanocomposites. *Polym. Adv. Tech.*, 19, 419 – 424
- [19] Sudeep, P.K., Kamat, P.V. (2005). Photosensitized growth of silver nanoparticles under visible light irradiation: a mechanistic investigation.. *Chemistry of Materials*, 17(22), 5404– 5410.
- [20] Yağcı, Y., Sangermano, M., Rizza, G., 2008. In situ synthesis of gold-cross-linked poly(ethylene glycol) nanocomposites by photoinduced electron transfer and free radical polymerization processes. *Chemical Communications*, 24, 2771–2773.
- [21] Pencheva, D., Bryaskova, R., Kantardjie, T. (2012). Polyvinyl alcohol/silver nanoparticles (PVA/AgNps) as a model for testing the biological activity of hybrid materials with included silver nanoparticles. *Materials Science and Engineering C*, 32, 2048–2051.
- [22] Kim, T., Nam, S., Lim, S., Kim, H. (2012). Facile In-Situ Preparation of Poly(Acrylic Acid)- Silver Nanocomposite Thin Films with Highly Dispersed Silver Nanoparticles. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 568(1),170-178.
- [23] Kong H., Jang J. (2006). One-step fabrication of silver nanoparticle embedded polymer nanofibers by radical-mediated dispersion polymerization. *Chem. Commun.*, 28, 3010– 3012.
- [24] Balan, L., Schneider, R., Lougnot, D.J. (2008). A new and convenient route to polyacrylate/silver nanocomposites by light-induced cross-linking polymerization”, *Progress in Organic Coatings*, 62(3), 351–357.
- [25] Awwad, A.M., Salem, N.M., Abdeen A.O., (2013). Green synthesis of silver nanoparticles using carob leaf extract and its antibacterial activity. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4,29.
- [26] El-sherbiny, I.M., Salih, E., Reicha, F.M., (2013). Green synthesis of densely dispersed and stable silver nanoparticles using myrrh extract and evaluation of their antibacterial activity. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3, 8.

- [27] Krishnaraj, C., Jagan E.G., Rajasekar S., Selvakumar P., Kalaichelvan P.T., Mohan N. (2010). Synthesis of silver nanoparticles using *Acalypha indica* leaf extracts and its antimicrobial activity against water borne pathogens. *Colloids Surf. B. Biointerfaces*, 76, 50–56.
- [28] Nabikhan A., Kandasamy K., Raj A., Alikunhi N.M. (2010). Synthesis of antimicrobial silver nanoparticles by callus and leaf extracts from saltmarsh plant, *Sesuvium portulacastrum*. *L. Colloids Surf. B. Biointerfaces*, 79, 488–493.
- [29] Bayramoğlu, G., Kahraman, M.V., Apohan, N.K. Güngör, A. (2006). Synthesis and characterization of UV-curable dual hybrid oligomers based on epoxy acrylate containing pendant alkoxy silane group. *Progress in Organic Coatings*, 57, 50-55.
- [30] Toker, R.D, Kayaman, N.A, Kahraman M.V. (2013). UV-curable nano-silver containing polyurethane based organic-inorganic hybrid coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76(9), 1243–1250.
- [31] Oktay, B., Kayaman, N.A. (2013). Maleimide Containing UV-Cured Hybrid Coatings. *Advances in Polymer Technology*, 32, 21341.
- [32] Oktay, B., Kayaman, N.A. (2013). Polydimethylsiloxane (PDMS)-based antibacterial organic-inorganic hybrid coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 10 (6), 785-798.

Effect of Doping Concentration and Excitation Power on Upconversion and Temperature Sensitivity of $Gd_3Ga_5O_{12}:Yb^{3+}/Er^{3+}$ Phosphors

Hümeýra ÖRÜCÜ¹ 

¹Ege University, Physics Department, 35040, Izmir, Turkey

Abstract

Yb/Er codoped $Gd_3Ga_5O_{12}$ nanocrystalline upconverting phosphors were produced by the sol-gel pechini method at 1000 °C annealing temperature. The phosphor structure, morphological features, and luminescent properties of the fabricated material were studied using X-ray diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), high-resolution TEM (HR-TEM), and photoluminescence measurements (PL). Upconversion luminescence characteristics were investigated in the range of 450-850 nm by a 975 nm laser source. Emission, optical, and theoretical thermal behaviors were analyzed with respect to Er^{3+} ion content and the increasing excitation power. Temperature sensitivity calculations based on the fluorescence intensity ratio were performed by employing the thermally-coupled levels of Er^{3+} . The maximum sensitivity was calculated with the optimal value of $0.83 \times 10^{-2} K^{-1}$ for $Gd_3Ga_5O_{12}:2\%Yb^{3+},0.5\%Er^{3+}$ nanophosphor. The results pointed out that Yb/Er codoped $Gd_3Ga_5O_{12}$ may be a potential candidate for optical temperature sensors and lighting.

Keywords: Nanophosphors, upconversion, color parameters, optical temperature sensing, luminescence thermometers

I. INTRODUCTION

Trivalent rare earth ions doped inorganic host matrixes based on an upconversion process have been of great interest due to their convenient applications such as new generation of optical temperature sensors, lasers, display devices, solar cells in the visible region, and biomedical imaging [1–10]. Nowadays, the noncontact remote temperature measurement of phosphors based on the fluorescence intensity ratio (FIR) technique is applied on thermally coupled levels (TCLs) of rare earth ions for temperature sensitivity performance. The FIR technique is predicated on the concept of the Boltzmann distribution, which elucidates the manner in which electrons are allocated between two energy levels situated in close proximity. In the event that thermal energy causes the energy gap between these levels to be closed, a state of thermal equilibrium is attained, and the levels are designated as being thermally coupled. The method measures the ratio of the fluorescence intensities at two TCLs wavelengths, and the temperature of the material can be determined. The FIR method has advantages over other temperature measurement methods, including non-contact measurement, high sensitivity, and fast response time. The FIR method is commonly used in various industries, such as the high-magnetic field, biomedical research, and materials science, where precise temperature measurement is critical. The FIR technique has a higher sensitivity in a more comprehensive temperature range than other temperature measurement techniques [10–13].

Nanostructured Gd-based garnets are regarded as promising luminescence host materials due to having high chemical, physical, and thermal stability performance [14,15]. Gadolinium gallium garnet (GGG) has lower phonon energy ($\sim 650 \text{ cm}^{-1}$) and proven efficient host material that supports high concentrations of RE^{3+} substituted with Gd^{3+} ions without charge compensation [16,17].

Few research attempts have been focused on the temperature-sensing behavior of luminescence properties of gadolinium gallium garnet ($Gd_3Ga_5O_{12}$, GGG) [17–20]. Piao et al. studied ratiometric thermometry performance based on the FIR of the $Er:Gd_3Ga_5O_{12}$ single-crystal in the temperature range of 298–423 K and calculated $(10.4\text{--}15.0) \times 10^{-3} K^{-1}$ relative sensitivities at 310 K [18]. Zhang et al. reported the low temperature sensitivity properties of $Gd_3Ga_5O_{12}:Yb^{3+}/Er^{3+}$ nanocrystals doped by Fe^{3+} in the temperature range from 300 K to 4.2 K [19]. Sun et al. demonstrated the optical thermometry properties of FIR of upconverted thermally coupled level emissions of $Er:Gd_3Ga_5O_{12}$ single crystal exhibiting $(6.1\text{--}113.5) \times 10^{-3} K^{-1}$ relative sensitivity in the 100 K–430 K temperature range [20]. Kniec et al. measured the temperature-sensing performance of Cr^{3+} , Fe^{3+} , and Nd^{3+} codoped gadolinium gallium garnet nanocrystals [17].

Corresponding Author: Hümeýra ÖRÜCÜ, Tel: 0232 311 23 81, e-posta: humeyra.orucu@ege.edu.tr

Submitted: 22.01.2023, **Revised:** 20.03.2023, **Accepted:** 08.04.2023

In this sense, our research focused on optimizing upconversion luminescence properties of two-ion codoped gadolinium gallium garnet (GGG) nanophosphors. Our recent study reveals the energy transfer, and optical temperature sensitivity properties of Yb/Er co-doped GGG nano phosphors annealed at 800 °C and 1200 °C [16]. The position of peaks, emission intensity, emission band shape, and particle sizes of the nanophosphors are sensitively altered by the annealing temperature, doping concentration, and excitation power. In this study, the influence of Er³⁺ concentration and excitation power on upconversion luminescence, color, and laser-heat induced optical temperature performance of Gd₃Ga₅O₁₂:Yb³⁺/Er³⁺ nanophosphors annealed at 1000 °C are investigated in the range of 450-850 nm at room temperature.

II. MATERIALS AND METHODS

Gd₃Ga₅O₁₂ (Gadolinium Gallium Garnet) nanopowders doped with 2mol %Yb³⁺ and x mol %Er³⁺ (x=0.5, 1.0, 1.5, and 2.0) ions were prepared by the sol-gel pechini process and labeled as GGG:YE1, GGG:YE2, GGG:YE3, and GGG:YE4, respectively. Gd(NO₃)₃·6H₂O, Ga(NO₃)₃·H₂O, Er(NO₃)₃·5H₂O and Yb(NO₃)₃·5H₂O were used as the starting materials. All 99.99% pure salt products are purchased from Sigma-Aldrich. These raw chemicals were weighted out stoichiometric quantities based on the phase diagram of G₂O₃-Ga₂O₃ [21] and dissolved into the mixing aqueous HNO₃ solution. Citric acid and polyethylene glycol (PEG, average molecular weight: 3.350 gmol⁻¹) were mixed under continuous stirring at 65 °C for three hours as a chelate ligand and a cross-linking agent, respectively. The mass of polyethylene glycol (PEG) was taken three times larger than the mass of citric acid. The obtained transparent sols aged for ten days at room temperature. Then prepared sols

were annealed in a furnace at 1000 °C, at a 7 C/min⁻¹ for two hours. The optimized synthesis procedures and structural properties of nanophosphors by the sol-gel pechini method are reported in detail in a separate paper [16,22].

The upconversion luminescence spectra of the phosphors were recorded via Acton series-SI440 silicon detector attached to an SP2500i monochromator from Princeton Instruments. The samples were excited by A CNI MDL-H-975 model 975 nm continuous-wave laser diode. The laser pump power applied on the powders was determined through a Coherent Field MaxII-TOP Model power meter.

The morphological features and phase purity of the nanophosphors are determined by an X-ray diffractometer (Bruker AXS D8) in the range of 10° to 70° (2θ degree) and a high-resolution transmission electron microscope (HR-TEM) (FEI Inc. Tecnai G² 20 Model).

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Structural Characterization

Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG) garnet, which exists in cubic form with the Ia3d space group, is considered to be a promising host material for rare earth and transition metal ions. The XRD diagram of Gd₃Ga₅O₁₂ samples doped with a series of Yb³⁺/Er³⁺ ions is demonstrated in Figure 1a. The Figure shows that most of the peaks well match the standard pattern of the cubic Gd₃Ga₅O₁₂ (Garnet) phase (PDF 13-0493). But there is also a small amount of a second weak orthorhombic Gd₃GaO₆ (Gallate) phase (PDF 53-1225). The content ratio of the dominant garnet phase is calculated as approximately 97% from the area under the most intense peaks in XRD spectra.

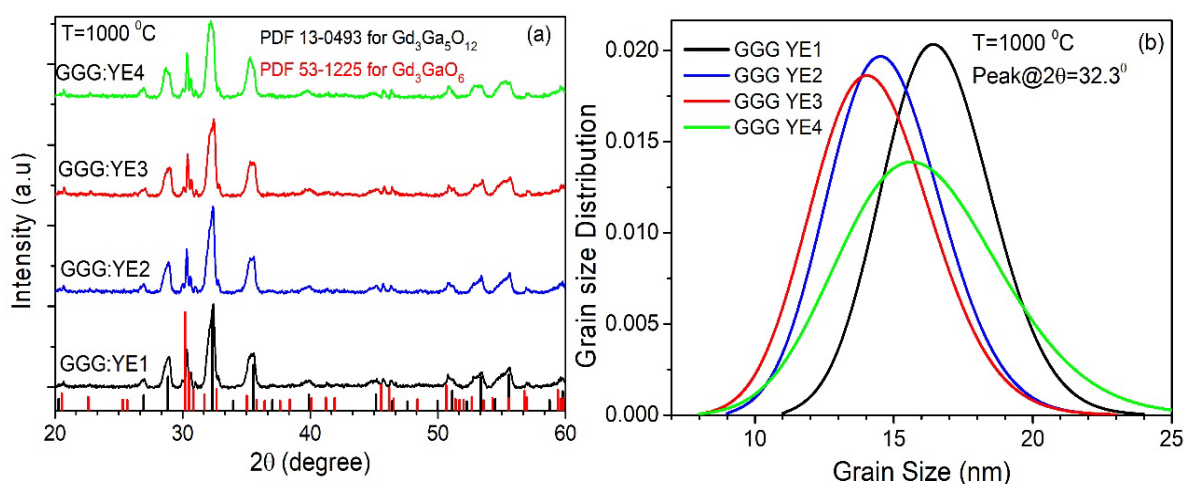


Figure 1. a) XRD patterns and b) Grain Size Distribution of GGG:Yb/Er nanophosphors annealed at 1000 °C

The grain size distribution (GSD) curves of the samples are illustrated using a powder diffraction line profile via $FW\frac{1}{5}/\frac{4}{5}$ method (Figure 1b), which is thought of as an expansion of the Scherrer method [21]. This method accepts that the grain sizes obey the Gamma distribution and takes into account full width at the $1/5$ and $4/5$ intensities of the most intense peak ($\theta=32.3^\circ$). The method with details can be found in reference [23]. The average sizes of nanocrystalline phosphors are in the range of 10 to 25 nm for 1000 °C annealing temperature. The GSD of the phosphors does not significantly change with increasing Er^{3+} concentration.

Figure 2 shows the TEM and HR-TEM images of GGG:2mol%Yb³⁺,1mol%Er³⁺ nanophosphors annealed at 1000 °C. Figure 2a illustrates the almost spherical shapes of the particles. The average crystal sizes obtained from TEM images are consistent with the sizes derived from the XRD pattern (The inset of Figure 2a). The high-resolution image reveals the inter-planar spacing and randomly oriented lattice fringes of the nanoparticles (NPs). Nanoparticles are highly crystallized as proven by well-resolved crystalline lattices. Partial overlapping of the lattice fringes in the HR-TEM image also indicates two phases within the nanoparticle.

3.2. Upconversion Characteristics

Among the rare earth ions, Yb and Er are the most efficient upconversion activators. Yb³⁺ ions have high absorption cross-section transition around 975 nm and can sensitize Er³⁺ ions by transferring the excitation energy [24,25]. For this reason, Er³⁺-Yb³⁺ codoped materials have been widely researched as promising

candidates for Luminescence thermometry recently [26–32].

The upconversion emission intensities of GGG:Yb/Er samples are recorded as a function of concentration between 450–850 nm wavelengths under 975 nm laser irradiation. As seen in Figure 3a and 3b, there are two distinct emission bands at the green and red regions for all samples measured at 4.1 and 22.4 W/cm² laser pump power, respectively. The spectral output of the samples represents that the upconversion emission intensities rise with increasing Er³⁺ content from 0.5% to 1%. In contrast, the intensities reduce with the further increasing 1mol% amount of Er³⁺ ions due to the concentration quenching. Figure 3c shows the integrated area of green and red regions as a function of % Er³⁺ concentration. The optimal Er³⁺ concentration is for Gd₃Ga₅O₁₂:2%Yb,1%Er. In the emission spectra, peaks are centered around 522.3, 527.4, 533.3, 537.6, 548.7, 555.1, and 559.2 nm at the green region and 653.5, 660.9, and 669.6 nm at the red region. The intensity of the red emissions is greater than the intensity of the green emissions. The relatively weak luminescence peaks around 490 nm at the blue region and 800 nm at the NIR region appear with the increasing laser pump power (Figure 3b). The moderate green, intense red, and weak NIR emission peaks correspond to the ²H_{11/2}, ⁴S_{3/2} → ⁴I_{15/2}, ⁴F_{9/2} → ⁴I_{15/2}, and ⁴I_{9/2} → ⁴I_{15/2} transitions of Er³⁺ at visible and NIR region, respectively (Figure 3b). Because of the cross-relaxations between Er³⁺ ions, NIR emission appears with the increasing pump power [16]. Blue emission, which is appeared between 480 and 500 nm, corresponds to the cooperative luminescence (CL) of Yb-Yb ion pairs (Figure 3b) [16].

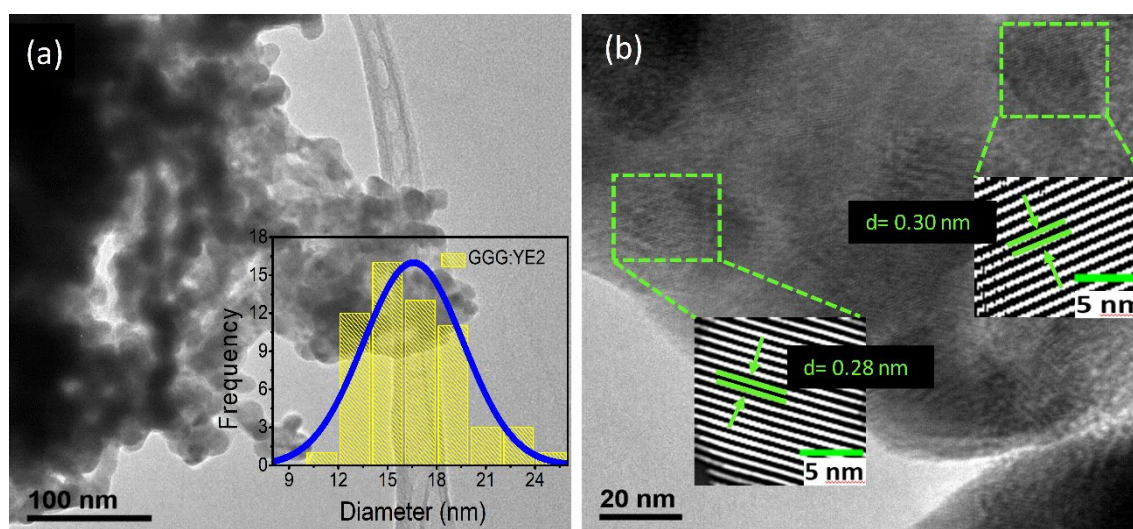


Figure 2. a) TEM, inset is the particle distribution histogram, and b) HR-TEM of GGG:2mol%Yb³⁺,1mol%Er³⁺ nanophosphors annealed at 1000 °C

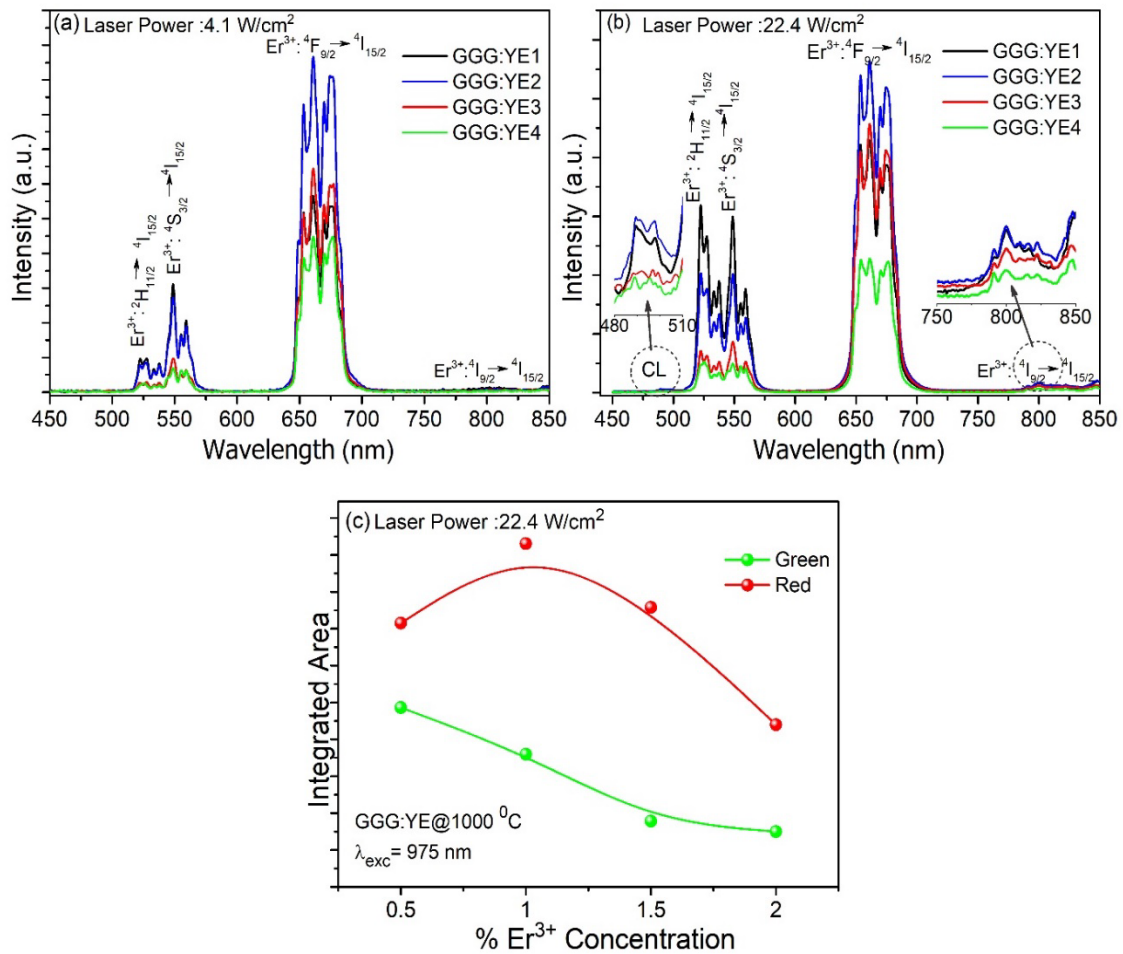


Figure 3. Upconversion emission intensities of the samples measured at **a)** 4.1 and **b)** 22.4 W/cm² **c)** the integrated area of green and red regions as a function of % Er³⁺ concentration

Power-dependent upconversion measurement was executed as the function of the laser pump power from 2.4 to 22.4 W/cm² under the laser excitation of 975 nm to clarify the upconversion mechanism. Figure 4a displays the upconversion emission spectra for Gd₃Ga₅O₁₂:2%Yb,1%Er nanophosphor as a function of pump power. The upconversion profiles remain the same, but emission intensities rise with rising pump power excitation due to the increase of excited Ytterbium ions that transfer energy to Erbium ions. Usually, luminescent intensity, I , and excitation pump power, P , obey the relation of $I \propto P^n$ the power law. The number of photons (n) absorbed by activator and sensitizer ions to populate the excited state can be evaluated from the slope of logarithmic luminescent intensity versus logarithmic pump power graph. The plots of $\log(I)$ versus $\log(P)$ for 522.7 and 660.9 nm emissions of Gd₃Ga₅O₁₂:2%Yb,1%Er nanophosphor are demonstrated in Figure 4b. The n values of green and red emissions were $n_{522.7} = \sim 1.8$ and $n_{660.9} = \sim 1.4$, respectively. The sufficient energy transfer from

Ytterbium to Erbium and possible saturation processes can be in charge of the reduced n values [33]. The green and red region emissions of Er³⁺ ions participate in the two-photon absorption process.

3.3. Temperature Sensing Characteristics

Luminescence temperature sensing is a potential candidate for a noncontact remote measurement option in several situations that traditional thermometer is not able to perform, such as in the electromagnetic field, a circuit with a small size below 10 μm , a high-voltage power station, a coal mine, a micro-fluid, and a moving object [10,34,35].

The influence of temperature on the luminescence intensity is determined by the fluorescence intensity ratio (FIR), which is based on the Boltzmann distribution of electrons between the two thermally coupled energy levels (TCLs). These two thermally coupled levels (TCLs) of Er³⁺:²H_{11/2} and Er³⁺:⁴S_{3/2} to ⁴I_{15/2} ground state were selected as 522.7 nm and 548.7 nm for fluorescence intensity ratio (FIR) thermometry.

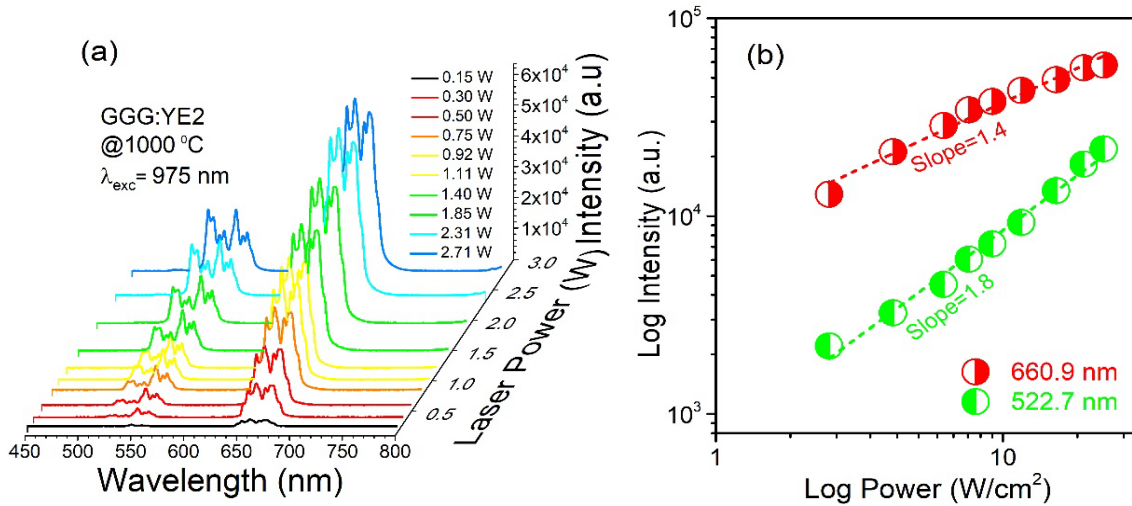


Figure 4. a) Room temperature upconversion luminescence spectra of GGG:YE2 b) The log-log plots of upconversion luminescence intensity as a function of power for GGG:YE2

The change in energy (ΔE) between these levels is calculated as 906.54 cm^{-1} . The dependences of FIR-TCL ($I_{522.7}/I_{548.7}$), values on the pump power were analyzed in Figure 5a. The FIR-TCL values displayed an upward trend with the elevated laser pump power. The data fitted linearly. The inset of Figure 5a shows the upconversion emissions of GGG:2%Yb, 0.5%Er nanophosphor at different pump powers. The relationship between the thermally coupled levels (TCLs) and temperature is defined by the Boltzmann distribution law [12,13]:

$$FIR = \frac{I_{522.7}}{I_{548.7}} = B \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \tag{1}$$

where $I_{522.7}$ and $I_{548.7}$ are the integrated intensities of thermally coupled levels, B is the constant, ΔE is the energy difference between the thermally coupled levels, k is Boltzman’s coefficient, and T is the absolute temperature.

When the laser pump power elevates, the temperature of the samples increases regardless of the environment temperature. Evidently, The FIR values also represented a linear upward trend with the elevated pump power (Figure 5a). According to the FIR equation, a certain FIR value corresponds to a phosphor sample temperature. The precise value of the temperature can be derived from the FIR equation. For example, if the spectral energy difference was used in equation (1) at room temperature and at the lowest pump power, the coefficient of B is calculated as 24.5 for 2%Yb³⁺/1%Er³⁺: Gd₃Ga₅O₁₂ phosphor. Afterward, the equation below can be utilized to define the phosphor temperature for a particular pump power:

$$T = \left(\frac{1}{\ln B - \ln(FIR)}\right) \times \frac{\Delta E}{k} \tag{2}$$

Using equation (2), the phosphor temperatures at various pump powers were calculated, and corresponding values are shown in Figure 5b for nanophosphors. The phosphor temperatures for all samples vary linearly from 300 K to 420 K with rising pump power from 0.5 W to 3 W. Both GGG:YE1-YE2 and GGG:YE3-YE4 show similar behavior. It is depicted that phosphor temperature can be adjusted by changing the dopant concentrations as a function of pump power.

Moreover, absolute (S_A) and relative sensor sensitivities (S_R) are two critical thermometric evaluation criteria. They can be depicted by the following equations [12,13]:

$$S_A = \frac{d(FIR)}{dT} = B \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) \times \frac{\Delta E}{kT^2} \tag{3}$$

$$S_R = \left| \frac{1}{FIR} \frac{d(FIR)}{dT} \right| \tag{4}$$

The calculated phosphor temperature corresponding to pump powers versus temperature-dependent sensitivities is presented in Figure 5c. The S_A value rose with the increase of temperature and found its maximum value of 0.0083 K^{-1} at 414 K, whereas the maximum value of S_R was about $14.7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ at 300 K for 2%Yb³⁺,0.5%Er³⁺:GGG. The absolute sensitivity values reduce with the rising Er³⁺ dopant content. The S_A values are calculated as 0.0077 K^{-1} at 416 K, 0.0071 K^{-1} at 391 K, and 0.0070 K^{-1} at 390 K for GGG:YE2, GGG:YE3, and GGG:YE4, respectively. The temperature value at which the highest sensitivity was reached for the current study increased in contrast to other materials examined with rare earth elements doped GGG in the literature [17–20].

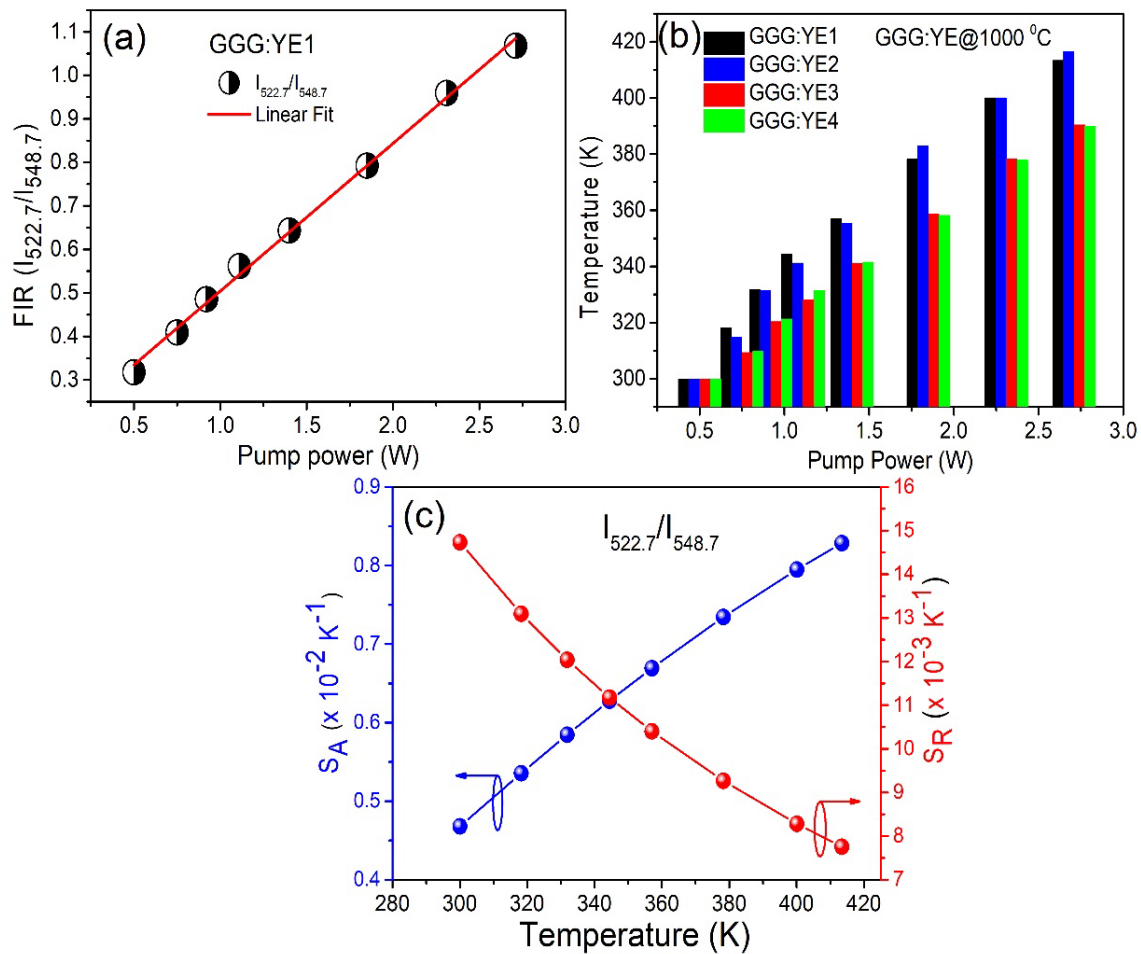


Figure 5. a) FIR values of thermally coupled levels (TCLs) versus pump power b) Calculated Phosphor temperature versus pump power c) Sensitivities based on TCLs versus temperature

3.4. Color Characteristics

The chromaticity (CIE) coordinates were calculated from the spectra utilizing the 1931 CIE system. Figure 6 demonstrates the corresponding CIE diagram of $Gd_3Ga_5O_{12}:2\%Yb^{3+}/x\%Er^{3+}$ phosphors ($0.5 \leq x \leq 2.0$) with distinct Er^{3+} doping concentrations. The color coordinates of the nanophosphors shift from yellowish to the greenish area with increasing pump power (Figure 6a and 6b). When Er^{3+} doping concentration changed from 0.5 to 2.0 mol%, the chromaticity coordinates (x, y) changed significantly from yellowish green to yellowish orange at the pumping power of 22.4 W/cm^2 (Figure 6c).

The exact values of the chromaticity coordinates (x, y) are (0.333, 0.333) for the white zone. CIE coordinates of the nanophosphors are summarized in Table 1. The result denotes that as GGG:Yb/Er samples show multicolor luminescence in the visible region when excited by monochromatic light, they might find potential application in the display systems.

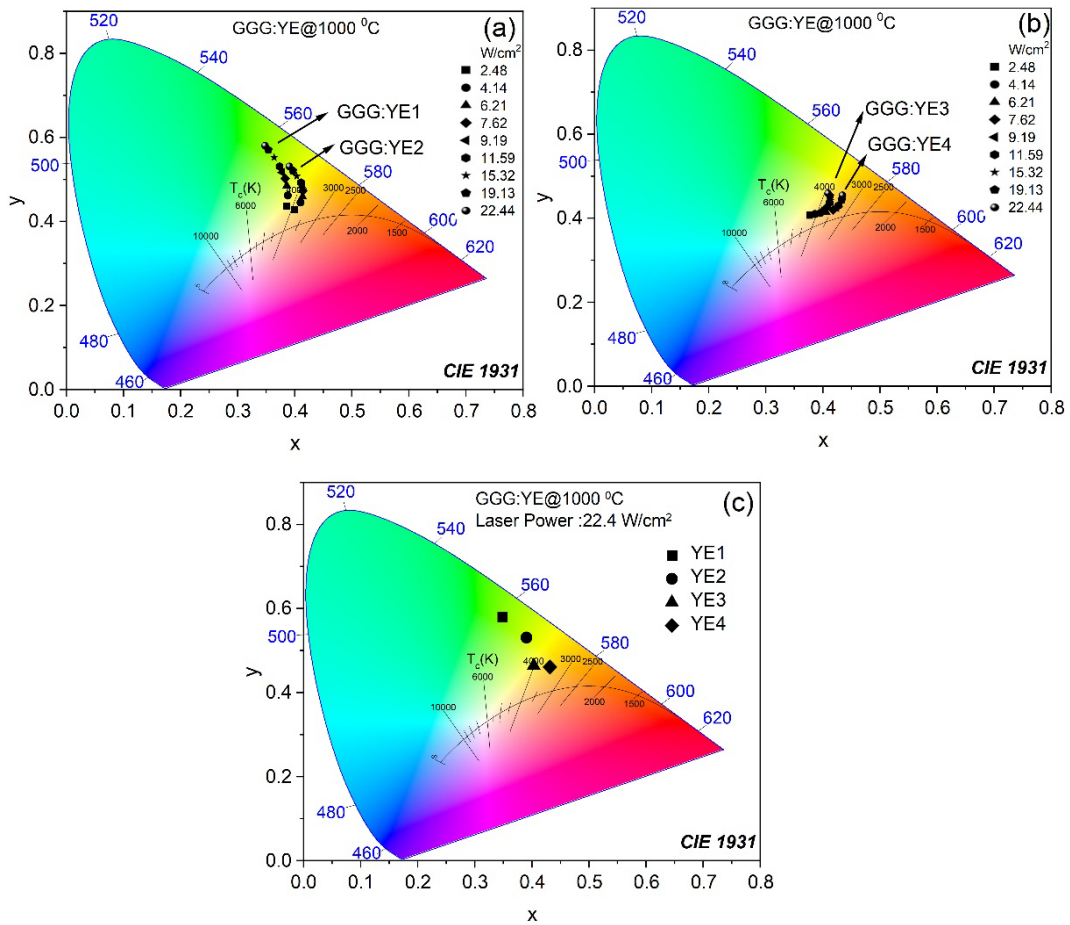


Figure 6. The color coordinates of the phosphors in the CIE diagram

Table 1. CIE color coordinates of the nanophosphors

Power (W)	YE1		YE2		YE3		YE4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
0.15	0.376	0.413	0.379	0.411	0.376	0.409	0.376	0.408
0.30	0.385	0.437	0.399	0.428	0.386	0.410	0.395	0.412
0.50	0.388	0.462	0.410	0.445	0.399	0.416	0.406	0.415
0.75	0.386	0.485	0.414	0.459	0.405	0.423	0.418	0.420
0.92	0.383	0.502	0.415	0.473	0.410	0.429	0.424	0.425
1.11	0.378	0.516	0.414	0.481	0.412	0.437	0.427	0.430
1.40	0.374	0.531	0.411	0.492	0.413	0.442	0.431	0.434
1.85	0.364	0.552	0.404	0.507	0.412	0.453	0.433	0.444
2.31	0.354	0.570	0.397	0.521	0.409	0.459	0.434	0.454
2.71	0.348	0.580	0.391	0.531	0.403	0.465	0.432	0.460

IV. CONCLUSION

The luminescence intensity of the phosphors strongly depends on the conditions of their preparation methods, the choice of the host materials and doped ions, the concentration of the doped ions, and the particle size of the samples. In this study, the upconversion, color, and laser-heat induced optical temperature sensing behavior of $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ phosphors synthesized by the sol-gel pechini method at 1000 °C are reported. The wavelength range for the upconversion emission spectrum is between 450-850 nm. The influence of Er^{3+} and Yb^{3+} ion concentrations on the intensity of upconversion luminescence was also studied in detail under the 975 nm excitation wavelength. The $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped gadolinium gallium garnet nanophosphor gives green emission bands at 522.7 and 548.7 nm upon 975 nm excitation due to ${}^2\text{H}_{1/2}$ and ${}^4\text{S}_{3/2}$ to ${}^4\text{I}_{15/2}$ transitions of Er^{3+} ion, respectively. The fluorescence intensity ratio (FIR) of the 522.7 and 548.7 nm emission bands of the phosphors vary with the increase in concentration and laser pump power. The FIR of the thermally coupled 522.7 and 548.7 nm emission bands displays significant optical heating in the codoped phosphor. It is indicated that phosphor temperature can be adjusted by changing the dopant concentrations as a function of pump power. The maximum absolute temperature sensitivity has been calculated to be 0.0083 K^{-1} at 414 K, whereas the maximum value of relative sensitivity was about $14.7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ at 300 K for 2% Yb^{3+} , 0.5% Er^{3+} :GGG. The present study on $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped gadolinium gallium garnet (GGG) nanophosphors achieved a higher maximum sensitivity temperature compared to other rare earth element-doped GGG materials studied in the literature. Additionally, the study suggests that the dopant concentration for this particular nanophosphor has been optimized. Color coordinates on the CIE diagram of phosphors were influenced by the pump power and shifted from yellowish green to yellowish orange region at higher Er^{3+} concentrations. Thus, the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped gadolinium gallium garnet nanophosphor can be useful for photonic devices such as an optical heater, nano phosphor temperature sensors, and solid-state lighting.

REFERENCES

- [1] Daldosso, M., Falcomer, D., Speghini, A., Bettinelli, M., Enzo, S., Lasio, B., & Polizzi, S. (2008). Synthesis, structural investigation and luminescence spectroscopy of nanocrystalline $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ doped with lanthanide ions. *J. Alloys Compd.*, 451(1–2), 553–556.
- [2] Venkatramu, V., León-Luis, S. F., Rodríguez-Mendoza, U. R., Monteseuro, V., Manjón, F. J., Lozano-Gorrin, A. D., Valiente, R., Navarro-Urrios, D., Jayasankar, C. K., Muñoz, A., & Lavín, V. (2012). Synthesis, structure and luminescence of Er^{3+} -doped $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ nanogarnets. *J. Mater. Chem.*, 22(27), 13788–13799.
- [3] Singh, S. K., Lee, D. G., Yi, S. S., Jang, K., Shin, D. S., & Jeong, J. H. (2013). Probing dual mode emission of Eu^{3+} in garnet phosphor. *J. Appl. Phys.*, 113(17).
- [4] Wang, X., Li, X., Xu, S., Cheng, L., Sun, J., Zhang, J., Li, L., & Chen, B. (2019). A comparative study of spectral and temperature sensing properties of Er^{3+} mono-doped LnNbO_4 ($\text{Ln} = \text{Lu}, \text{Y}, \text{Gd}$) phosphors under 980 and 1500 nm excitations. *Mater. Res. Bull.*, 111, 177–182.
- [5] Ranjan, S. K., Mondal, M., & Rai, V. K. (2018). $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Li}^+/\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}/\text{Zn}^{2+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ nanophosphors for efficient frequency upconverter and temperature sensing applications. *Mater. Res. Bull.*, 106, 66–73.
- [6] Liu, X., Lei, R., Huang, F., Deng, D., Wang, H., Zhao, S., & Xu, S. (2019). Dependence of upconversion emission and optical temperature sensing behavior on excitation power in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped BaMoO_4 phosphors. *J. Lumin.*, 210, 119–127.
- [7] Du, P., Luo, L., & Yu, J. S. (2015). Infrared-to-visible upconversion emission of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped SrMoO_4 phosphors as wide-range temperature sensor. *Curr. Appl. Phys.*, 15(12), 1576–1579.
- [8] Lu, H., Hao, H., Gao, Y., Shi, G., Fan, Q., Song, Y., Wang, Y., & Zhang, X. (2017). Dual functions of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ phosphor: temperature sensor and optical heater. *J. Lumin.*, 191, 13–17.
- [9] Ćirić, A., Stojadinović, S., & Dramićanin, M. D. (2020). Luminescence temperature sensing using thin-films of undoped Gd_2O_3 and doped with Ho^{3+} , Eu^{3+} and Er^{3+} prepared by plasma electrolytic oxidation. *Ceram. Int.*, 46(14), 23223–23231.
- [10] Vetrone, F., Naccache, R., Zamarrón, A., De La Fuente, A. J., Sanz-Rodríguez, F., Maestro, L. M., Rodríguez, E. M., Jaque, D., Sole, J. G., & Capobianco, J. A. (2010). Temperature sensing using fluorescent nanothermometers. *ACS Nano.*, 4(6), 3254–3258.
- [11] Marciniak, L., & Trejgis, K. (2018). Luminescence lifetime thermometry with $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ co-doped nanocrystals. *J. Mater. Chem. C.*, 6(26), 7092–7100.
- [12] Wade, S.A., Collins, S.F., Baxter, G.W. (2003) Fluorescence intensity ratio technique for optical fiber point temperature sensing, *J. Appl. Phys.*, 94, 4743–4756.
- [13] Wang, X., Liu, Q., Bu, Y., Liu, C.S., Liu, T., Yan, X. (2015) Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors, *RSC Adv.*, 5, 86219–86236.
- [14] Pang, M., & Lin, J. (2005). Growth and optical properties of nanocrystalline $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Ln}$ ($\text{Ln} = \text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$) powders and thin films via Pechini sol-gel process. *J. Cryst. Growth.*, 284(1–2), 262–269.

- [15] Li, Y., Lu, H., Zhang, Y., Ma, J., & Song, G. (2012). Synthesis and luminescence properties of nanocrystalline $Gd_3Ga_5O_{12}:Eu^{3+}$ by a homogeneous precipitation method. *Rare Met.*, 31(6), 599–603.
- [16] Erdem, M., Örucü, H., Cantürk, S. B., & Eryürek, G. (2021). Upconversion Yb^{3+}/Er^{3+} :Gadolinium Gallium Garnet Nanocrystals for White-Light Emission and Optical Thermometry. *ACS Appl. Nano Mater.*, 4(7), 7162–7171.
- [17] Kniec, K., Ledwa, K., Maclejewska, K., & Marciniak, L. (2020). Intentional modification of the optical spectral response and relative sensitivity of luminescent thermometers based on $Fe^{3+}, Cr^{3+}, Nd^{3+}$ co-doped garnet nanocrystals by crystal field strength optimization. *Mater. Chem. Front.*, 4(6), 1697–1705.
- [18] Piao, R. Q., Xu, Q., Zhang, Z. B., Wang, Y., Pun, E. Y. B., & Zhang, D. L. (2018). A study on ratiometric thermometry based on upconversion emissions of erbium ions in gadolinium gallium garnet single-crystal. *J. Lumin.*, 204, 116–121.
- [19] Zhang, K., Tong, L., Ma, Y., Wang, J., Xia, Z., & Han, Y. (2019). Modulated up-conversion luminescence and low-temperature sensing of $Gd_3Ga_5O_{12}:Yb^{3+}/Er^{3+}$ by incorporation of Fe^{3+} ions. *J. Alloys Compd.*, 781, 467–472.
- [20] Sun, H. X., Yuan, N., Zhang, Z. B., Sun, Q., Wang, Y., Wong, W. H., Tu, C. Y., Yu, D. Y., Pun, E. Y. B., & Zhang, D. L. (2017). Temperature characteristics of the green up-conversion fluorescence of Er^{3+} -doped $Gd_3Ga_5O_{12}$ single crystal for temperature sensing. *Sci. Adv. Mater.*, 9(5), 727–732.
- [21] Garino, T. J., Voigt, J. A., Spoerke, E. D., Moore, D. L., Lockwood, S. J., Gibson, J. T., & Phifer, C. C. (2007). Development of a Manufacturing Capability for Production of Ceramic Laser Materials. No. SAND2007-7393. Sandia National Laboratories Report
- [22] Örucü, H. (2022). The effect of molar ratio and annealing on crystal structure of gadolinium-gallium garnet nanopowders synthesized by sol-gel method. *J. Ceram. Process. Res.*, 23(6), 799–805.
- [23] Pielaszek, R. (2004). FW 1/5/4/5 M method for determination of the grain size distribution from powder diffraction line profile. *J. Alloys Compd.*, 382(1–2), 128–132.
- [24] Guo, Y., Wang, D., Zhao, X., & Wang, F. (2016). Fabrication, microstructure and upconversion luminescence of Yb^{3+}/Ln^{3+} ($Ln = Ho, Er, Tm$) co-doped $Y_2Ti_2O_7$ ceramics. *Mater. Res. Bull.*, 73, 84–89.
- [25] Santana-Alonso, A., Méndez-Ramos, J., Yanes, A. C., Del-Castillo, J., & Rodríguez, V. D. (2010). White light up-conversion in transparent sol-gel derived glass-ceramics containing $Yb^{3+}-Er^{3+}-Tm^{3+}$ triply-doped YF_3 nanocrystals. *Mater. Chem. Phys.*, 124(1), 699–703.
- [26] Wang, X., Wang, Y., Jin, L., Bu, Y., Yang, X. L., & Yan, X. (2019). Controlling optical temperature detection of $Ca_3Al_2O_6: Yb^{3+}, Er^{3+}$ phosphors through doping. *J. Alloys Compd.*, 773, 393–400.
- [27] Liao, J., Wang, Q., Kong, L., Ming, Z., Wang, Y., Li, Y., & Che, L. (2018). Effect of Yb^{3+} concentration on tunable upconversion luminescence and optically temperature sensing behavior in $Gd_2TiO_5:Yb^{3+}/Er^{3+}$ phosphors. *Opt. Mater.*, 75, 841–849.
- [28] Cheng, X., Dong, X., Peng, K., Zhang, H., Su, Y., & Jiang, L. (2020). Upconversion Luminescence and Optical Temperature-Sensing Properties of $LaNbO_4:Yb^{3+}/Er^{3+}$ Phosphors. *J. Electron. Mater.*, 49(1), 518–523.
- [29] Lin, M., Xie, L., Wang, Z., Richards, B. S., Gao, G., & Zhong, J. (2019). Facile synthesis of monodisperse sub-20 nm $NaY(WO_4)_2:Er^{3+}, Yb^{3+}$ upconversion nanoparticles: A new choice for nanothermometry. *J. Mater. Chem. C.*, 7(10), 2971–2977.
- [30] Gao, P., Li, X., Gong, Y., Shen, G., Zhang, S., & Guan, L. (2019). Highly sensitive up-conversion phosphor for optical thermometry: $CaLaAl_3O_7:Er^{3+}/Yb^{3+}$. *J. Rare Earths.*, 37(9), 937–942.
- [31] Du, P., Luo, L., & Yu, J. S. (2016). Facile synthesis of Er^{3+}/Yb^{3+} -codoped $NaYF_4$ nanoparticles: A promising multifunctional upconverting luminescent material for versatile applications. *RSC Adv.*, 6(97), 94539–94546.
- [32] Liu, H., Jian, X., Liu, M., Wang, K., Bai, G., & Zhang, Y. (2021). Investigation on the upconversion luminescence and ratiometric thermal sensing of $SrWO_4:Yb^{3+}/RE^{3+}$ ($RE = Ho/Er$) phosphors. *RSC Adv.*, 11(58), 36689–36697.
- [33] Pollnau, M., Gamelin, D., Lüthi, S., Güdel, H., & Hehlen, M. (2000). Power dependence of upconversion luminescence in lanthanide and transition-metal-ion systems. *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, 61(5), 3337–3346.
- [34] Liu, X., Chen, Y., Shang, F., Chen, G., & Xu, J. (2019). Wide-range thermometry and up-conversion luminescence of $Ca_5(PO_4)_3 F:Yb^{3+}/Er^{3+}$ transparent glass ceramics. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 30(6), 5718–5725.
- [35] Fischer, L. H., Harms, G. S., & Wolfbeis, O. S. (2011). Upconverting nanoparticles for nanoscale thermometry. *Angew. Chemie - Int. Ed.*, 50(20), 4546–4551.

Türkiye Madencilik Sektörü İş Kazalarının Analizi ve Gelecek Perspektifleri

Analysis of Occupational Accidents in Turkey Mining Industry and Future Perspectives

Mustafa SEKMEN¹ , Mehmet Ali ZENGİN¹ 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Havza Meslek Yüksekokulu, Samsun/Türkiye

Öz

Madencilik sektörü dünyada olduğu gibi ülkemizde de iş kazası oranlarının en yüksek olduğu sektörlerden birisidir. Bu çalışmada, madencilik sektörü içerisinde yer alan ve ekonomik faaliyetlerin tehlike sınıflarını gösteren NACE koduna göre 5 farklı alt sektördeki kaza verileri incelenmiştir. Bu doğrultuda 2011 - 2021 yılları arasındaki veriler kullanılarak kaza olabilirlik oranı, kaza ağırlık hızı ve kaza sıklık hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ile Türkiye geneli sektörler, madencilik sektörü, madencilik sektörü dışında kalan sektörlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Bununla birlikte incelenen 10 yıllık veriler kullanılarak gerçekleştirilen trend analiz ile 2022-2026 yılları arasındaki kaza sayıları tahmin edilmiştir. Analizler sonucunda madencilik sektöründe özellikle kaza sıklık hızı ve kaza olabilirlik oranlarının diğer sektörlerden ve Türkiye geneli ortalamasından çok yüksek olduğu ve yıllar geçtikçe de giderek arttığı belirlenmiştir. Genel olarak madencilik sektörü çalışanlarının Türkiye genelinde diğer sektör çalışanlarına göre kaza geçirme ihtimalinin 6, kaza sonucu ölüm ihtimalinin ise 7 kat daha yüksek olduğu görülmüştür. Madencilik faaliyetleri içerisinde kaza sıklığının en yüksek olduğu faaliyet kolunun ise Kömür ve Linyit çıkartılması alt sektörü olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaza oranları, Madencilik sektörü, Trend analizi, İş güvenliği

Abstract

The mining sector is one of the sectors with the highest occupational accident rates in our country as it is in the world. In this study, accident data in 5 different sub-sectors are examined according to the NACE code, which shows the hazard classes of economic activities within the mining sector. In this direction, accident likelihood ratio, accident severity rate and accident frequency rates are calculated using the data between 2011 and 2021. With the calculated parameters, the sectors in Turkey in general, the mining sector, and the sectors other than the mining sector are compared. In addition, the number of accidents between 2022 and 2026 is estimated with the trend analysis performed using the 10-year data examined. As a result of the analysis, it is seen that the accident frequency rate and accident probability rates in the mining sector are much higher than the other sectors and the average of Turkey in general, and they are increasing gradually over the years. In general, it is seen that the probability of an accident is 6 times higher and the probability of death as a result of an accident is 7 times higher for the employees of the mining sector compared to the employees of other sectors in Turkey. Coal and Lignite extraction sub-sector is the branch of activity with the highest accident frequency among mining activities.

Keywords: Accident rates, Mining industry, Trend analysis, Occupational safety

I. GİRİŞ

Çalışma hayatının en büyük sorunlarından biri iş kazaları ve meslek hastalıklarıdır. Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verilerine göre, yılda yaklaşık 337 milyon iş kazası meydana gelmektedir. Kazalar sonucu 360.000 kişi, işle ilgili hastalıklar nedeniyle ise 1,95 milyon kişi hayatını kaybetmektedir [1]. EUROSTAT rakamlarına göre Avrupa Birliği'nde yılda 5.700'den fazla kişi iş kazaları sonucu ölmektedir. Her yıl AB üyesi 27 ülkedeki işçilerin %3,2'si iş kazası geçirmektedir (yaklaşık 7 milyon işçiye karşılık gelmektedir) [2]. Bu durum sosyal maliyetleri arttırdığı gibi gerek işletme ekonomilerine gerekse ülke ekonomilerine ciddi zararlar vermektedir. Son yıllarda ülkeler ve şirketler, kazaların yüksek maliyeti nedeniyle, iş kazalarını önlemek amacıyla daha fazla çaba göstermektedir. ILO iş kazaları ve işle ilgili hastalıkların toplam maliyetlerinin, yıllık küresel gayri safi milli hasılanın %4'ünü (1,25 trilyon ABD doları) oluşturduğunu tahmin etmektedir. Ülkemizde iş kazası ve meslek hastalıklarının sebep olduğu maddi ve manevi kayıplar her geçen gün artmaktadır. Resmi kaynaklara göre Türkiye'deki iş kazaları her geçen yıl artarak beraber son 10 yılda ortalama 312.369 iş kazası meydana gelmiştir. Meydana gelen kazalar sonucu ortalama 1.332 işçi hayatını kaybetmiş ve 3.138 işçi sürekli iş göremez hale gelmiştir. Türkiye'de meydana gelen iş kazaları, sosyal güvenlik sisteminde yaklaşık 3 milyar dolarlık gelir kaybına neden olmaktadır [3].

Son yıllarda dünyada olduğu gibi artan taleple birlikte Türkiye'de de, kömür, altın, gümüş, bakır, manganez ve krom cevherleri için madencilik faaliyetleri artmıştır. Dünya'da ve ülkemizde enerjide çeşitliliği arttırmak ve dışa bağımlılığı azaltmak için milli kaynaklarla enerji ihtiyacının karşılanması özellikle Türkiye'de termik santrallerin sayısı artmıştır. Bu nedenle termik santrallerin çalıştırılmasında ihtiyaç duyulan kömürün üretim miktarı da artmıştır. Kömür üretimdeki bu artışa bağlı olarak kömür madenciliğindeki iş kazalarının önlenmesine yönelik yeni tedbirlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sektörel olarak ülkemizde iş kazaları incelendiğinde, kazaların yaklaşık %6'sının madencilik sektöründe meydana geldiği görülmektedir (Tablo 1). Ülkemizde çok sık yaşanan maden sektöründeki iş kazalarının sebeplerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) kültürünün tam olarak oluşturulamaması, uygulamalardaki ve denetimlerdeki eksiklikler ve bazı maden sahalarındaki jeolojik yapının riskler içermesi olduğu söylenebilir [4]. Madencilik sektöründe güvenlik ile ilgili önemli gelişmeler olmasına rağmen, kazalar meydana gelmekte ve madencilik hala dünya çapında en riskli sektörlerden biri olmaya devam etmektedir. Kömür madenciliği en riskli iş kollarından biri olarak kabul edilmektedir [5].

Madenciliğin yapısı gereği çalışma sahasında çok fazla tehlike ve risk bulunmaktadır. Kömür ve Linyit Çıkarılması alt sektöründeki riskler incelendiğinde maden havzalarının sürekli değişmesi, değişen ortam ve jeolojik şartlar da üretim yapılması, doğa ile sürekli mücadele etme gereği gibi durumlar sektörü diğer sektörlerle göre daha riskli hale getiren faktörler olarak sıralanabilir. Özellikle yeraltı kömür madenciliğinin bu dinamizmi nedeniyle İSG uygulamaları çok daha önemli olmaktadır. Dünyada özellikle ABD'de 1940'lara kadar maden kazaları ve ölüm sayılarının artmıştır. Sonraki yıllarda ise İSG ile ilgili mevzuatlar çıkarılması, yeni teknolojiler geliştirilmesi, ocaklardaki sorunlar ve iş güvenliğini tehlikeye atan koşullar hakkında önlemler alınmasıyla birlikte 1970'lerden sonra kaza ve ölüm oranları hızlı bir şekilde azalmıştır [6]. Türkiye'de ise 1940'lı yıllardan bu yana maden kazalarında 3 binden fazla çalışan yaşamını yitirmiştir. En fazla can kaybının olduğu kaza 2014 tarihinde Manisa'nın Soma ilçesinde meydana gelmiş ve 301 madenci hayatını kaybetmiştir. 1992 tarihinde ise Zonguldak'ın Kozlu'da meydana gelmiş ve 263 çalışan hayatını kaybetmiştir. Bu kazalar alınmayan ya da eksik alınan güvenlik önlemleri sebebiyle gerçekleşmiştir.

Madencilik sektöründeki kazaların analizleri ile ilgili literatür incelendiğinde bu alanda farklı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Arıtan ve Ataman [7], açık maden ocağına yönelik yaptıkları çalışmalarında, kazaların büyük bir bölümünün önlenemez kazalardan oluştuğunu ve çalışan hatalarından dolayı meydana

geldiğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında kullandıkları analizlerde kaza sıklık hızı, olabilirlik ve ağırlık oranı gibi parametreleri kullanmışlardır. Dündar vd. [8], madencilik sektörüne yönelik çalışmalarında 2012-2016 yılları arasındaki iş kazaları ve meslek hastalıklarını analiz etmişlerdir. Analizlerinde kaza olabilirlik oranını, madencilik sektörü ana ve alt sektörlerle birlikte ele alarak değerlendirmişlerdir. Maden sektörünü diğer bazı sektörler ile karşılaştırmışlardır. Madencilik sektörü iş kazalarında bir azalma eğilimine girildiğini belirterek bu eğilimin daha da artarak devam edebilmesi için yapılması gerekenler ile ilgili önerilerde bulunmuşlardır. Bayraktar vd. [9], çalışmalarında Türkiye'deki 2002-2015 yılları arasındaki iş kazası verilerini inceleyerek diğer sektörler ile madencilik sektörü iş kaza oranlarını karşılaştırmışlardır. Analizler sonucunda iş kazalarının son yıllarda yapılan yasal düzenlemelere rağmen madencilik sektöründe diğer sektörlerle göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonunda madencilik sektörü için, küçük ölçekli madencilikten vazgeçilmesi, makine kullanım oranının yükseltilmesi, sadece madencilığe özgü yeni önlemlerin geliştirilmesi ve denetimlerin ciddiyetle gerçekleştirilmesi gibi önerilerde bulunmuşlardır. Ceylan [10], 2004-2010 yılları arasındaki kaza verilerini kullandığı çalışmada Türkiye'deki iş kazalarının %46,4'ünün ve ölümlü kazaların %41,1'inin inşaat, maden ve metal sektörlerinde gerçekleştiğini belirtmiştir.

Literatürdeki diğer çalışmalar incelendiğinde, madencilik endüstrilerindeki büyük kazaların çoğunun, zayıf güvenlik kültürü nedeniyle gerçekleştiği görülmektedir [11,12]. Bu doğrultuda çalışmalar incelendiğinde birçok araştırmacının geleneksel kaza önleme politikalarını, kuruluşlarda sağlıklı bir güvenlik kültürünü teşvik etmeye kaydırıldığı görülmektedir [13-15]. Bu nedenle güvenlik kültürü, büyük ölçekli endüstriyel kazaları azaltmak için bir mekanizma veya yeni bir strateji olarak kabul edilmiştir. Güvenlik kültürü genel olarak kazaların temel nedenlerinin belirlenmesine ve kazaların önlenmesi için alınacak önleyici tedbirlere odaklanmaktadır [11,16,17]. Bu çalışmada, madencilik sektöründe 2011-2021 arasında meydana gelen kazalar uluslararası parametreler (kaza sıklık ve ağırlık hızı, kaza olabilirlik oranı) kullanılarak analiz edilmiştir. Türkiye'de madencilik sektörünün de gerçekleşen kaza tablosu Türkiye geneli ve diğer sektör verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ABD, Avrupa Birliğine üye gelişmiş ve gelişmekte olan bazı ülkeler ile Türkiye maden sektörü verileri karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırmalara ilave olarak gerçekleştirilen trend analizi ile 2022-2026 yılları arasında karşılaşılabilecek kaza sayıları hesaplanmıştır / tahmin edilmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, 2011-2021 yılları arasındaki Türkiye'deki madencilik sektöründe meydana gelen kaza verileri diğer sektör verileri ve Türkiye geneli veriler uluslararası otoriteler tarafından kabul gören parametreler ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde diğer sektörlere ait veriler Türkiye geneli verilerinden madencilik sektörü verileri çıkarılarak elde edilmiştir. Değerlendirme sırasında ilgili parametrelerin yıllar içerisindeki trendini gösterebilmek için 11 yıllık (2011-2021) veriler kullanılmıştır. Madencilik sektöründe faaliyet gösteren işletmeleri belirlemek için Avrupa Birliği istatistik ofisi tarafından oluşturulmuş Ekonomik Faaliyet Sınıflaması (NACE) kullanılmıştır. Bu sınıflamaya göre; Kömür ve Linyit Çıkartılması: 5, Ham Petrol Ve Doğalgaz Çıkarımı: 6, Metal Cevheri Madenciliği: 7, Diğer Madencilik ve Taş Ocakları: 8, Madenciliği Destekleyici Hizmet: 9 NACE koduna sahiptir.

2012 yılında yayımlanan İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği'ne göre madencilik sektöründeki işletmelerin çok tehlikeli sınıfta yer aldığı görülmektedir. Cenevre'de düzenlenen 16. Uluslararası Çalışma İstatistikçileri Konferansında ülkelerin iş kazaları ile ilgili istatistiklerin hazırlanması sırasında ortak dil kullanabilmeleri için kaza sıklık hızı, ağırlık ve olabilirlik oranları gibi bazı terimlerin tanımlamaları yapılarak, eşitlikleri gösterilmiştir [18].

Kaza Sıklık Hızı: 1 milyon iş saati başına gerçekleşen iş kazalarının sayısı olarak tanımlanmaktadır. Kaza sıklık hızını hesaplamak için ilgili yıl içerisinde gerçekleşen kaza sayısının ve toplam gerçekleştirilen çalışma saatinin bilinmesi gerekmektedir. Kaza sıklık hızının hesaplanmasında Eşitlik 1 kullanılmıştır [7].

$$\text{Kaza Sıklık Hızı} = \frac{\text{Yıllık Kaza Sayısı}}{\text{Toplam İnsan Saat Çalışma Sayısı}} \times 1.000.000 \quad (1)$$

Kaza Ağırlık Hızı (Oranı): Belli bir yıl içerisindeki kazalardan kaynaklanan kayıp gün sayısını ifade etmektedir. Eşitlik 2 kaza ağırlık hızını hesaplamak için kullanılmıştır [19].

$$\text{Kaza Ağırlık Hızı} = \frac{\text{Kayıp gün sayısı}}{\text{Toplam İnsan Saat Çalışma Sayısı}} \times 1.000.0 \quad (2)$$

Kaza Olabilirlik Oranı: Genel olarak, 100.000 çalışmada kaza geçiren çalışan sayısını vermektedir, Eşitlik 3. Bir yıl içerisindeki kazaların sayısının (ölümlü ve ölümlü olmayan) aynı yıl içerisinde toplam işçi sayısına bölünüp 100.000 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır [19].

$$\text{Kaza Olabilirlik Oranı} = \frac{\text{Yıllık Kaza Sayısı}}{\text{Toplam İşçi Sayısı}} \times 100.000 \quad (3)$$

Trend analizi, geçmişteki koşulların gelecekte devam etmesi halinde beklenen durumları tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Değişkenler arasındaki ilişki doğrusal ise doğrusal (lineer) regresyon (Eşitlik 4)

değil ise polinomsal regresyon (eşitlik 5) kullanılır [20].

$$y = mt + c \quad (4)$$

Eşitlik 4'te; y: tahmin edilecek miktar (bağımlı değişken), t: zaman (bağımsız değişken), c: trend doğrusunun y eksenini kestiği nokta, m: trend doğrusunun eğimini göstermektedir.

Genel olarak, bir zaman serisindeki trendin büyüklüğü ya parametrik test yöntemleri (regresyon analizi) ya da parametrik olmayan yöntemler kullanılarak belirlenir. Bu yöntemlerin her ikisi de zaman serilerinde doğrusal bir eğilim varsayar. Regresyon analizi, bağımsız değişken olarak zaman ve bağımlı değişken olarak kaza sayısı, kaza oranı, çalışan sayısı ile yapılabilir. Regresyon analizi, doğrudan zaman serisi veya anormallikler (yani ortalamadan sapma) üzerinde gerçekleştirilebilir. c (kesme noktası) ve trend m (eğim) ile tanımlanan $y = mt+c$ lineer denklemi, regresyon ile uydurulabilir [21].

Polinom regresyon (Eşitlik 5), yalnızca bağımsız bir X değişkeni ile çoklu regresyonun özel bir durumudur. Tek değişkenli polinom regresyon modeli aşağıdaki formüldeki gibi ifade edilmektedir. Burada k polinomun derecesidir. Polinomun derecesi modelin sırasıdır. Etkin şekilde bu, $X_1 = X$, $X_2 = X^2$, $X_3 = X^3$ değişkenleri ile çoklu bir modele sahip olmakla aynıdır [22].

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \beta_3 x_i^3 \dots + \beta_k x_i^k + \varepsilon_i, \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

En iyi düz çizgiyi bulan hesaplamalar, bu veriler gerçekten çok doğrusal olmasa bile, herhangi bir veri kümesine uyması için doğrusal bir denklem üretecektir. Verilerin gerçekte ne kadar iyi bir çizgiye uyduğunu gösteren bir göstergesi olması için, istatistikçiler ayrıca korelasyon katsayısı olarak bilinen bir sayı hesaplarlar. Bu sembol r veya R ile verilmiştir ve veri çiftlerinin içlerinden en iyi düz çizgiyle ne kadar uyumlu olduklarının bir ölçüsüdür [23]. Deneysel verilerin doğrusal bir eğriye ne oranda uyduğunu gösteren ölçüt, regresyon analiz işleminde hesaplanan determinasyon katsayısıdır (R^2). R^2 değeri, açıklanabilen varyasyonun (SSR) toplam varyasyona (SST) oranı ($R^2 = \text{SSR}/\text{SST}$) şeklinde hesaplanır [24]. Madencilik sektörü, diğer sektörler ve Türkiye geneli için 10 yıllık veriler analiz edilmiş, sonrasında trend analizi ile hesaplanan değerler üzerinden 2022-2026 yılları için kaza sayıları hakkında tahminler edilmiştir gerçekleştirilmiştir. Trend analizinin 2012-2021 yılları arasındaki 10 yıllık veriler kullanılarak gerçekleştirilmesinin sebebi, 2012 yılında yayımlanan İSG kanunu ile kazalar hakkında daha sağlıklı verilerin alınmaya başlanmasıdır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında Kömür ve Linyit Çıkarılması: 5, Ham Petrol Ve Doğalgaz Çıkarımı: 6, Metal Cevheri Madenciliği: 7, Diğer Madencilik ve Taş Ocakları: 8 Madenciliği Destekleyici Hizmet: 9, NACE kodlu işletme verileri kullanılmıştır. 2011–2021 yılları arası, Türkiye geneli ve madencilik sektörü çalışan sayıları

Tablo 1’de verilmiştir [25]. Türkiye geneli çalışan sayısının artışına paralel olarak madencilik sektörü çalışan sayısının da arttığı fakat oransal olarak azaldığı gözlenmektedir. Madencilik sektörü içerisinde en fazla çalışan sayısı ise kömür ve linyit çıkarılması alanında olduğu görülmektedir. Araştırma yapılan alanlardaki madencilik sektörü Türkiye geneli çalışan sayısının son 11 yıldaki oranı ise yaklaşık %1 civarındadır.

Tablo 1. Ekonomik faaliyet sınıfına göre madencilik sektörü çalışan sayıları

Yıllar	Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu (NACE)						Türkiye Geneli	Oranı %
	5	6	7	8	9	Toplam (5+6+7+8+9)		
2011	51.662	3.704	22.197	57.192	4.396	139.151	11.030.939	1,3
2012	50.949	3.757	22.518	58.961	5.202	141.387	11.939.620	1,2
2013	48.706	3.387	24.039	60.911	7.125	144.168	12.484.113	1,2
2014	41.058	3.356	23.422	56.250	8.232	132.318	13.240.122	1
2015	40.508	3.118	22.392	59.893	5.948	131.859	13.999.398	0,9
2016	37.582	2.833	22.991	61.489	7.595	132.490	13.775.188	1
2017	37.596	2.304	27.746	65.181	7.833	140.660	14.477.817	1
2018	35.953	2.261	28.559	60.474	10.085	137.332	14.229.170	1
2019	36.436	2.300	28.188	58.320	9.083	134.327	14.314.313	0,9
2020	36.442	1.991	30.845	61.883	10.531	141.692	15.203.423	0,9
2021	38.349	2.252	34.446	65.405	11.732	152.184	16.169.679	0,9

2011–2021 yılları arasında Türkiye geneli ve madencilik sektöründeki kaza ve ölüm sayıları Tablo 2’de verilmiştir. Türkiye genelinde ve madencilik sektöründe kaza sayıları ciddi oranda artarken, ölüm sayıları yıllar bazında değişkenlik göstermektedir. Madencilik sektöründe meydana gelen kazalar, Türkiye genelinin 2011 yılında %15,3’ünü oluştururken, 2021 yılına kadar azalarak %3,3’ünü oluşturmaktadır. Yine aynı şekilde ölüm oranı da bazı yıllarda değişkenlik

göstermekle birlikte azalarak %6,9’lardan %5,4’lere kadar düşmüştür. Madencilik sektöründe en fazla ölümlerin ise Kömür ve Linyit Çıkarılması ve Diğer Madencilik ve Taş Ocakçılığı alt sektörlerinde olduğu gözlenmektedir. Özellikle 2014 yılındaki Kömür ve Linyit madenciliği alt sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede meydana gelen maden kazasının da etkisiyle ölüm oranları o yıl artarak rekor seviyeye ulaşmıştır.

Tablo 2. Yıllara göre iş kazası ve ölüm sayıları

Yıllar	Yıllık Kaza Sayısı							Oran %	Yıllık Ölüm Sayısı							Oran %
	Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu (NACE)						Türkiye Geneli		Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu					Türkiye Geneli		
	5	6	7	8	9	(5+6+7+8+9)			5	6	7	8	9		(5+6+7+8+9)	
2011	9.217	51	449	702	139	10.558	69.227	15,3	55	1	16	43	2	117	1.700	6,9
2012	8.825	44	421	569	101	9.960	74.871	13,3	20	0	7	17	0	44	744	5,9
2013	11.289	118	1.055	1.598	244	14.304	191.389	7,5	36	3	16	28	4	87	1.360	6,4
2014	10.026	165	1.030	1.557	271	13.049	221.366	5,9	335	1	7	38	1	382	1.626	23,5
2015	7.429	84	997	1.639	271	10.420	241.547	4,3	26	0	13	40	0	79	1.252	6,3
2016	8.274	112	1.037	2.045	324	11.792	286.068	4,1	11	0	8	64	0	83	1.405	5,9
2017	8.468	95	1.622	2.537	330	13.052	359.653	3,6	31	0	16	38	1	86	1.633	5,3
2018	8.399	57	1.775	2.806	734	13.771	430.985	3,2	11	1	11	33	1	57	1.541	3,7
2019	8.983	67	1.756	2.435	926	14.167	422.463	3,4	13	0	7	28	0	48	1.147	4,2
2020	8.460	63	1.741	2.133	650	13.047	384.262	3,4	21	0	13	28	4	66	1.231	5,4
2021	11.104	84	2.341	2.828	726	17.083	511.084	3,3	10	0	17	43	5	75	1.382	5,4

Tablo 1 ve 2’de görüleceği üzere madencilik sektöründe iş kazası geçirme olasılığı diğer sektörler göre çok daha yüksektir. Madencilik sektöründe çalışan sayısının Türkiye geneli çalışan sayısına oranı son 11 yıllık dönemde yaklaşık %1 olmasına rağmen, iş kazası geçirme oranı yaklaşık %6,1, ölüm oranı ise %7,2’dir. Bu veriler madencilik sektöründe çalışanların Türkiye geneli diğer sektör çalışanlarına göre kaza geçirme oranının 6, ölüm oranının ise 7 katından daha fazla olduğunu göstermektedir. 2011 yılında gerçekleşen 69.227 iş kazasının %15,3’ü madencilik sektöründe gerçekleşirken, bu oran yıllar geçtikçe azalarak Tablo 2’de görüldüğü gibi 2021 yılında %3,3’e kadar düşmüştür. İstatistiklerde dikkat çeken bir diğer nokta ise 2013 yılı verileridir. Türkiye geneli yıllık kaza sayılarına baktığımızda 2013 yılında, 2012 verilerine göre yaklaşık %156’lık artış meydana gelmiştir. Madencilik sektöründe ise bu artış yaklaşık %43 olmuştur. Bu artışı açıklayan en önemli gelişme, 2012 yılında yürürlüğe giren bu sınıftaki işletmeleri yakından ilgilendiren 6331 sayılı İSG Kanununun yürürlüğe girmesiyle birlikte kayıtlara girmeyen

kazalar kayıt altına alınmaya başlanmış ve bu durum da istatistiklere yansımıştır.

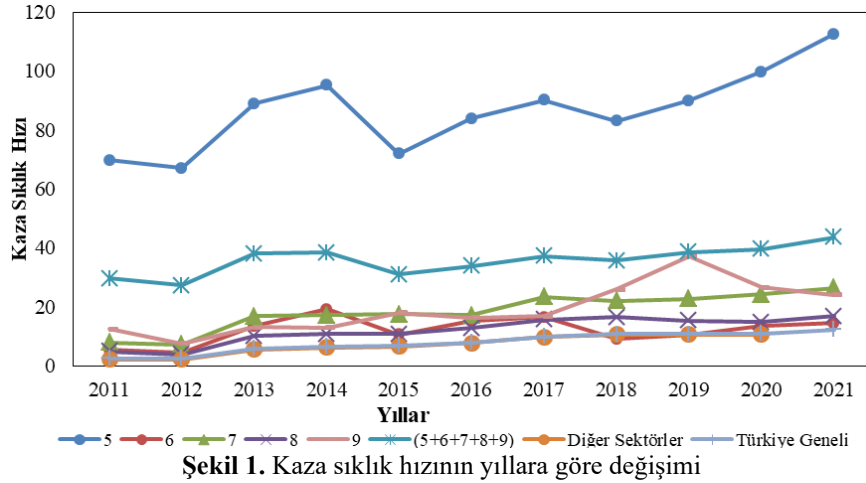
Madencilik sektöründe yıllara göre en fazla iş kazası sırasıyla Kömür ve Linyit Çıkarılması, Diğer Madencilik ve Taş Ocakları, Metal Cevheri Madenciligi, Madenciligi Destekleyici Hizmet ve Ham Petrol ve Doğalgaz Çıkarımı alt sektörlerinde gerçekleşmiştir. Tablo 3’te kaza sıklık hızları incelendiğinde madencilik sektöründeki 5 faaliyet alanında 1.000.000 iş saatinde 35,68 kaza gerçekleşirken diğer sektörlerde 7,58 iş kaza gerçekleşmektedir. Bu veriler bize Türkiye geneli ve diğer sektörlerle madencilik sektörü karşılaştırdığımızda kaza sıklık hızlarının diğer sektörler göre yaklaşık 5 kat daha fazla olduğunu göstermektedir. Madencilik sektörü ülkemiz için çok önemli sektörlerden birisi olmasına rağmen Türkiye geneli ile karşılaştırıldığında yaklaşık 5 kat daha fazla kaza meydana geliyor olması doğrudan madencilik sektörüne yönelik özel önlemlerin alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Ekonomik faaliyet sınıfına göre kaza sıklık hızları

Yıllar	Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu(NACE)						Diğer Sektörler	Türkiye Geneli
	5	6	7	8	9	(5+6+7+8+9)		
2011	69,64	5,37	7,89	4,79	12,34	29,61	2,10	2,45
2012	67,04	4,53	7,23	3,73	7,51	27,27	2,13	2,43
2013	88,87	13,35	16,82	10,05	13,13	38,04	5,50	5,88
2014	95,13	19,15	17,13	10,78	12,82	38,41	6,19	6,51
2015	71,92	10,56	17,46	10,73	17,87	30,99	6,53	6,77
2016	83,78	15,04	17,17	12,65	16,23	33,87	7,65	7,90
2017	90,09	16,49	23,38	15,57	16,85	37,11	9,67	9,94
2018	82,99	8,95	22,08	16,48	25,85	35,62	10,51	10,76
2019	89,89	10,62	22,71	15,22	37,17	38,45	10,49	10,76
2020	99,68	13,58	24,23	14,80	26,50	39,53	10,59	10,85
2021	112,42	14,48	26,39	16,79	24,03	43,58	11,97	12,27

Kaza sıklığının yıllara göre değişimi Şekil 1’de verilmektedir. Buna göre Türkiye geneli ve madencilik sektöründe kaza sıklığında yıllar geçtikçe artış görülmektedir. 2011 yılında madencilik sektöründe her 1.000.000 iş saatinde 29,61 iş kazası gerçekleşirken 2021 yılında bu değer yaklaşık %34 artarak 43,58 olarak gerçekleşmektedir. Yine benzer şekilde 1.000.000 iş saatinde Türkiye genelinde 2011 yılında

2,45 iş kazası meydana gelirken 2021 yılında 12,27 kaza gerçekleşmektedir. İncelenen 11 yıllık süreçte kaza sıklık hızının madencilik sektöründe Türkiye geneline göre yaklaşık 4 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum madencilik sektörünün alt sektörü kömür ve linyit çıkarılması ile karşılaştırıldığında özellikle 2020 yılı için kaza sıklık hızı Türkiye genelinin yaklaşık 10 katı olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Kaza sıklık hızının yıllara göre değişimi

Kaza sıklık hızının madencilik sektöründeki alt sektörler bazında incelendiğin en yüksek değerin “Kömür ve Linyit Madenciliği,” alt sektöründe olduğu görülmektedir. Ayrıca, 2012 yılından sonra iş kazası sayısındaki artışta, 2012 yılında yayımlanan 6331 sayılı iş sağlığı ve güvenliği kanunu ve iş kazası bildirimlerinin elektronik ortamda yapılabilmesi gibi

kolaylıklar kaza sayılarının daha gerçekçi olmasına yardımcı olmuştur.

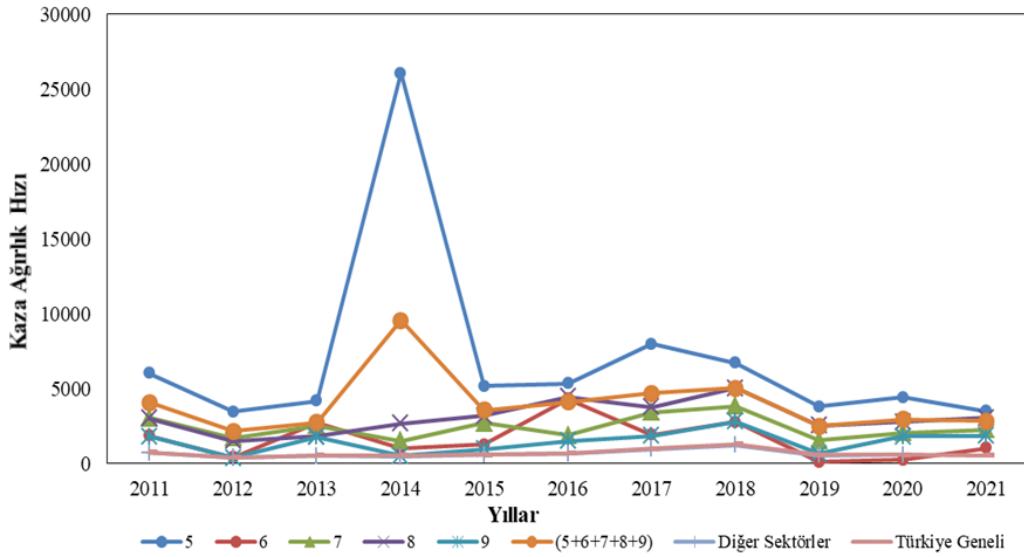
İş kazası ağırlık hızı, bir işyerindeki kazaların ağırlık derecesini göstermektedir. Tablo 4’te 2011-2021 yılları arası Türkiye geneli ve madencilik sektörü için iş kazası ağırlık oranları verilmiştir.

Tablo 4. Kaza ağırlık hızı bilgileri

Yıllar	Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu(NACE)						Diğer Sektörler	Türkiye Geneli
	5	6	7	8	9	(5+6+7+8+9)		
2011	5.993	1.806	3.036	3.000	1.784	4047	679	721
2012	3.436	388	1.684	1.474	337	2.144	374	395
2013	4.154	2.697	2.517	1.789	1.765	2.730	481	507
2014	26.065	979	1.480	2.654	492	9.534	423	514
2015	5.136	1.247	2.680	3.162	928	3.541	537	565
2016	5.325	4.305	1.863	4.438	1.496	4.071	632	665
2017	7.943	1.884	3.386	3.749	1.838	4.662	937	973
2018	6.686	2.745	3.827	5.007	2.765	4.999	1.222	1.259
2019	3.790	75	1.505	2.495	631	2.471	530	548
2020	4.405	207	2.037	2.762	1.789	2.919	546	568
2021	3.471	1.014	2.221	3.008	1.806	2.825	510	532

Türkiye geneli ve madencilik sektöründeki 5 faaliyet için İş Kazası Ağırlık hızlarının yıllara göre değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Madencilik sektöründeki için 11 yıllık kaza verileri incelendiğinde 1.000.000 iş saatinde kazalardan dolayı 3.995 iş günü, Türkiye genelinde ise ortalama 659 iş günü kaybı oluşmuştur. Diğer sektörler ile karşılaştırıldığında kaza ağırlık hızı madencilik

sektöründe yaklaşık yedi kat daha fazla oranda iş günü kaybına neden olduğu görülmektedir. Kömür ve Linyit Madenciliği alt sektörlerinde 2014 yılında bu oranın özellikle Soma maden faciasının da etkisiyle Türkiye geneli ve diğer sektörlerle oranla yaklaşık 52 katına çıktığı görülmektedir.



Şekil 2. Yıllara göre kaza ağırlık hızı

Türkiye geneli ve madencilik sektöründeki 5 faaliyet için hesaplanan iş kazası olabirlik oranı Tablo 5'te ve yıllara göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Türkiye geneli ve bütün sektörlerde iş kazası olabirlik oranları 2011-2021 yılları arasında sürekli artmaktadır.

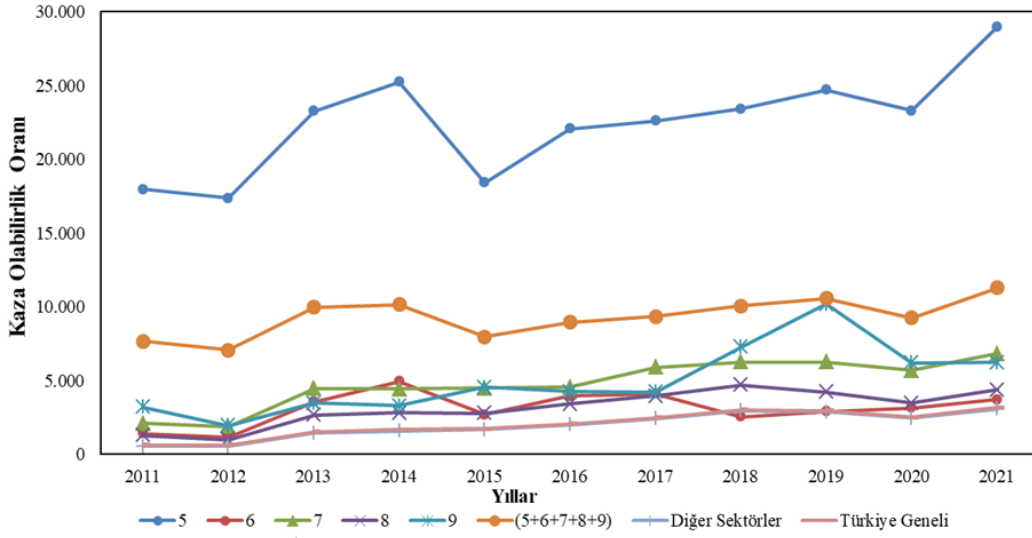
Kaza olabirlik oranı, 100.000 çalışanda kaza geçiren çalışan sayısını vermektedir. Bu doğrultuda incelenen 11 yıllık dönemde madencilik sektöründe her 100.000 çalışanda ortalama 9.302 kişi kazaya uğrarken Türkiye genelinde 2.048 kişi kazaya uğramaktadır. Madencilik sektöründe özellikle 2017-2021 yılları arasında her 100 kişiden yaklaşık 10'u kazaya maruz kalmıştır.

Tablo 5. İş kazası olabirlik oranı

Yıllar	Ekonomik Faaliyet Sınıflama Kodu(NACE)						Diğer Sektörler	Türkiye Genel
	5	6	7	8	9	(5+6+7+8+9)		
2011	17.947	1.404	2.095	1.303	3.207	7.672	553	643
2012	17.360	1.171	1.901	994	1.942	7.076	556	633
2013	23.252	3.572	4.455	2.669	3.481	9.982	1.445	1.544
2014	25.235	4.946	4.427	2.836	3.304	10.151	1.599	1.684
2015	18.404	2.694	4.511	2.803	4.556	7.962	1.675	1.734
2016	22.045	3.953	4.545	3.430	4.266	8.963	2.020	2.087
2017	22.606	4.123	5.904	3.951	4.226	9.340	2.428	2.495
2018	23.392	2.565	6.254	4.695	7.288	10.069	2.971	3.040
2019	24.690	2.913	6.254	4.223	10.195	10.582	2.887	2.959
2020	23.273	3.164	5.686	3.492	6.210	9.255	2.472	2.536
2021	28.981	3.730	6.845	4.390	6.231	11.275	3.092	3.169

2012 yılı ve sonraki yıllarda madencilik sektöründeki kaza olabirlik oranlarının diğer sektörlerle oranla daha az arttığı görülmektedir. Madencilikte kaza olabirlik oranları Türkiye genelinin çok üstünde olmakla beraber en yüksek değer Soma maden faciasının da etkisiyle 2014 ve 2021 yıllarında, diğer Kömür ve Linyit Madenciligi alt sektöründe yaşanmıştır. Türkiye

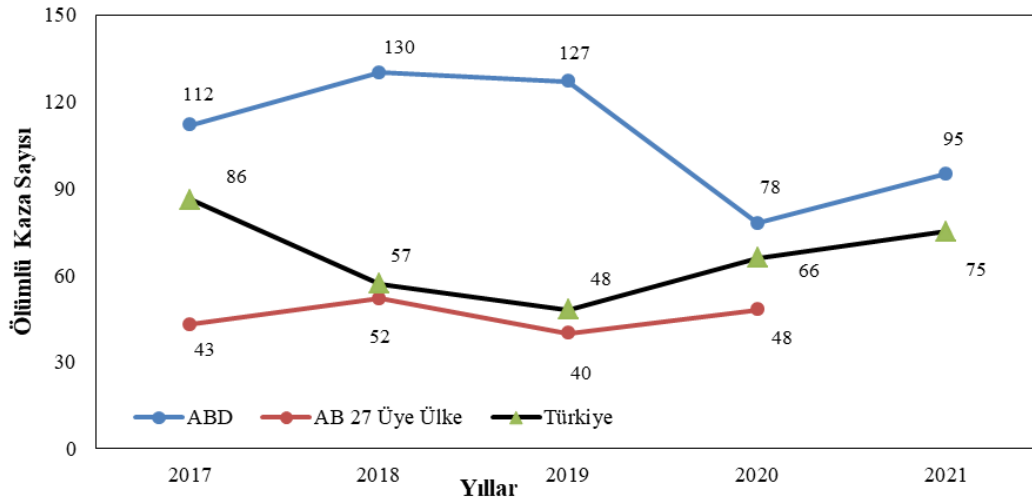
genelinde 2012 yılında 74.871, 2013 yılında ise 191.389 iş kazasına meydana gelmiştir. Türkiye'deki ölümlü kaza sıklığı değeri, Avrupa birliği ülkelerin ortalamasından dört kat daha fazladır [26]. Bu veriler bize iş kazaları alanında almamız gereken çok yol olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. İş kazası olabilirlik oranının ve yıllara göre değişimi

Türkiye'deki maden sektöründe yaşanan ölümlü kaza sayıları ile Avrupa Birliği geneli (27 ülke) ve ABD arasında karşılaştırma yapılmıştır. Avrupa birliği ile ilgili ölümlü kaza verileri EUROSTAT veri tarayıcısından alınmıştır. EUROSTAT'ta en son 2020

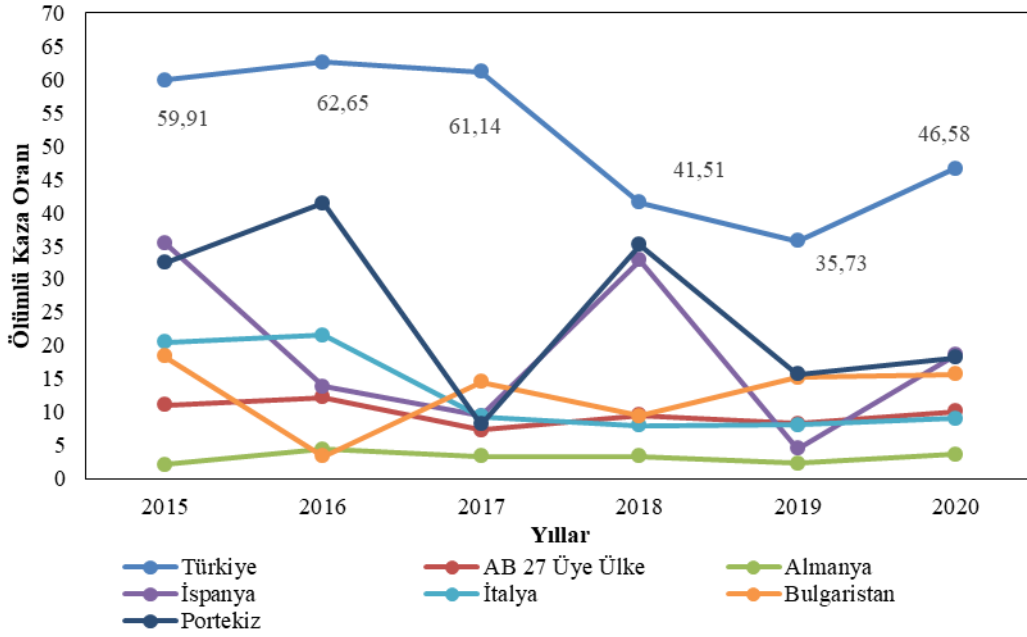
yılı verileri paylaşıldığı için karşılaştırmada Avrupa Birliği geneli (27 ülke) için 4 yıllık veriler kullanılmıştır [27]. ABD'nin maden sektöründeki ölümlü kaza sayıları ise ABD çalışma istatistikleri bürosundan elde edilmiştir [28].



Şekil 4. Türkiye-AB (27 Ülke)-ABD maden sektörü ölümlü kaza sayısı karşılaştırması

Şekil 4'e göre ABD'deki maden sektörü ölümlü kaza sayılarının değerlendirilen tüm yıllarda gerek Türkiye'den gerekse Avrupa Birliği genelinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 2019 yılında ABD'deki maden sektöründe meydana gelen ölümlü kazalar Avrupa Birliği genelinden yaklaşık 3 kat, Türkiye'den ise yaklaşık 2,5 kat daha fazladır.

Şekil 5'te ise maden sektörü için Türkiye, Avrupa Birliği geneli ve birliğe üye ülkelerden bazılarının (gelişmiş ve gelişmekte ülkeler) 100.000 çalışandaki ölümlü kaza oranları verilmiştir.

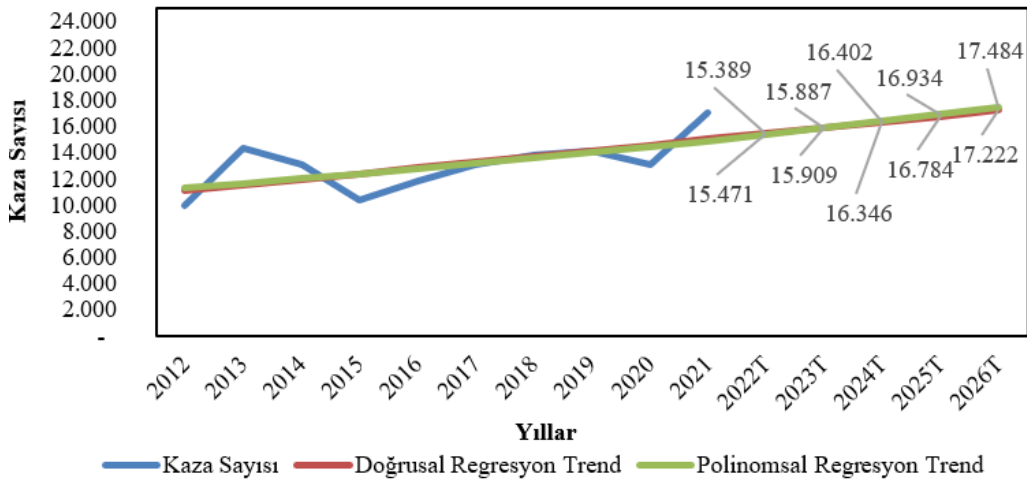


Şekil 5. Türkiye ve seçili AB ülkeleri maden sektörünün ölümlü kaza oranı karşılaştırması

Şekil 5’de Türkiye’de maden sektöründe çalışanların ölümlü kaza oranlarını karşılaştırma yapılan ülkeler arasında en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. 2015 yılında her 100.00 maden çalışanından Türkiye’de 59,91 çalışan iş kazası sonucu hayatını kaybederken Almanya’da 2,09, Bulgaristan’da 18,33, İtalya’da 20,53, Portekiz’de 32,43, İspanya’da 35,48, Avrupa Birliği üye ülke ortalaması 11,05 çalışan hayatını kaybetmektedir. Bu doğrultuda Türkiye’deki ölümlü kaza oranlarının Avrupa Birliği geneli ülke ortalamalarına göre yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu söylenebilir. Ölümlü kaza oranının bu denli yüksek olması Türkiye’de yaşanan iş kazalarının daha ciddi sonuçlar oluşturduğunu göstermektedir.

Trend analizi, geçmişteki koşulların gelecek tahmin döneminde devam edeceği beklenen durumlarda kullanılan yöntemdir. Trend analizi aynı zamanda bir zaman serisi analizidir. Bu analizle bir serinin zaman

içerisinde göstermiş olduğu değişim tahmin edilmektedir. Tahmin edilecek veriler ile değişkenlerin arasında doğrusal bir ilişki söz konusu olduğunda model için doğrusal (lineer) regresyon algoritması kullanılırken veriler arasında doğrusal bir ilişki yoksa polinomsal algoritma kullanılmaktadır. Değerlendirme yapılan yıllar ile meydana gelen kaza sayıları arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur. Bu nedenle 2022-2026 yılları arasındaki verileri tahmin etmek için polinomsal regresyon kullanılmıştır. Bununla birlikte çalışma kapsamında 2022-2026 yılları arasındaki veriler hem doğrusal hem de polinomsal regresyon ile tahmin edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. R^2 değeri tahmin edilen verilerin doğrusal bir eğriye ne kadar uyduğunu gösteren bir ölçüttür. R^2 değeri 0,7’den büyük ise bu değer genellikle güçlü etki büyüklüğü olarak kabul edilir [29]. Şekil 6’da 10 yıllık veriler kullanılarak 2022-2026 yılları arasında meydana gelebilecek İş kazası sayılarının tahminleri verilmiştir.

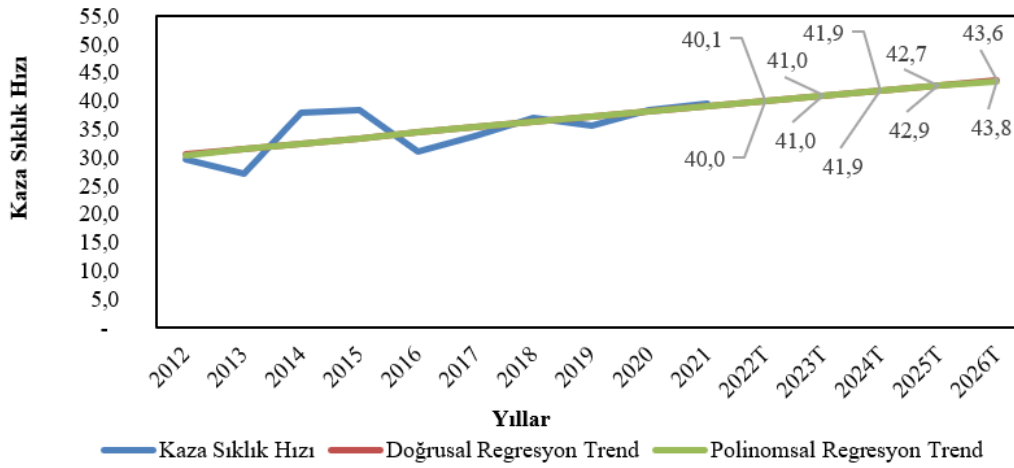


Şekil 6. Madencilik sektörü 2022-2026 yılları arası kaza trendi

Şekil 6 incelendiğinde madencilik sektöründe kaza sayısı pandeminin etkisi ile 2020 yılı verilerinde kısmi bir düşüş olsa da genel olarak artma eğilimi devam etmiştir. Bununla birlikte, hesaplama yapılan her iki regresyon türünde birbirlerine yakın tahminler gerçekleştiği görülmektedir. R^2 değeri doğrusal regresyon için 0,7105, polinomsal regresyon için 0,7146 olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda, SGK tarafından verileri yayımlanmış 2012-2021 yılları arasında madencilik sektöründe yıllık ortalama 13.065 kaza meydana gelirken 2022-2026 yılları arasında doğrusal regresyon analizine göre yıllık ortalama 16.347 kazaya, polinomsal regresyon analizine göre ise 16.419 kazaya ulaşacağı söylenebilir. Bu sonuçlar

madenlerde yaşanan iş kazalarının önlenmesinde Türkiye'nin eksiklerinin olduğunu ve dolayısıyla İSG alanında yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır.

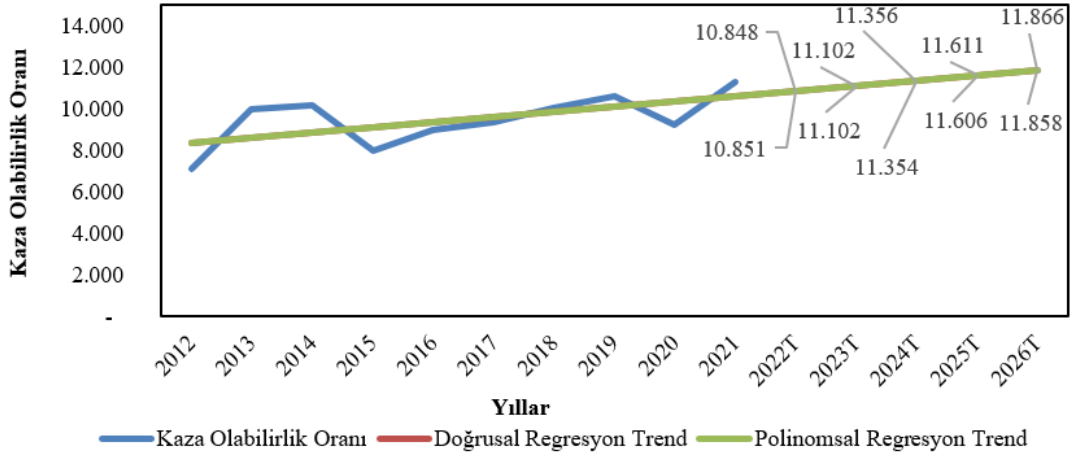
Şekil 7'de doğrusal ve polinom regresyon ile 10 yıllık veriler kullanılarak madencilik sektöründeki 2022-2026 yılları arasındaki kaza sıklık hızı tahminleri verilmiştir. R^2 değerleri doğrusal regresyon için 0,7274, polinomsal regresyon için 0,7279 olarak hesaplanmıştır. Genel olarak toplam varyasyonun %70'in üzerinde açıklanması tahmin edilen verilerin doğrusal eğriye iyi uyduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Madencilik sektörü 2022-2026 yılları arası kaza sıklık hızı trendi

Şekil 7 incelendiğinde madencilik sektöründeki kaza sıklık hızının 2022-2026 yılları arasında artarak devam ettiği görülmektedir. Bununla birlikte, 2022-2026 yıllarında kaza sıklık hızlarını tahmin etmek için kullanılan her iki regresyon analizinin de bir birine çok yakın değerler verdiği görülmektedir. Değerlendirme yapılan 2012-2021 yılları arasında çalışılan 1.000.000 iş saatinde meydana gelen ortalama kaza sayısı 36,3 iken 2022-2026 yılları arasında gerek doğrusal regresyon analizinde gerekse polinomsal regresyon analizinde %20,1 oranında artarak ortalama 41,9 kazaya çıkmaktadır.

Şekil 8'da madencilik sektöründeki 2022-2026 yılları arasındaki kaza olabilirlik oranı tahminleri verilmiştir. Gerçekleştirilen tahminleri gerçek veriler ile ne kadar uyumlu olduğunu kontrol etmek için R^2 değeri hesaplanmıştır. R^2 değerleri hem doğrusal regresyon için hem de polinomsal regresyon için 0,6719 olarak hesaplanmıştır. Madencilik sektöründeki kaza ağırlık hızı verileri 2014 yılındaki veri dalgalanmasına bağlı olarak hızlı iniş çıkışlar gösterdiği için R^2 değeri 0,023 olarak hesaplanmıştır. R^2 değerinin düşük olması tahmin edilecek verilerin gerçek verilere uyumunu düşüreceği için kaza ağırlık hızının 2022-2026 yılı tahminleri çalışmaya dahil edilmemiştir.



Şekil 8. Madencilik sektörü 2022-2026 yılları arası kaza olabilirlik oranı trendi

Şekil 8 incelendiğinde madencilik sektöründe kaza olabilirlik oranının 2022-2026 yılları arasında artış trendinin de olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 2022-2026 yıllarında kaza olabilirlik oranı tahmin etmek için kullanılan her iki regresyon analizinin de bir birine çok yakın değerler verdiği görülmektedir. Bu

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, madencilik sektörü faaliyet alanları için 2011–2021 yılları arası iş kazası verileri analiz edilerek geleceğe yönelik perspektifte bulunulmuştur.

Madencilik sektöründe iş kazası geçirme olasılığı diğer sektörler göre çok daha yüksektir. Madencilik sektöründe çalışanların Türkiye geneli diğer sektör çalışanlarına göre kaza geçirme oranının 6, ölüm oranının ise 7 katından daha fazla olduğu görülmektedir. Madencilik sektöründe kaza sıklık hızları Türkiye genelinin çok üstünde olmakla beraber en çok kaza “Kömür ve Linyit Çıkarılması” alt sektöründe yaşanmıştır.

Madencilik sektöründeki kaza ağırlık hızı diğer sektörler ile karşılaştırıldığında yaklaşık yedi kat daha fazla oranda iş günü kaybına neden olduğu görülmektedir. Kömür ve Linyit Madenciligi alt sektörlerinde 2014 yılında bu oranın özellikle Soma maden faciasının da etkisiyle Türkiye geneli ve diğer sektörler oranla yaklaşık 52 katına çıktığı gözlenmiştir. Kaza olabilirlik oranı kapsamında 11 yıllık dönemde madencilik sektöründe her 100.000 çalışanda ortalama 9.302 kişi kazaya uğrarken Türkiye genelinde 2.048 kişi kazaya uğramaktadır.

2026 yılına yönelik projeksiyonda iş kazalarının madencilik sektörü için yaklaşık %25, Türkiye geneli için %70 civarında artacağı öngörülmektedir. Projeksiyon kapsamında kullanılan her iki regresyon türünde de birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum Türkiye genelinde ve madenlerde yaşanan iş kazalarının önlenmesi konusunda Türkiye'nin yeni bir İSG stratejisine ihtiyacı olduğu ve sektörler yönelik

doğrultuda 2012-2021 yılları arasında madencilik sektöründe 100.000 çalışanda yıllık ortalama 9.465 çalışan kaza geçirirken 2022-2026 yılları arasında bu oran doğrusal regresyon analizine göre yıllık ortalama 11.354 kazaya, polinomsal regresyon analizine göre ise 11.356 kazaya yükselmiştir.

uygulanmakta olan politikaların gözden geçirilmesi gerektiği açıkça ortaya koymaktadır.

Madencilik sektörü çalışanlarına, faaliyet türü ve işyerinde karşılaşılabilecekleri tehlike türleri dikkate alınarak eğitimlerin verilmesi, kazaların şiddetini en aza indirmenin bir yolu olarak düşünülebilir. Öncelikli olarak güvenli çalışma ortamının sağlanması, İSG şartlarının iyileştirilmesi, bütün çalışanlara güvenlik eğitimlerinin verilmesi gerekmektedir. İş sağlığı ve güvenliği kültürünün yaşamın her alanında yaygınlaştırılması, Eğitim öncelikle ailede başlamalı sonrasında okul ve çalışma hayatından devam ettirilmelidir. Ancak, bu sayede bireylerde oluşturulacak güvenlik kültürü işletmelere, sektöre ve hatta ülkeye yayılabilir. İSG çoklu bir çalışma alanı olduğu için tüm tarafların (işçi, işveren, devlet) katılımını gerektirmektedir. Bu faaliyetler bir sosyal politika kapsamında değerlendirilmesi toplumdaki tüm taraflarda farkındalığın artırılmasına önemli katkılar sağlayacaktır. Gerek madencilik sektöründe gerekse diğer sektörlerde meydana gelen kazaların ağırlıklı olarak çalışan hatalarından kaynaklandığı görülmektedir. Bu nedenle bireysel hataları engelleyebilecek teknolojik gelişmelerin olabildiğince madenlere entegre edilmesi gerçekleştirilecek kazaların azaltılmasında önemli bir avantaj sağlayacaktır. Madenlerde en ufak hatanın bile sonuçları çok ciddi olabilmektedir. Bu nedenle maden içerisinde gerçekleştirilen ölçüm ve denetlemelerin küçük hatalara bile yer vermeyecek şekilde planlanması ve uygulanması kazaların azaltılması bakımından büyük önem arz etmektedir. Alınmayan ya da eksik alınan güvenlik önlemleri binlerce madencinin hayatını kaybetmesine neden olurken aileleri ve yakın

çevresi dahil edildiğinde on binlerce hatta yüzbinlerce insanın etkilenmesine, sosyolojik problemlerin çoğalmasına sebep olmaktadır. Bu doğrultuda gerek madenlerde gerekse diğer sektörlerde alınacak iş güvenliği önlemleri işletmelerin verimliliklerine katkı

sağlamakla beraber halk sağlığının korunmasına da yardımcı olacaktır. Gerçekleştirilen trend analizinde 10 yıllık veriler kullanılmıştır. Sonraki çalışmalarda daha uzun dönemli serilerin kullanılması tahmin edilen yılların doğruluk oranını arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] International Labour Organization., (2008). "Promoting Safe and Healthy Jobs. The ILO Global Programme on Safety." Health and the Environment (Safework), in: *World of Work*, 63, 4-11.
- [2] Eurostat. 8.6% of Workers in the EU Experienced Work-related Health Problems. Statistics on Focus, 63/2009. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-09-063/EN/KS-SF-09-063-EN.PDF.
- [3] Yılmaz, F., & Alp, S., (2016). Underlying Factors of Occupational Accidents: The Case of Turkey. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 6(1), 1-9.
- [4] Bilim, N., (2015). Kömür Madenlerinde Meydana Gelen İş Kazalarının İstatistiksel Değerlendirilmesi. *Madencilik Türkiye*, 6(44):78-82.
- [5] Khanzode, VV., Maiti, J., & Ray, PK., (2011). A Methodology for Evaluation and Monitoring of Recurring Hazards in Underground Coal Mining. *Safety Science*, 49(8-9): 1172-1179.
- [6] Atalay, F., The History of the Coal Mining Industry and Mining Accidents in the World and Turkey. *Turkish Thoracic Journal*, 16(1): 5-8, (2015).
- [7] Arıtan, AE., & Ataman, M., (2017). Kaza Oranları Hesaplamalarıyla İş Kazası Analizi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17(1): 240-245.
- [8] Dündar, S., Bilim, N., & Bilim, A., (2018). Ülkemizdeki Maden Sektöründe Meydana Gelen İş Kazası ve Meslek Hastalıklarının Analizi. *Bilis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2): 424-431.
- [9] Bayraktar, B, Uygucgil, H., & Konuk, A., (2018). Türkiye Madencilik Sektöründe İş Kazalarının İstatistiksel Analizi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 57: 86-89.
- [10] Ceylan, H., (2012). Analysis of Occupational Accidents According to The Sectors in Turkey. *Gazi University Journal of Science*, 25(4): 909-918.
- [11] Jiang, W, Fu, G., Liang, Y., & Han, W., (2020). Study on Quantitative Measurement Result of Safety Culture. *Safety Science*, 128.
- [12] Zhang, J., Fu, J., Hao, H., Fu, G., Nie, F., & Zhang, W., (2020). Root Causes of Coal Mine Accidents: Characteristics of Safety Culture Deficiencies Based on Accident Statistics. *Process Safety and Environmental Protection*, 136, 78-91.
- [13] Stenn, E., Ntsiful, F., Azadah, M. A., & Joe-Asare, T., (2020). Incident Causal Factors and the Reasons for Conducting Investigations: A Study of Five Ghanaian Large-Scale Mines. *Safety*, 6(1), 9.
- [14] Jiang, W., Liang, C., & Han, W., (2019). Relevance Proof of Safety Culture in Coal Mine Industry. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 835.
- [15] Löow, J., & Nygren, M., (2019). Initiatives for Increased Safety in The Swedish Mining Industry: Studying 30 Years of Improved Accident Rates. *Safety Science*, 117, 435-456.
- [16] Abdulhamid, T.S., & Everett, J.G., (2000). Identifying Root Causes of Construction Accidents. *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(1): 50-62.
- [17] Porkka, P., (2016). Functional Model for Organisational and Safety Culture. *Chemical Engineering Transactions*, 48, 907-912.
- [18] International Labour Office (ILO), (1998). 16th International Conference of Labour Statisticians, Geneva.
- [19] Balcı, B., Taçkın, E., Balcı, E.Ö., & Yerden, A., (2013). İş Kazalarında Mali Kayıplar. *İstanbul Sosyal Bilimler Dergisi*, (6): 66-83.
- [20] Yazgılı, E., & Baykara, M., (2021). Siber Zorbalık Tespit Yöntemleri Potansiyel Uygulama Alanları ve Zorluklar. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(1), 23-35.
- [21] Mudelsee, M., (2019). Trend Analysis of Climate Time Series: A Review of Methods. *Earth-Science Reviews*, 190: 310-322.
- [22] Bilen, A., & Özer, A. B., (2022). Regresyon Yöntemlerine Dayalı Suç Tespit Analizi Karşılaştırması Elazığ İli Örneği. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 115-121.
- [23] Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G., (2021). Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons.
- [24] Kasuya, E., (2019). On the Use of R and R Squared in Correlation and Regression. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc34(1): 235-236.
- [25] <http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgkistatistikyilliklari> [E.T:22.05.2022]
- [26] Güllüoğlu, E.N., & Güllüoğlu, A.N., (2019). Türkiye İnşaat Sektöründe İstihdam ve İş Kazalarının Analizi. *Karaelmas Journal of Occupational Health and Safety*, 3(2), 65-8.
- [27] Eurostat, Maden Sektörü Ölümlü Kaza Sayıları, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/H SW N2 02 custom 4648929/default/table?lang=en> (E.T. 24.01.2023)
- [28] U.S. Bureau Of Labor Statistics, Maden Sektörü Ölümlü Kaza Sayıları. <https://www.bls.gov/charts/census-of-fatal-occupational-injuries/fatal-occupational-injuries-private-sector-mining.htm> (E.T. 24.01.2023)

- [29] Moore, R.B., (2004). Estimation of Total Nitrogen and Phosphorus in New England Streams Using Spatially Referenced Regression Models. US Department of the Interior, US Geological Survey.

Yetenek Yönetimi Uygulamalarının Örgüt Performansı ile İlişkisinde Kurumsal Girişimciliğin Aracılık Etkisi

Mediation Effect of Corporate Entrepreneurship on the Relationship of Talent Management Practices and Organizational Performance

Zülal ÖZTÜRK KAYA¹, Gaye KARAÇAY², Selim ZAİM³, Lutfihak ALPKAN⁴

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ İstanbul Zaim Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

⁴ İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu araştırma yetenek yönetimi uygulamalarının örgüt performansı ile ilişkisi ve bu ilişki üzerinde kurumsal girişimciliğin aracılık etkisinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmada internet üzerinden uygulanan anket ile şirketlerin insan kaynakları yöneticileri ve orta kademe birim yöneticilerinden toplanan toplam 1090 adet anket verisi kantitatif araştırma yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. En Küçük Kareler (SEM-PLS) yöntemine dayalı yapısal eşitlik modeli kullanılarak önce ölçüm modeli sonra da yapısal eşitlik modeli ile araştırmanın hipotezleri test edilmiştir. Analiz sonuçları; kurumsal girişimciliğin örgütün finansal performansı üzerinde anlamlı pozitif etkisi olduğunu göstermiş ve yetenek yönetimi uygulamalarının kurumsal girişimcilik üzerinde anlamlı olumlu etkisini kanıtlamıştır. Yetenek yönetimi uygulamalarının şirketin finansal performansı üzerinde kurumsal girişimciliğin aracılık rolü üzerinden anlamlı olumlu etkisi ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: yetenek yönetimi, stratejik insan kaynakları yönetimi, örgüt performansı, kurumsal girişimcilik

*Bu çalışma Doç. Dr. Gaye KARAÇAY danışmanlığında, Prof. Dr. Selim ZAİM ve Prof. Dr. Lutfihak ALPKAN tez jüri üyeliğinde Zülal ÖZTÜRK KAYA tarafından hazırlanan doktora tezinden türetilmiştir.

Abstract

This study was conducted to investigate the relationship between talent management practices and organizational performance; together with the mediating effect of corporate entrepreneurship on this relationship. Data were collected from the human resources managers and mid-level function managers of the firms through an online survey. The data gathered from the 1090 responses were analyzed by quantitative analysis methods. Structural equation modelling based on the Partial Least Squares (SEM-PLS) method was used to evaluate both the measurement model and the structural model to test hypotheses of the current study. The results confirmed the positive effect of corporate entrepreneurship on the financial performance of the organization, and showed that talent management practices are positively related to corporate entrepreneurship. The effect of talent management practices on financial performance is found to be significantly positive via the mediating effect of corporate entrepreneurship.

Key Words: talent management, strategic human resources management, organizational performance, corporate entrepreneurship

*This study has derived that the PhD thesis of Zülal ÖZTÜRK KAYA prepared under the supervision of Assoc. Prof. Dr. Gaye KARAÇAY, Prof. Dr. Selim ZAİM and Prof. Dr. Lutfihak ALPKAN.

I. GİRİŞ

Küreselleşme ve değişimin hız kazandığı günümüzde; organizasyonların varlıklarını koruyabilmeleri ve rakiplerinden farklılaşarak rekabet gücü elde edebilmeleri ancak iş, süreç, ürün ve hizmet bazında yenilik yapabilmeleri ile mümkün olmaktadır (Pinchot, 1985; Schuler, 1986). Bunun temel nedeni, günümüz iş dünyasının karmaşık ve dinamik koşullarında şirketlerin sürdürülebilir rekabetçi üstünlük sağlayabilmelerinin ön koşulu fırsatları hızlı görüp değerlendirmelerine, diğer bir deyişle girişimcilik kapasitelerine dayanmaktadır. Bu nedenle, şirket içinde sağlanan girişimcilik iklimi ve bu kapsamda gerçekleştirilen kurumsal girişimcilik faaliyetleri şirketlerin rakipleri karşısında öne çıkarak hem ekonomik hem de sürdürülebilir rekabetçi üstünlük elde edebilmeleri için önemli bir araç olmaktadır (Antoncic & Hisrich, 2001).

Rekabet avantajını yaratan önemli bir diğer unsur ise şirketlerin sahip olduğu insan kaynağı sermayesidir (Huselid, 1995). İnsan kaynağının yeterliliği, yetkinlikleri ve becerileri bir şirketin rekabet avantajının en önemli unsurlarını oluşturmaktadır. İnsan kaynakları yönetimi (İKY) uygulamalarının şirketin verimliliğine ve finansal performansına olumlu etkisinin ortaya konulduğu çok sayıda araştırma literatürde yer almaktadır (Huselid, vd., 1997; Huselid, 1995; MacDuffie (1995). İnsan kaynakları yönetiminin geçirdiği evrime bakıldığında, zaman içerisinde değişen iş yapış şekilleri ve buna bağlı çalışandan beklenen katkının artan stratejik önemine bağlı olarak insan kaynakları (İK) fonksiyonlarının stratejik iş ortaklığına giden bir gelişim gösterdiği görülmektedir (Schuler, vd., 2001). Değişen rekabet şartlarının bir gereği olarak insan kaynağının şirketlerin en önemli rekabet avantajlarından birisini oluşturmaya başlaması ile, bu kaynağın şirkete çekilmesinden, şirket içinde elde tutularak yüksek performans sağlayacak şekilde istihdam edilmesine kadar tüm süreci bütünsel olarak planlanıp yönetilmesinden sorumlu olan insan kaynakları birimlerinin organizasyon içindeki etki alanları ve stratejik önemleri artmıştır (Chang & Huang, 2005). En eski stratejik İKY çalışması olarak kabul edilen makalesinde Tichy, vd. (1982) örgütsel performansın yönlendirilmesinde insan kaynakları birimlerinin rolünü savunmuştur. Bu çalışmada insan kaynakları faaliyetlerinin, bireysel performans ve dolayısıyla verimlilik ve örgütsel performans üzerinde etkili olduğunu ve etkili stratejik yönetimin etkin insan kaynakları yönetimi gerektirdiğini belirtmiştir. Yeni rekabet şartları kapsamında proaktif bir yaklaşımı zorunlu kılan insan kaynakları yönetimi süreçlerinin stratejik bir boyut kazanmasıyla, yetenek yönetimi uygulamalarının ortaya çıktığı görülmektedir (Olsen, 2000; Heinen&O'Neill, 2004).

Bu çalışmada yetenek yönetimi uygulamalarının ve kurumsal girişimcilik faaliyetlerinin örgütsel performans ile ilişkisi üzerine yapılan çalışmalara yeni bir bakış açısı katabilmek hedeflenmiştir. Literatürde, yetenek yönetimi ve örgütsel performans ilişkisi çeşitli araştırmalarda incelenmiştir. Yetenek yönetimi alanındaki ampirik araştırma eksikliği (Dries, 2013) açısından düşünüldüğünde, bu makalede yapılan araştırma örneklem büyüklüğü ve kullanılan istatistiksel yöntemler açısından da literatüre değer ve yeni bir bakış açısı katacaktır. Gerçekleştirilen literatür araştırmasında yetenek yönetimi uygulamalarının örgütsel performans ilişkisinde kurumsal girişimciliğin aracılık etkisi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, Türkiye'deki kurumsal büyük şirketlerin yetenek yönetimi uygulamalarının kurumsal girişimcilik aracılık etkisi üzerinden örgüt performansı ile ilişkisi araştırılmıştır. Çalışma bu şirketlerin insan kaynakları ve diğer bölüm yöneticilerinin değerlendirmeleriyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki ana araştırma sorusu esas alınmıştır: (a) Yetenek yönetimi uygulamaları kurumsal girişimcilik faaliyetlerini ve örgüt performansını nasıl etkilemektedir? (b) Kurumsal girişimcilik, YY ve örgütsel performans ilişkisine nasıl aracılık etmektedir? 4 bölümden oluşan bu makalede; giriş bölümünün ardından yetenek yönetimi uygulamaları, kurumsal girişimcilik ve örgüt performansına ilişkin literatür araştırmasına yer verilmiştir. Bu bölümde kavramsal çerçeve ışığında bu değişkenlerin arasındaki ilişkiler ele alınmakta ve geliştirilen araştırma hipotezleri tartışılmaktadır. Araştırma metodolojisi ve analizi 3. bölümde özetlenmiştir. Son olarak, sonuç, teorik katkılar, yönetsel çıkarımlar için öneriler bölüm 4'te sunulmuştur.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kavramsal Çerçeve ve Hipotez Geliştirme

2.1.1. Yetenek Yönetimi

"Yetenek savaşı" tanımı ilk kez 1997 yılında prestijli danışmanlık şirketi McKinsey & Company tarafından kullanılarak kurumsal dünyaya kazandırılmıştır. Bu kavramsal çıkışın ardından yetenek yönetimi uygulamalarının şirketlerin insan kaynakları yönetimi içindeki yeri ve önemi giderek artmıştır (Chambers, vd., 1998).

Yetenek yönetiminin tanımından önce "yetenek" tanımını yapmak faydalı olacaktır. McKinsey danışmanlık firmasının yetenek tanımı... "bir kişinin yeteneklerinin toplamıdır. Bu yetenekler; bireyin içsel yeteneklerini, becerilerini, bilgisini, deneyimini, zekâsını, yargısını, tutumunu, karakterini, azmini ve aynı zamanda öğrenme ve gelişme isteğini içerir" (Michaels vd., 2001).

Çoğu büyük uluslararası şirket yeteneği hem mevcut yüksek performans hem de gelecek potansiyeli sergileyen çalışanlar olarak tanımlamaktadır: "Yetenekler, mevcut pozisyonlarında yüksek performans gösteren ve sürekli gelişen çalışanlardır, hareketlidirler ve diğer kilit pozisyonlarda olanlardan daha fazla gelişme potansiyeli ve isteğine sahiptirler" (Mäkelä, vd., 2010).

Yetenekli bireylerin sahip olduğu stratejik değer ve benzersizlik, yenilik ve rekabet avantajı kaynağı olarak kabul edilmektedir. Lepak & Snell (1999), bir organizasyonun insan sermayesini iki boyutta kategorize etmektedir: değer ve benzersizlik. Değer, organizasyonun temel yetkinliklerine katkıda bulunmak için sahip olduğu insan sermayesinin potansiyeli ve rekabet avantajını artırmayı ifade ederken, benzersizlik boyutu; organizasyonun insan sermayesinin değiştirilmesinin zor olacağı, rakipler tarafından kolayca kopyalanması zor insan kaynağı anlamını taşımaktadır. Bu tanımlama, stratejik insan kaynakları yönetimi anlayışını açıklayan kaynak temelli görüşün de esas aldığı, insan kaynağı ile elde edilen sürdürülebilir rekabet avantajının organizasyona özgü, taklit edilemez, ikamesi mümkün olmayan değerli kaynaklardan biri olarak görülmesi ile örtüşmektedir (Barney, 1991; Becker, 1998).

Yetenek yönetiminin, şirketlerin pratik uygulama esasları ışığında literatürde farklı bakış açıları ile oluşturulmuş tanımları yer almaktadır. Olsen (2000), “Bir şirketin geleneksel departman odaklı işe alım sürecinin organizasyonun bütününe odaklanmış yeteneği çekme ve elde tutma çabasına dönüştürülmesi” olarak tanımlamaktadır. İnsan kaynakları yönetimi, bir organizasyonun tüm çalışanlarını kapsamına alırken, yetenek yönetimi özel havuzlar, yüksek potansiyelli çalışanlar, organizasyona değer katan kilit pozisyonlar veya uygulamalara odaklanır (Sparrow&Makram, 2015). Yetenek yönetimi organizasyon içindeki kilit rollerin ve çalışanların değerini ve katkılarını göz önünde tutar, destekleyici İKY politikaları ve uygulamaları geliştirir (Sparrow & Makram, 2015; De Vos & Dries, 2013).

Yetenek yönetimi, mevcut ve gelecekteki iş ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli becerilere ve yeteneğe sahip kişileri çekmek, geliştirmek, elde tutmak ve verim sağlamaya yönelik süreçleri geliştirerek çalışan üretkenliğini artırmak için tasarlanmış bütünleşmiş insan kaynakları yönetimi stratejilerinin uygulanması olarak tanımlanabilir (Kontoghiorges & Frangou, 2009). Yetenek yönetimi, organizasyonun genel performansı üzerinde önemli etkileri olan kilit pozisyonlar için yetkin ve kendini işine adanmış çalışanları en uygun şekilde seçmek, yerleştirmek, geliştirmek ve elde tutmak için ortaya konan organize çabalar olarak da adlandırılmaktadır (Chadee&Raman, 2012). Yetenek yönetimi sadece teorik bir kavram olmanın ötesinde ele alınmalıdır; özellikle organizasyondaki liderler düşünme şekillerini yetenek yönetimi uygulamalarını tartışmaktan öteye geçirip, karar verme süreçlerine ve

stratejik uygulama alanlarına nasıl entegre edeceklerine odaklanmaları gerekmektedir. (Al Aina & Atan, 2020).

2.1.2. Kurumsal Girişimcilik ve Örgütsel Performans İlişkisi

Kurumsal girişimcilik, son yıllarda organizasyonların yenilik yaratma ve günümüzün dünyasında rekabetle etkili bir şekilde başa çıkma çabalarını kolaylaştırabilecek güçlü bir strateji aracı olma yolunda çok gelişmiştir. Ireland vd. (2009) bugünün ve geleceğin inovasyona dayalı rekabet avantajlarını geliştirmek için, kurumların kurumsal girişimciliğe daha fazla güvendiklerini vurgulamaktadır.

Genellikle büyüme ve karlılık açısından başarılı organizasyonel sonuçlar, organizasyonlardaki girişimciliğin bir sonucu olduğunu ve kurumsal girişimciliğin başarılı organizasyonların bir parçası olduğunu düşündürmüştür (Covin & Slevin 1991; Pinchot 1985). Kurumsal girişimcilik, kuruluşların büyümesini ve karlılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Pinchot, 1985). Literatür çalışmaları kurumsal girişimcilik ve ekonomik gelişme/kalkınma arasındaki ilişkiyi desteklemiştir. Yeni ürün geliştirme veya yeni pazarlara girme girişimciliğin sonucudur ve bu sonuçların şirketin performansı üzerinde doğrudan etkisi vardır ve şirkete rekabet avantajı sağlar. Girişimci organizasyonların yenilikçi, proaktif ve risk almaya teşvik edilmesini destekleyen bir kültüre ve işleyişe ihtiyacı vardır. Kültürün ve yönetim desteğinin kurumsal girişimciliğin örgüt performansına etkisinde rolü de çalışmalarda doğrulanmıştır (Fis&Cetindamar, 2021). Yeni ürünler, hizmetler ve pazara giriş yaratma, yeni ve belirsiz ürünleri, hizmetleri ve pazarları test etmek için pazar beklentilerini teşvik etme istekliliği girişimci işletmelerin karakteristik özellikleridir (Rauch vd., 2009). İnovasyon, yeni ürünler ve hizmetler sunma süreci olarak tanımlanan girişimciliğin özüdür. İnovasyon, işletmelerin performansını etkileyebilir ve onlara rekabet üstünlüğü sağlayabilir.

Zahra (1993 ve 1995) çalışmalarında büyük organizasyonların karlılığı ile kurumsal girişimcilik arasındaki olumlu etkileri göstermektedir. Ayrıca Antoncic (2001) tarafından küçük, orta ölçekli şirketlerde pozitif kurumsal girişimcilik-karlılık ve büyüme korelasyonu tespit edilmiştir. Literatür kurumsal girişimciliğin organizasyonun performansında önemli bir rol oynadığını göstermektedir, çünkü organizasyonlar kurumsal girişimciliğe finansal ve stratejik nedenlerle başvurur. Kurumsal girişimciliğin satış gelirleri, varlıkların getirisi ve karlılıkta büyüme gibi somut performans göstergelerini içeren finansal sonuçlara olan etkileri araştırılmıştır (Zahra & Covin 1995; Zahra vd., 2000).

Literatürde algılanan finansal olmayan performans (örneğin müşteri ve çalışan memnuniyeti – Ağca vd., 2012) ve/veya algılanan finansal performans (örneğin, kurumun rakiplerine kıyasla algılanan karlılık – Şimşek&Heavey, 2011) gibi öznel performans esas alan çalışmalar da mevcuttur. Bierwerth vd. (2015) yaptıkları meta analizde, kurumsal girişimciliği üç boyutuyla ele almış (inovasyon, stratejik yenilenme ve yeni iş girişi) ve bu üç boyutun öznel performans sonuçlarının nesnel performans sonuçlarına göre ilişkisinin daha güçlü olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada da esas alınan kurumsal girişimcilik ilişkili faaliyetler dört boyutta sınıflandırılabilir: yeni iş girişi, inovasyon, stratejik yenilenme ve proaktif olma. *Yeni iş girişi* boyutu, kurumsal girişimciliğin en belirgin özelliğidir çünkü mevcut organizasyonun içinde şirketin ürünlerini veya hizmetlerini yeniden tanımlayarak ve/veya yeni pazarlar geliştirerek (Zahra 1991) yeni bir iş girişiminin yaratılmasıdır. Buna karşılık, *inovasyon* boyutu ürün ve hizmet inovasyonuna atıfta bulunmaktadır. Teknolojide gelişim ve yeniliğe vurgu yaparak yeni ürün ve teknoloji geliştirme ve iyileştirmeleri içerir (Covin&Slevin, 1991; Knight, 1997 ve Zahra, 1993). *Stratejik yenilenme* boyutu, organizasyonların iş konsepti, yeniden yapılanma ve sistemsel değişim ve dönüşümleri ve yeni bir stratejik yönü yansıtmaktadır (Guth & Ginsberg 1990; Zahra 1991). Dördüncü boyut ise organizasyonun duruşu ile ilgilidir. *Proaktif olma*, deneyler yaparak risk almaya meyilli olmak demektir (Stopford&Baden-Fuller, 1994). Proaktif olan organizasyonlar inisiyatif alır (Lumpkin & Dess, 1996) ve fırsatları takip etme konusunda cesur ve agresiftir (Covin&Slevin 1991). Sektöründeki rakiplerle agresif ve proaktif bir şekilde rekabet etme eğilimini yansıtmaktadır.

Sonuç olarak kurumsal girişimciliğin başarılı kuruluşlar için önemli bir faktör olduğu, büyüme ve karlılığın da kurumsal girişimciliğin önemli sonuçları olduğu söylenebilir (Alpkan vd., 2005). Yapılan araştırmalar kurumsal girişimciliğin şirketlerin performanslarını iyileştirmelerinde, sürdürülebilir bir rekabet avantajını kazanmalarında, stratejik olarak yenilenmelerinde önemli katkılar sunan ve değer yaratan bir süreç olduğunu göstermektedir. Ayrıca, kurumsal girişimcilik uygulamalarının kuruluşların finansal performansı üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir (Ocak&Ozturk, 2018, Ahmed, vd., 2020).

2.1.3. Yetenek Yönetimi ve Kurumsal Girişimcilik İlişkisi

Kurumsal girişimcilik ile ilgili literatür, bireyin girişimcilik sürecindeki öneminin altını çizmektedir. Bireyler, eylemlerini kolaylaştıran veya sınırlayan karmaşık bir örgütsel çerçeve içinde hareket ederler (Covin & Miles, 1999). Şirketler bu örgütsel çerçeveyi, çalışanlarının becerilerini geliştirmek için insan kaynaklarına yatırıma ağırlık veren uygulamaları hayata geçirerek yaratabilirler.

Çalışanların yaratıcılık, değişim esnekliği, risk alma gibi beceri seviyeleri geliştikçe, inovasyona katılma bilgi ve kapasiteleri de artmaktadır. (Schuler, 1986). Bu da kurumsal girişimciliği teşvik edecek ve şirketlerin performansını olumlu yönde etkileyecektir.

Şirketler, rekabet avantajlarını sürdürmek ve hızla değişen bir ortamda hayatta kalabilmek için sürekli olarak yeni ürün veya hizmetler sunmaya ihtiyaç duyarlar. Kurumsal girişimcilik organizasyonların küresel rekabetin gerçekleriyle başa çıkmalarına yardımcı olabilecek önemli bir stratejidir (Kurtako vd., 2015). Yönetimin tüm fonksiyonları bu stratejik yaklaşım benimsenerek dönüştürülebilir (Govindarajan&Trimble, 2005). Bu girişimci liderlikle, organizasyonda inovasyon mümkün kılınabilir (Kurtako vd., 2015). Bu nedenle, inovasyon örgütsel başarı için çok önemli bir faktördür. Yetenek yönetimi uygulamaları da organizasyonel inovasyonu olumlu yönde etkilemektedir. Bunda yetenekli çalışanların yeni bilgi yaratma ve üretme potansiyellerinin daha yüksek olmasının etkisi vardır (Son, vd., 2020). İnsan kaynakları yönetimi kurumsal girişimcilik faaliyetlerini etkileyen yönetsel karar alanlarından birisidir ve kurumsal girişimcilik açısından oldukça önemli bir öncül olarak kabul edilmektedir. İKY ile ilişkili politikalar örgütsel seviyedeki girişimciliği ve yeniliği sistematik bir şekilde destekler ve kolaylaştırır (Schuler, 1986)

İnsan kaynakları yönetimi, kuruluşun felsefelerinin, politikalarının, uygulamalar ve süreçlerin tasarımı ve uygulanmasıdır (Jackson, vd., 2014). Bu bakış açısı, organizasyonun iyi bir sistem ve örgüt iklimi oluşturmak ve çalışanların yenilikleri sağlayacak yeni fikirler üretmeye teşvik etmek yönündeki isteğini yansıtır. Genel olarak, kurumsal girişimcilik çabaları pratik değere sahip olduklarında performansın artmasına neden olur. Girişimcilik faaliyetlerinde bulunan kuruluşların bulunmayan kuruluşlara göre daha yüksek büyüme ve karlılık düzeylerine ulaşmaları beklenir (Antoncic& Hisrich, 2001).

Şirketlerin rekabet avantajı elde etmesi ve bu rekabet üstünlüklerini sürdürülebilir şekilde devam ettirebilmeleri için önemi giderek daha net şekilde

anlaşılan kurumsal girişimcilik ve yetenek yönetimi uygulamaları bu kapsamda pek çok araştırmanın da ana odağını oluşturmaktadır. Bu uygulamalara bağlı olarak orta ve uzun vadede rekabet avantajı sağlayan şirketlerin bunun bir sonucu olarak finansal performanslarını da arttırması beklenen bir durum olacaktır. Yetenek yönetiminin (YY) örgüt performansı için önemini ve YY'nin İKY uygulamaları ve İKY stratejisi ile nasıl bağlantılı olduğu da çeşitli çalışmalarda ortaya konulmuştur (Glaister vd., 2018). Literatürde yetenek yönetimi ve performans ilişkisini inceleyen çok sayıda araştırma mevcutken, bu kapsamda kurumsal girişimcilik ve yetenek yönetimi ilişkisini diğer bir deyişle yetenek yönetimi uygulamalarının kurumsal girişimciliğin önceli olarak incelendiği araştırmalar çok kısıtlı sayıda kalmıştır. Yetenek yönetimi alanı araştırmacıların dikkatini çekmesine ve son dönemde daha fazla çalışma üretilmiş olmasına rağmen ilginin daha da büyüyen bir durumda olması gerektiği görüşü mevcuttur (Gallardo-Gallardo vd., 2015)

Ratten & Ferreira (2016), yaptıkları çalışmada yetenek yönetimi ve kurumsal girişimcilik arasında teorik bağlantıyı ve ilişkiyi test eden istatistiksel modeller geliştirme ihtiyacını ortaya koyulmasının, organizasyon ve bireysel bazda çoklu analiz seviyeleri kullanılarak yetenek yönetimi ve kurumsal girişimciliğin algısının değerlendirilmesinin faydalı olacağını vurgulamışlardır.

H1: Yetenek yönetimi uygulamaları ve kurumsal girişimcilik arasında pozitif bir ilişki vardır.

2.1.4. Yetenek Yönetimi ve Örgüt Performansı İlişkisi

Günümüzün küresel koşullarında, yetenekleri çekmek, geliştirmek, motive etmek ve elde tutmak şirketler için kritik bir stratejik mesele olmaya devam etmektedir. Bu durum, organizasyonların sürdürülebilirliğini ve kendilerini geleceğe hazırlama becerilerini önemli derecede etkileme potansiyeline sahiptir. Yetenek yönetimi İKY uygulamalarıyla etkileşime giren, kurumun performansını etkileyen kritik bir aktarım mekanizması olarak görülür (Chowhan, 2016). Yetenek yönetimi insan kaynakları planlamasının ayrılmaz bir parçasıdır ve bir örgütün insan sermayesinin sürekliliğini sağlayarak yönetilmesine, o örgütün etkin stratejik yönetim sürecine önemli bir destek sağlar (Schutz & Carpenter, 2008).

Yetenek yönetiminin organizasyonlardaki öneminin artması ve organizasyonel performansa pozitif katkısının görülmeye başlanması sonucu yetenek yönetimi, stratejik insan kaynakları yönetimi alanında giderek daha fazla akademik çalışma yapılmasını da sağlamıştır (Gallardo-Gallardo & Thunnissen, 2016).

Hem şirketlerin kaynak temelli görüşü hem de insan sermayesi teorisi, kapsamlı İKY uygulamalarına yapılan yatırımların organizasyonun performansı ile olumlu bir şekilde ilişkilendirileceğini öne sürmektedir. 1990'lardan itibaren, Huselid (1995) ve MacDuffie (1995) gibi araştırmacılar insan kaynakları yönetimi ve performans arasındaki olumlu ilişkiyi kantitatif çalışmalarla kanıtlamışlardır.

Sonuç olarak, yetenek yönetimi (YY) teorileri, çalışanların yeteneklerini en üst düzeye çıkarmanın, sürdürülebilir bir rekabet avantajı kaynağı olduğu varsayımına dayanmaktadır (Scullion vd., 2015). Bu durum, YY'nin iş performansını arttırması ve şirketlerdeki insan kaynakları yönetimi (İKY) uygulamalarıyla kapsamlı bir şekilde bağlantılı hale gelmesiyle sonuçlanmıştır (Farndale vd., 2010)

H2: Yetenek yönetimi uygulamaları ve şirket finansal performansı arasında pozitif bir ilişki vardır.

2.1.5. Kurumsal Girişimciliğin Aracılık Rolü

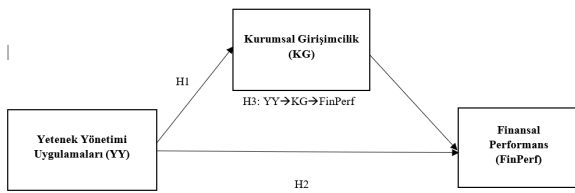
Kurumsal girişimcilik ve insan kaynakları uygulamaları arasındaki ilişkinin incelendiği araştırmalarda, kurumsal girişimcilik faaliyetleri için insan kaynakları yönetiminin önemli olduğu gösterilmiştir (Kuratko vd., 1990; Hayton, 2003; Zhang vd., 2008). Organizasyonların kurumsal girişimcilik faaliyetlerini geliştirmesi ve teşvik etmesi için insan kaynakları fonksiyonlarına önem vermesi ve uygulamalarını desteklemesi kritik hale gelmektedir.

Literatürde yetenek yönetimi uygulamaları ve organizasyonel performans arasındaki ilişkiyi araştıran birçok çalışma vardır, ancak YY ve organizasyonel performans arasındaki ilişkide kurumsal girişimciliğin aracılık etkisini inceleyen araştırma alanı, neredeyse yok gibidir. Bu aracılık etkisi yüksek performanslı İK uygulamaları ve organizasyonel performans arasındaki ilişki üzerinden ağırlıklı olarak çalışılmıştır (Hancı-Donmez&Karacay, 2019; Zhang vd., 2008). Literatürde, yetenek yönetimi ve örgütsel performans ilişkisinde yaratıcılık iklimi, bilgi yönetimi gibi değişkenler üzerinden aracılık rolü araştırmalarına rastlanmıştır (Bagorogoz&Nakasule, 2022; Ingram, 2016)

Yetenek yönetimi (YY) teorileri, çalışanların yeteneklerini en üst düzeye çıkarmanın, sürdürülebilir bir rekabet avantajı kaynağı olduğu varsayımına dayanmaktadır (Scullion vd., 2010). Bu rekabet avantajını sürdürülebilir kılmak için, kurumun en yetenekli çalışanları çekmesi, elde tutması ve yetkinliklerini geliştirmesi buna özel politikalar geliştirilmesine yönelik uygulamaları kapsayan YY'nin organizasyonun finansal performansına olan ilişkisinde kurumsal girişimciliğin aracılık etkisini araştırmak yeni bir bakış açısı katabilecektir.

H3: Yetenek yönetimi uygulamaları ve şirketin finansal performansı ilişkisinde kurumsal girişimciliğin aracılık rolü vardır.

Şekil 1'de önerilen kavramsal modelle yetenek yönetimi uygulamaları ve örgüt performansı arasındaki ilişkinin kurumsal girişimcilik aracılık etkisi üzerinden araştırılması amaçlanmaktadır. Kavramsal model, 3 değişkenden oluşmaktadır: Yetenek yönetimi uygulamaları, kurumsal girişimcilik ve finansal performans.



Şekil 1. Çalışmanın Kavramsal Modeli

2.2. Araştırmada Kullanılan Ölçekler

Yetenek yönetimi uygulamaları ölçeği: Şirketlerin yetenek yönetimi uygulamalarını değerlendirebilmek için 3 farklı kaynaktan sorular alınmıştır. Ankette yer alan ifadeleri ölçmek için katılımcılardan ifadelere katılma derecelerini belirten (1: Kesinlikle Katılmıyorum 2: Katılmıyorum 3: Ne Katılıyorum Ne Katılmıyorum 4: Katılıyorum, 5: Kesinlikle Katılıyorum) 5'li Likert ölçeğine ankette yer verilmiştir. Ölçek toplam 21 sorudan oluşmaktadır. Society for Human Resource Management aracılığıyla Shawn Fegley (2006) tarafından geliştirilen 16 soruluk Yetenek Yönetimi Uygulamaları Algısı Ölçeği kullanılmıştır. Kore Araştırma Enstitüsü'nün İnsan Sermayesi anketinde yer alan yetenek yönetimi ölçeğinden (Son, vd., 2020) 4 ilave soru ankete dahil edilmiştir. Erdoğan'ın (2018) "Örgüt kültürü, yetenek yönetimi ve çalışan sonuçları arasındaki ilişkinin incelenmesi: Türkiye'de telekomünikasyon profesyonelleri üzerine bir çalışma" isimli doktora

tezinde geliştirilen yetenek yönetimi ölçeğinden de 1 soru ölçek kapsamına alınmıştır.

Kurumsal girişimcilik ölçeği: Kurumsal girişimciliğin dört boyutu olan; yeni iş girişimleri, inovasyon, stratejik yenilenme ve proaktif olma düzeylerini ölçmek için 18 sorudan oluşan bir ölçek kullanılmıştır. İlk 3 boyut için Zahra (1996)'dan 14 soru ve proaktif olma boyutu için de Knight (1997)'den da ENTRESALE ölçeğinden 4 soru ile kurumsal girişimcilik ölçeğine ankette yer verilmiştir.

Finansal performans ölçeği: Bu ölçek kapsamında, performansı ölçmek için katılımcılara kendi şirketlerini nasıl gördüklerini sorarak benimsenen performans ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ankete katılımcıların şirketleri için son 3 yıldaki performansı üzerinden algıları sorulmuştur. Şirket finansal performansı boyutları ile ilgili ifadeler için uygulanan değerlendirme seçenekleri şu şekildedir: 1- Yetersiz, 2- Ortalamanın altı, 3- Ortalama, 4- Ortalamanın Üstü ve 5- Yüksek. (Alpkan vd., 2005)

2.3. Veri Toplama ve Örneklem

Bu araştırmada kullanılan anket, çevrimiçi olarak çeşitli sektörlerde görev yapan insan kaynakları ve orta kademe fonksiyon yöneticileri ile paylaşılmıştır. 2019 İstanbul Sanayi Odası (İSO) 500 listesinde yer alan şirketler, halka açık olan şirketler ve Kincentric 2019 En İyi İşveren listesinde yer alan şirketlerin arasından seçilen şirketlerde çalışan katılımcılara anketler gönderilmiştir. Anket Türkçe olarak uygulanmıştır. Anketin İngilizce versiyonunu Türkçe'ye profesyonel çeviri hizmeti yapan tercümanlar tarafından çevrilmiştir. Daha sonra geleneksel İngilizce geri çeviri sürecini takiben doğruluğu kontrol edilmiştir. Geri çeviri, bir anket yapılmadan önce yanlış anlamaları ve yanlış yorumlamaları belirlemek için faydalı bir süreçtir (Brislin, 1980). Anket Aralık 2021-Mart 2022 tarihleri arasında uygulanmıştır. Anket formları araştırmanın örneklemini oluşturan hedef kitleye çevrimiçi bir anket sitesi olan SurveyMonkey anket bağlantısı olarak gönderilmiştir. Ana uygulamaya geçilmeden önce anket farklı sektörlerde faaliyet gösteren 16 şirkete gönderilmiştir. Bu şirketlerden gelen cevaplar SPSS programı üzerinde EFA yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda anketten bir soru çıkartılarak ankete son hali verilmiştir. Pilot anket çalışması sonrasında kapsam dahilinde olan şirketlerin insan kaynakları yöneticileri ile profesyonel iş ağı olan LinkedIn üzerinden iletişime geçilerek, anket paylaşılmıştır. İnsan kaynakları yöneticilerinin ankete katılımları sonrasında, ilgili şirketlerdeki müdür unvan grubundaki farklı

departman/fonksiyon yöneticileri ile iletişime geçilerek e-posta yoluyla anketler gönderilmiştir. Katılma onayı veren 1587 yöneticiye anket gönderilmiş, ankete toplamda 1029 cevap gelmiştir. Tamamlanmamış anketler çıkarıldığında ana saha uygulamasından 967 adet veri analize dahil edilmiştir. Pilot çalışmadan gelen 123 adet anket de araştırmaya dahil edildiğinde, tüm analizler 1090 cevap verisi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1'de ankete katılım sağlayan yöneticilere ve şirketlerine yönelik demografik bilgiler yer almaktadır.

III. BULGULAR

3.1. Verilerin Analizi

Veri analizi için en küçük kareler yapısal eşitlik modellemesi (PLS-SEM) tercih edilmiştir. Bu yöntem, bağımlı değişkenin R² değerini maksimize eden korelasyon katsayılarının tahminine dayanmaktadır. AMOS ve LISREL gibi kovaryans tabanlı SEM ile karşılaştırıldığında, PLS-SEM'in çok fazla varsayımı yoktur. Örneğin, PLS-SEM normal dağılım varsayımını gerektirmez ve küçük bir örneklemede etkili bir şekilde çalışabilir (Henseler, vd., 2009). Bu çalışmada PLS'in tercih edilmesinin birkaç nedeni vardır. İlk olarak, PLS açıklayıcı araştırma modellerini başarılı bir şekilde test eden, onaylayan ve tahmin odaklı araştırma için önemli bir istatistiksel araçtır (Henseler, vd., 2009). İkincisi, PLS, ölçüm hatalarını hesaba katar ve aracılık etkisini daha doğru tahminlemeyi sağlar (Chin, 1998). Ayrıca, son dönemde yapılan araştırmalarda kullanım sıklığının arttığı gözlemlenmektedir.

3.2. Ölçüm Modeli

Geçerlilik ve güvenilirlik analizleri SmartPLS kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm modeli, ölçeklerle gösterge değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösterir. Ölçüm modeli değerlendirmesinde faktör yükleri (< 0.60) olan göstergeler modelden çıkartılmıştır. Bu doğrultuda yapılan analizlerde; Tablo 2'de de görüldüğü üzere Yetenek Yönetimi ölçeğinden YY3 ve YY10 değişkenleri, kurumsal girişimcilik ölçeğinden de KG10_YGir5 ve KG11_StrYen1 değişkenleri faktör yüklerinin düşük olması nedeniyle ölçüm modelinden çıkartılmıştır. Bu adımdan sonra, yakınsak güvenilirlik değerlerine baktığımızda tüm değerlerin eşik değer olan 0.7'nin üzerinde olduğu görülmektedir. (Ringle, vd., 2020). AVE değeri 0.50'den büyük olmalıdır. Çalışmada elde edilen AVE değerlerinin 0.544 ile 0.784 arasında olduğu görülmektedir. Son olarak, yakınsak geçerliliği değerlendirmek için faktör

yüklerinin önemi incelenmiştir. Faktör yükünün anlamlılığını değerlendirmek için bootstrap yaklaşımı kullanılmış ve faktör yüklerinin t değerleri p<0.05 düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Bu sonuçlara göre yakınsak geçerliliğin sağlandığı söylenebilir.

Tablo 1. Katılımcıların Tanımlayıcı İstatistikleri

Özellikler	Kişi Sayısı	%
Sektör		
Üretim Sektörü Şirket Sayısı	233	82.6
Hizmet Sektörü Şirket Sayısı	49	17.4
Sermaye Yapısı		
Türk	683	62.7
Yabancı	188	17.2
Türk-Yabancı Ortaklık	217	19.9
Kamu	2	0.2
Halka Açıklık Durumu		
Halka Açık	510	46.8
Halka Açık Değil	580	53.2
Çalışan Sayısı		
≤249	53	4.9
250-499	64	5.9
500-999	195	17.9
1000-4999	517	47.4
5000-10000	132	12.1
>10000	129	11.8
Eğitim Düzeyi		
Lise	5	0.5
Lisans	535	49.1
Yüksek Lisans	514	47.2
Doktora	32	2.9
Belirtmek İstemeyen	4	0.4
Çalıştığı Departmanı		
İnsan Kaynakları	308	28.3
Diğer Fonksiyonlar (Ar-Ge, Üretim, Satış, vb.)	782	71.7
Pozisyonu		
Müdür		
Yardımcısı/Yönetici/Müdür	958	87.9
Direktör/GMY/GM	98	9.0
Diğer	34	3.1
Cinsiyet		
Kadın	442	40.6
Erkek	644	59.1
Belirtmek İstemeyen	4	0.4
N	1090	

Tablo 2. Doğrulayıcı Faktör Analizi

	Faktör Yükleri (CFA)	t istatistiği **	Alfa	CR	AVE	Rho_A***
YY1	0.705	30.256				
YY2	0.699	36.016				
YY3*						
YY4	0.678	31.987				
YY5	0.742	41.746				
YY6	0.748	45.580				
YY7	0.686	34.493				
YY8	0.738	43.678				
YY9	0.688	34.420				
YY10*						
YY11	0.771	51.068	0.953	0.935	0.544	0.955
YY12	0.690	41.253				
YY13	0.780	52.681				
YY14	0.803	69.460				
YY15	0.657	32.402				
YY16	0.810	69.453				
YY17	0.712	40,187				
YY18	0.800	62.44				
YY19	0.666	31.024				
YY20	0.780	63.838				
YY21	0.823	72.855				
KG1_İnov1	0.812	60.346				
KG2_İnov2	0.824	67.703				
KG3_İnov3	0.792	54.055	0.881	0.913	0.677	0.883
KG4_İnov4	0.838	77.016				
KG5_İnov5	0.847	83.925				
KG6_YGir1	0.768	49.041				
KG7_YGir2	0.614	26.684				
KG8_YGir3	0.788	44.910	0.731	0.834	0.559	0.735
KG9_YGir4	0.804	58.393				
KG10_YGir5*						
KG11_StrYen1*						
KG12_StrYen2	0.724	31.436	0.741	0.854	0.662	0.747
KG13_StrYen3	0.849	72.639				
KG14_StrYen4	0.860	66.025				
KG15_Proak1	0.797	59.987				
KG16_Proak2	0.836	69.941	0.859	0.904	0.703	0.859
KG17_Proak3	0.865	86.752				
KG18_Proak4	0.853	74.895				
PERF2_Fin1	0.874	83.578				
PERF3_Fin2	0.848	63.646	0.910	0.935	0.784	0.934
PERF4_Fin3	0.918	114.168				
PERF5_Fin4	0.901	86.954				

* Faktör yükleri doğrulayıcı faktör analizinde düşük çıktığı için ölçekten çıkarılmıştır. ** Tüm değerler 0.000 düzeyinde anlamlıdır. ***Bazı yazarlar tarafından Alpha değerine alternatif olarak sunulan rhoA için kritik değer 0,70'dir (Henseler vd., 2016). Tablodaki tüm rhoA değerlerinin eşik değeri aştığı görülmektedir.

Ayrışma geçerliliği, kurulan modeldeki değişkenlerin birbirine benzememesi, aralarında düşük bir korelasyon olmasını gerektirir. Bu çalışmada ayrışma geçerliliğini değerlendirmek için iki araç kullanılmıştır. İlk olarak Fornell-Larcker kriteri dikkate alınmıştır. Tablo 3, her bir değişkenin AVE değerinin

karekökünün (köşegen elemanlar), yapılar arasındaki korelasyon katsayılarından daha yüksek olduğunu ve bu kritere göre ayrışma geçerliliği sağlandığını göstermektedir. Ayrışma geçerliliğini test etmek için kullanılan bir diğer yöntem Heterotrait-Monotrait (HTMT) oranıdır. İki faktörü net bir şekilde ayırt

edebilmek için bu oranın 1'den önemli ölçüde küçük olması gerekir (Henseler, vd, 2016). Henseler vd. (2015), bu oranın 0,85'ten küçük olması durumunda ayırt edici geçerliliğin sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Tablo 4'teki HTMT oranlarına bakıldığında, tüm değerlerin 0,85'ten küçük olduğu ve bu nedenle ayırt edici geçerliliğin elde edildiği görülmektedir.

Tablo 3. Ayırışma Geçerliliği (Fornell-Lacker Kriteri) ve Korelasyon

	YY	KG_İnov	KG_Proak	KG_StrYen	KG_YGir	FinPerf
YY	0.738*					
KG_İnov	0.356	0.823*				
KG_Proak	0.467	0.486	0.838*			
KG_StrYen	0.496	0.383	0.594	0.813*		
KG_YGir	0.250	0.525	0.469	0.359	0.747*	
FinPerf	0.161	0.287	0.320	0.184	0.276	0.885*

* Köşegen elemanlar AVE'nin kareköküdür.

Tablo 4. Ayırışma Geçerliliği (Heterotrait-Monotrait Oranı)

	YY	KG_İnov	KG_Proak	KG_StrYen	KG_YGir	FinPerf
YY						
KG_İnov	0.385					
KG_Proak	0.510	0.553				
KG_StrYen	0.583	0.472	0.745			
KG_YGir	0.295	0.652	0.591	0.491		
FinPerf	0.163	0.309	0.346	0.212	0.334	

3.3. Analiz Sonuçları

Yapısal modeli test etmek için SmartPLS programının bootstrap yönteminden yararlanılmıştır. Modelin güvenilirlik ve geçerlilik sorunu olmadığından emin olduktan sonra R^2 ve Q^2 değerleri hesaplanarak yapısal model değerlendirilmiştir. Tablo 5, R^2 ve Q^2 'nin katsayılarını göstermektedir. R^2 değeri tahmin doğruluğu ile ilişkilidir ve dışsal değişken(ler) tarafından açıklanan içsel değişkendeki varyansa bakılmaktadır. Kurumsal girişimciliğin 4 boyutu ve finansal performans değişkenlerinin R^2 değerleri sırasıyla 0.670, 0.692, 0.499, 0.533 ve 0.123 olarak hesaplanmıştır. Chin (1998) R^2 'nin açıklama gücünü

küçük 0.19, orta 0.33 ve büyük 0.67 olarak sınıflandırır. Bu sınıflandırmaya göre kurumsal girişimciliğin inovasyon ve proaktif olma boyutları yüksek, stratejik yenilenme ve yeni iş girişimleri boyutları orta düzeyde, finansal performans ise düşük düzeydedir. Q^2 değeri, bir modelin öngörücü önemi olup olmadığını belirlemeye yardımcı olur. Blindfold işlemi sonucunda Q^2 değerleri, kurumsal girişimcilik boyutları ve finansal performans değerleri sırasıyla 0.449, 0.479, 0.325, 0.290 ve 0.089 olarak bulunmuştur. Modelin Q^2 değerlerinin sıfırdan büyük olması, araştırma modelinin kestirimci (tahmin edici) ilgililik özelliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. R^2 ve Q^2

	R^2	R^2 düzeltilmiş	Q^2
KG_İnov	0.670	0.669	0.449
KG_Proak	0.692	0.692	0.479
KG_StrYen	0.499	0.498	0.325
KG_YGir	0.533	0.533	0.290
FinPerf	0.123	0.121	0.089

Tablo 6'da ilişkilerin standardize edilmiş katsayıları (β -değerleri), bootstrap yaklaşımıyla hesaplanan t-değerleri ve etki büyüklüğü (f^2) değerleri gösterilmektedir. Tablo 7, Yetenek Yönetimi değişkeninin kurumsal girişimcilik üzerinde pozitif ve anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir

($\beta=0.503$; $t=18.407$). Ancak yetenek yönetimi ve finansal performans değişkenleri arasında pozitif ve anlamlı bir etki tespit edilmemiştir ($\beta=-0.021$; $t=0.614$).

Sonuç olarak H1 hipotezi desteklenirken H2 hipotezi desteklenmemektedir.

Tablo 6. Direkt İlişki Sonuçları

Hipotez	β	t-değeri	P değeri	f^2	Sonuç
H1 YY – KG	0.503	18.407	0.000	0.000	Destekleniyor
H2 YY – FinPerf	-0.021	0.614	0.539	0.841	Desteklenmiyor

Son olarak çalışmada kurumsal girişimciliğin aracılık etkisi test edilmiştir. Aracılık etkilerini test etmek için Memon vd. (2018) tarafından önerildiği gibi spesifik indirekt etki sonuçları kullanılmıştır. Tablo 7, aracı değişken için bootstrap yaklaşımıyla elde edilen spesifik indirekt etkileri göstermektedir. Görüldüğü gibi,

Yetenek Yönetimi → Kurumsal girişimcilik → Finansal Performans aracılık etkisine ilişkin değerler anlamlıdır, ($\beta=0.181$; $t=9.056$; $p=0.000$).

Bu sonuçlar, kurumsal girişimciliğin yetenek yönetimi uygulamaları ve finansal performans arasındaki ilişkiye tam olarak aracılık ettiğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, H3 hipotezi desteklenmektedir.

Tablo 7. Aracılık Test Sonuçları

Hipotez	Spesifik İndirekt Etki	t istatistiği	P değeri	Sonuç
H3 YY – KG – FinPerf	0.181	9.056	0.000	Destekleniyor

IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüzün karmaşık ve belirsiz koşullarında organizasyonların ayakta kalabilmesi giderek zorlaşmaktadır. Bu çalışmada stratejik insan kaynakları yönetiminin öne çıkan fonksiyonu yetenek yönetimi uygulamalarının örgütün finansal performans ilişkisinde kurumsal girişimciliğin aracılık etkisi araştırılmıştır. Bu doğrultuda bu makalede yetenek yönetimi, kurumsal girişimcilik ve örgütün finansal performansı kavramları tartışılmıştır.

Bu çalışmada, sonuçlar yetenek yönetimi uygulamalarının kurumsal girişimciliği olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Kurumsal girişimcilik ile ilgili literatür, çalışanın girişimcilik sürecindeki önemini vurgulamaktadır (Covin & Miles, 1999). Yüksek potansiyelli çalışanların organizasyonlara çekilmesi, yetkinlik ve becerilerinin geliştirilmesi şirketlere rekabet avantajı sağlar. Yetenek olarak tanımlanan çalışanlar organizasyonların performansına katkı yaratan fark yaratan çalışanlardır. Bu nedenle insan kaynakları yönetiminde yetenek yönetimi uygulamaları geliştirilmelidir. Şirketin hedeflerine

ulaşmasını sağlayacak gerekli ihtiyaçları karşılamak için gereken beceri ve yetkinlikte olan insanların şirkete çekilmesi, işe alınması, geliştirilmesi ve elde tutulması için bütünlük bir yaklaşımla yetenek yönetimi süreçleri yönetilmelidir. Bu çalışmada, yetenek yönetimi uygulamalarının finansal performans üzerinde doğrudan bir etkisi tespit edilemese de dolaylı etkiler ortaya çıkmıştır. Yetenek yönetiminin finansal performans üzerinde dolaylı bir etkisi vardır ve bu etki kurumsal girişimcilik aracılığıyla görülmektedir. Dolayısıyla, yetenek yönetiminin finansal performans arasındaki ilişki tamamen kurumsal girişimcilik tarafından aracılık edilir ve buna bağlıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Ağca, V., Topal, Y., & Kaya, H. (2012). Linking intrapreneurship activities to multidimensional firm performance in Turkish manufacturing firms: an empirical study. *International Entrepreneurship and Management Journal*, 8, 15-33.

- [2] Ahmed, U., Umrani, W. A., Zaman, U., Rajput, S. M., & Aziz, T. (2020). Corporate entrepreneurship and business performance: The mediating role of employee engagement. *SAGE Open*, 10(4), 2158244020962779.
- [3] Al Aina, R. & Atan, T. (2020). The impact of implementing talent management practices on sustainable organizational performance. *Sustainability*, 2020, 12
- [4] Alpkın, L., Ergun, E., Bulut, C., & Yılmaz, C. (2005). Effects of corporate entrepreneurship on corporate performance. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6(2), 175-189.
- [5] Antoncic, B., & Hisrich, R. D. (2001). Intrapreneurship: Construct refinement and cross-cultural validation. *Journal of Business Venturing*, 16(5), 495-527.
- [6] Bagorogoza, J. K., & Nakasule, I. (2022). The mediating effect of knowledge management on talent management and firm performance in small and medium enterprise in Uganda. *Journal of Management Development*, 41(6), 349-366.
- [7] Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120.
- [8] Becker, B. E. (1998). High performance work systems and firm performance: A synthesis of research and managerial implications. *Research in Personnel and Human Resources Management*, 16, 53-101.
- [9] Bierwerth, M., Schwens, C., Isidor, R., & Kabst, R. (2015). Corporate entrepreneurship and performance: A meta-analysis. *Small Business Economics*, 45, 255-278.
- [10] Brislin, R. W. (1980). Translation and content analysis of oral and written materials. *Methodology*, 389-444.
- [11] Chadee, D., & Raman, R. (2012). External knowledge and performance of offshore it service providers in India: the mediating role of talent management. *Asia Pacific Journal of Human Resources*, 50(4), 459-482.
- [12] Chambers, E., Foulon, M., Handfield-Jones, H., Hankin, S. M., & Michaels III, E. G. (1998). The War for Talent. *McKinsey Quarterly* 3: 44-57.
- [13] Chang, W. J. A., & Huang, T. C. (2005). Relationship between strategic human resource management and firm performance: A contingency perspective. *International Journal of Manpower*, 26(5), 434-449.
- [14] Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. *Modern Methods for Business Research*, 295(2), 295-336.
- [15] Chowhan, J. (2016). Unpacking the black box: understanding the relationship between strategy, HRM practices, innovation and organizational performance. *Human Resource Management Journal*, 26(2), 112-133.
- [16] Collings, D. G., Scullion, H., & Vaiman, V. (2015). Talent management: Progress and prospects. *Human Resource Management Review*, 25(3), 233-235.
- [17] Covin, J. G., & Slevin, D. P. (1991). A conceptual model of entrepreneurship as firm behavior. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 16(1), 7-26.
- [18] Covin, J. G., & Miles, M. P. (1999). Corporate entrepreneurship and the pursuit of competitive advantage. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 23(3), 47-63.
- [19] De Vos, A., & Dries, N. (2013). Applying a talent management lens to career management: The role of human capital composition and continuity. *The International Journal of Human Resource Management*, 24(9), 1816-1831.
- [20] Dries, N. (2013). Talent management, from phenomenon to theory: Introduction to the Special Issue. *Human Resource Management Review*, 23, 267-271.
- [21] Erdoğan, M.E. (2018). Örgüt kültürü, yetenek yönetimi ve çalışan sonuçları arasındaki ilişkinin incelenmesi: Türkiye'de telekomünikasyon profesyonelleri üzerine bir çalışma, Yeditepe Üniversitesi / Sosyal Bilimler Enstitüsü / İşletme (İngilizce) Anabilim Dalı, 2018.
- [22] Fegley, S. (2006). 2006 talent management: survey report. Society for Human Resource Management.
- [23] Fis, A. M., & Cetindamar, D. (2021). Unlocking the relationship between corporate entrepreneurship and firm performance. *Entrepreneurship Research Journal*, 11(1), 20180213.
- [24] Gallardo-Gallardo, E., Nijs, S., Dries, N., & Gallo, P. (2015). Towards an understanding of talent management as a phenomenon-driven field using bibliometric and content analysis. *Human Resource Management Review*, 25(3), 264-279.
- [25] Gallardo-Gallardo, E., & Thunnissen, M. (2016). Standing on the shoulders of giants?

- A critical review of empirical talent management research. *Employee Relations*.
- [26] Glaister, A. J., Karacay, G., Demirbag, M., & Tatoglu, E. (2018). HRM and performance—The role of talent management as a transmission mechanism in an emerging market context. *Human Resource Management Journal*, 28(1), 148-166.
- [27] Govindarajan, V., & Trimble, C. (2005). Building breakthrough businesses within established organizations. *Harvard Business Review*, 83(5), 5868.
- [28] Guth, W. D., & Ginsberg, A. (1990). Guest editors' introduction: Corporate entrepreneurship. *Strategic Management Journal*, 5-15.
- [29] Hanci-Donmez, T., & Karacay, G. (2019). High-performance human resource practices and firm performance: mediating effect of corporate entrepreneurship. *International Journal of Organizational Leadership*, 8, 63-77.
- [30] Hayton, J. C. (2003). Strategic human capital management in SMEs: An empirical study of entrepreneurial performance. *Human Resources Management*, 42(4), 375-391.
- [31] Heinen, J. S., & O'Neill, C. (2004). Managing talent to maximize performance. *Employment Relations Today*, 31(2), 67.
- [32] Henseler, J., Ringle, C.M., Sinkovics, R.R., (2009). The use of partial least square path modeling in international marketing. *Advances in International Marketing*, 20, 277-319.
- [33] Henseler, J., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43, 115-135.
- [34] Henseler, J., Hubona, G., & Ray, P. A. (2016). Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 116(1), 2-20.
- [35] Huselid, M. A. (1995). The impact of human resource management practices on turnover, productivity, and corporate financial performance. *Academy of Management Journal*, 38(3), 635-672.
- [36] Huselid, M. A., Jackson, S. E., & Schuler, R. S. (1997). Technical and strategic human resources management effectiveness as determinants of firm performance. *Academy of Management Journal*, 40(1), 171-188.
- [37] Ingram, T. (2016). Relationships between talent management and organizational performance: The role of climate for creativity. *Entrepreneurial Business and Economics Review*, 4(3), 195-205.
- [38] Ireland, R. D., Covin, J. G., & Kuratko, D. F. (2009). Conceptualizing corporate entrepreneurship strategy. *Entrepreneurship Theory Practice*, 33, 19-46.
- [39] Jackson, S. E., Schuler, R. S., & Jiang, K. (2014). An aspirational framework for strategic human resource management. *Academy of Management Annals*, 8(1), 1-56.
- [40] Knight, G. A. (1997). Cross-cultural reliability and validity of a scale to measure firm entrepreneurial orientation. *Journal of Business Venturing*, 12(3), 213-225.
- [41] Kontoghiorghes, C., & Frangou, K. (2009). The association between talent retention, antecedent factors, and consequent organizational performance. *SAM Advanced Management Journal*, 74(1), 29.
- [42] Kuratko, D. F., Montagno, R. V., & Hornsby, J. S. (1990). Developing an intrapreneurial assessment instrument for an effective corporate entrepreneurial environment. *Strategic Management Journal*, 49-58.
- [43] Kuratko, D., Hornsby, J., & Hayton, J. (2015). Corporate entrepreneurship: The innovative challenge for a new global economic reality. *Small Business Economics*, 45, 245253.
- [44] Lepak, D. P., & Snell, S. A. (1999). The human resource architecture: Toward a theory of human capital allocation and development. *Academy of Management Review*, 24(1), 31-48.
- [45] Lumpkin, G. T., & Dess, G. G. (1996). Clarifying the entrepreneurial orientation construct and linking it to performance. *Academy of Management Review*, 21(1), 135-172.
- [46] MacDuffie, J. P. (1995). Human resource bundles and manufacturing performance: Organizational logic and flexible production systems in the world auto industry. *ILR Review*, 48(2), 197-221.
- [47] Mäkelä, K., Björkman, I., & Ehrnrooth, M. (2010). How do MNCs establish their talent pools? Influences on individuals' likelihood of being labeled as talent. *Journal of World Business*, 45(2), 134-142.
- [48] Memon, M.A., Cheah, J-H., Ramayah, T., Ting, H., Chuah, F. (2018). Mediation analysis issues and recommendations.

- Journal of Applied Structural Equation Modeling*, 2(1),i-ix.
- [49] Michaels, E., Handfield, H., Axelrod, J. B. (2001). *The War for Talent*. Boston: McKinsey & Company Inc., Harvard Business School Press.
- [50] Olsen, R. (2000). Harnessing the internet with human capital management. *Workspan*, 43(11), 24-27
- [51] Phan, P. H., Wright, M., Ucbasaran, D., & Tan, W. L. (2009). Corporate entrepreneurship: Current research and future directions. *Journal of business Venturing*, 24(3), 197-205.
- [52] Pinchot III, G. (1985). Intrapreneuring: Why you don't have to leave the corporation to become an entrepreneur. *University of Illinois at Urbana-Champaign's Academy for Entrepreneurial Leadership Historical Research Reference in Entrepreneurship*.
- [53] Ratten, V., & Ferreira, J. (2016). Global talent management and corporate entrepreneurship strategy. In *Global Talent Management and Staffing in MNEs* (Vol. 32, pp. 151-165). Emerald Group Publishing Limited.
- [54] Rauch, A., Wiklund, J., Lumpkin, G. T., & Frese, M. (2009). Entrepreneurial orientation and business performance: An assessment of past research and suggestions for the future. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 33(3), 761-787.
- [55] Ringle, C. M., Sarstedt, M., Mitchell, R., & Gudergan, S. P. (2020). Partial least squares structural equation modeling in HRM research. *The International Journal of Human Resource Management*, 31(12), 1617-1643.
- [56] Schuler, R. S. (1986). Fostering and facilitating entrepreneurship in organizations: Implications for organization structure and human resource management practices. *Human Resource Management*, 25(4), 607-629.
- [57] Schuler, R. S./Jackson, S. E./Storey, J. (2001): HRM and its link with strategic management. In: J. Storey (ed.): *Human Resource Management: A Critical Text*. London: Thomson Learning: 114-130.
- [58] Scullion, H., Collings, D. G., & Caligiuri, P. (2010). Global talent management. *Journal of World Business*, 45(2), 105-108.
- [59] Schutz, P. F., & Carpenter, D. A. (2008). Critical considerations of talent management and knowledge management for effective HR planning. *Smart Talent Management—Building Knowledge Assets for Competitive Advantage*, Elgar Publishing, Aldershot, 19-32.
- [60] Simsek, Z., & Heavey, C. (2011). The mediating role of knowledge-based capital for corporate entrepreneurship effects on performance: A study of small to medium-sized firms. *Strategic Entrepreneurial Journal*, 5(1), 81-100
- [61] Son, J., Park, O., Bae, J., & Ok, C. (2020). Double-edged effect of talent management on organizational performance: the moderating role of HRM investments. *The International Journal of Human Resource Management*, 31(17), 2188-2216.
- [62] Sparrow, P. R., & Makram, H. (2015). What is the value of talent management? Building value-driven processes within a talent management architecture. *Human Resource Management Review*, 25(3), 249-263.
- [63] Stopford, J. M., & Baden-Fuller, C. W. (1994). Creating corporate entrepreneurship. *Strategic Management Journal*, 15(7), 521-536.
- [64] Tichy, N.M., Fombrun, C.J. & Devanna, M.A. (1982) Strategic human resource management, *Sloan Management Review*, 23 (2), 47-61.
- [65] Zahra, S. A. (1991). Predictors and financial outcomes of corporate entrepreneurship: An exploratory study. *Journal of Business Venturing*, 6(4), 259-285.
- [66] Zahra, S. A. (1993). Environment, corporate entrepreneurship, and financial performance: A taxonomic approach. *Journal of Business Venturing*, 8(4), 319-340.
- [67] Zahra, S. A. (1995). Corporate entrepreneurship and financial performance: The case of management leveraged buyouts. *Journal of Business Venturing*, 10(3), 225-247.
- [68] Zahra, S. A., & Covin, J. G. (1995). Contextual influences on the corporate entrepreneurship-performance relationship: A longitudinal analysis. *Journal of Business Venturing*, 10(1), 43-58.
- [69] Zahra, S. A., Neubaum, D. O., & Huse, M. (2000). Entrepreneurship in medium-size companies: Exploring the effects of ownership and governance systems. *Journal of Management*, 26(5), 947-976.
- [70] Zahra, S. A. (1996). Governance, ownership, and corporate entrepreneurship: The moderating impact of industry technological

-
- opportunities. *Academy of Management Journal*, 39(6), 1713-1735.
- [71] Zhang, Z., Wan, D., & Jia, M. (2008). Do high-performance human resource practices help corporate entrepreneurship? The mediating role of organizational citizenship behavior. *The Journal of High Technology Management Research*, 19(2), 128-138.

İçme Suyu İletiminde Terfili Hatlarla Cazibeli Hatların Birlikte Kullanılmasının Pompalara Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effects of Combined Gravity Lines and Pressure Lines on Pumps in Drinking Water Supply

Ali Osman KOCA¹, Mustafa ATMACA²

¹Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 34722, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

Öz

Günümüzde 1,5 milyon m³ kapasitesiyle Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisi İstanbul'un içme suyu ihtiyacının %48'ini karşılamaktadır. Tesisteki pompaların durumu ve boru hatlarındaki debi ölçümleri uzaktan kontrol ve kumanda sistemleriyle (SCADA) anlık olarak izlenmektedir. Ancak boru içindeki akışlar, kolektör hatları ya da ölçümü yapılmayan noktalardaki suyun hareketi takip edilememektedir. Bu çalışmada, pompalı (terfili) hatlarla cazibeli hatların birlikte kullanılmasının, pompalar üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal analizlerle incelenmiştir. Deneysel çalışmada ilk olarak yalnızca pompalar rutin çalışma düzeninde çalıştırılmış ve debileri ölçülmüştür. Daha sonra cazibeli hat da devreye alınmış ve yüksek basınçla gelen akışın pompalar üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Cazibeli hattın pompalar üzerindeki etkileri sayısal olarak da araştırılmıştır. Bunun için Ansys Fluent 2022 R1 yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda pompalı hatlarla nispeten daha yüksek basınçlı hatlar birlikte çalıştırıldığında, pompalarda %48'lere varan debi kaybı olduğu tespit edilmiştir. Sayısal hesaplamalar sonucunda ise pompa hattına giren yüksek basınçlı akışların, pompaların basma yönlerinde engel oluşturarak iç basıncın artmasına ve pompa debisinin azalmasına sebep olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pompa, Enerji Kayıpları, Terfi İstasyonu, Cazibeli Akış, Su Arıtma Tesisi, HAD

Abstract

At the present time, Omerli Drinking Water Treatment Facility with 1.5 million capacity makes available 48% of Istanbul's clean water need. The status of the pumps in the facility and flow measurement on pipelines are monitored immediately by remote command and control systems (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition). Nonetheless, it could not followed that the flow in the pipe, the piping header lines or the movement of the water at the points where the measurement. In this study, the effects of using pump lines and gravity lines together on the pumps were investigated by experimental and numerical analysis. In the experimental study, at first, only the pumps were operated in routine operation and the flow rates were measured. Then, the gravity flow line coming with high pressure was put into operation and the effects of this flow on the pumps were shown. Ansys Fluent 2022 R1 software was used to see the effects of the gravity line on the pumps and understand the flow in the pipe line. In the experiment, it was detected that when pumped lines are operated together with relatively higher-pressure lines, it causes a flow loss of up to 48% in pumps. In the analyzes, it has been understood that entering of high pressure flows to the pump line causes that increasing of internal pressure and decreasing of the pump flow rate.

Keywords: Pump, Energy Losses, Pumping Station, Gravity Flow, Water Treatment Plant, CFD

I. GİRİŞ

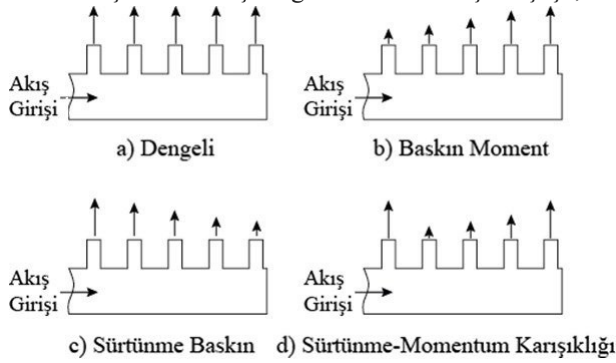
Pompalama sistemleri dünyanın elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %20'sini oluşturur. Bazı endüstriyel tesis operasyonlarında ise pompa sistemleri enerji kullanımının %25-50'sine kadar çıkar [1]. Pompalama sistemlerinin enerji maliyetleri, bu sistemlerin doğru, efektif ve ekonomik bir şekilde kurulumu ile birlikte en ideal şekilde işletilmesiyle de doğrudan ilgilidir.

Ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin en büyük göstergelerinden biri verimli enerji kullanımudur. Dünyada enerji verimliliği ile birincil enerji kaynakları rezervinin hızla tükenmesinin kontrol altına alınması hedeflenmektedir. Ülkemizde sanayide kullanılan elektriğin yaklaşık beşte biri pompalar tarafından tüketilmektedir. Pompaların çalıştığı sistemlerde sıklıkla yapılan hata, yanlış pompa seçimi ve yanlış pompaj sistemi tasarımıdır. Bu tür sistemlerde yapılacak iyileştirmeler ile yüksek miktarda enerji tasarrufu elde edilmesi mümkündür [2]. Pakistan'da santrifüj pompalarla ilgili yapılan bir vaka çalışmasında bir pompanın verimliliğindeki %8'lik artışın, pompanın kullanım ömrü maliyetini %17,6 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu sonuç, bir pompa için yıllık 4281 ABD Doları tasarruf sağlanabileceğini göstermektedir. Pompa seçiminin yanlış yapılması durumunda ise işletme, bakım ve ekonomik kullanım açısından kullanıcılarda uzun süreli bir rahatsızlık oluşacaktır [3].

Pompa istasyonunun pompalama işlemlerini iyileştirmek için herhangi bir girişimde bulunulduğunda genel olarak üç farklı sorun alanı vardır. Bunlar verimsiz pompalar, verimsiz pompa kombinasyonları ve verimsiz

pompa planlaması olarak sıralanabilir. Pompalardaki verim, pompanın suya aktardığı gücün, pompaya giren güce oranlanmasıyla bulunabilir. Ancak bu verimlilik çeşitli akış hızlarında ölçülmelidir. Pompalar sisteme monte edildikten sonra akış hızlarını ölçmek fiziksel olarak pratik değildir. Bununla birlikte, bu bilgi elde edilebilirse ve pompanın orijinal performans özelliklerini karşıladıysa gösterilirse, yine de sistemde verimli çalışacağına dair bir garanti yoktur. Tek başına çalışan bir pompanın verimliliği, diğer pompalarla birlikte çalıştığı zaman çok değişebilir [4]. Bu nedenle bir sistem ya da tesis için tüm hesapları yapılmış ve fabrika verilerine bakılarak tedarik edilmiş pompaların montajı tamamlandıktan sonra mutlaka sistem üzerinde çalışma eğrilerinin yeniden çıkarılması, en ideal çalışma noktalarının belirlenerek işletmeye teslim edilmesi gerekmektedir.

Kolektörler, büyük bir sıvı akışının birçok paralel akışa bölünmesinde, akışların ayrı ayrı kullanılmasında veya ayrı şekilde gelen akışların bir akışta toplanması gerektiği durumlarda kullanılan önemli bir parçadır. Kolektör sistemleriyle elde edilen akış türleri pek çok mühendislik alanında kullanıldığı gibi, su ve atık su arıtma sistemlerinde de kullanılır [5]. Kolektörler bir akışı birleştirme, bölme, tersine çevirme ya da paralel bir akış elde etmek amacıyla kullanılabilir. Bir kolektör sistemi içindeki akış dağılımı ve basınç düşüşü,



Şekil 1. Kolektörde farklı akış rejimleri

sürtünme ve momentum olarak bilinen iki karşıt kuvvete bağlıdır. Sürtünme, bir basınç düşüşü üretme eğilimindeyken, akışkanın kolektördeki dallanma yoluyla yavaşlamasına bağlı momentum kaybı, bir basınç artışına neden olur. Sürtünme ve momentum etkilerine göre, akış dağılımı Şekil 2'deki gibi dört farklı akış rejimi ile sonuçlanır. Burada gösterilen okların boyları kütle akış oranını temsil etmektedir [6].

Son yıllarda, bilgisayar kapasitesindeki hızlı artış ve CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) programlarının ara yüzlerinin geliştirilmesiyle, CFD tekniği kolektör sistemlerinde akış dağılımını tahmin etmek için yoğun bir şekilde kullanılmıştır [7]. CFD yöntemiyle yapılan analizler, araştırmacılar arasında sürekli gelişmekte ve giderek daha popüler hale gelmektedir. Bir CFD analizi gerçek mühendislik yapılarını çözebilir ve ayrıntılı basınç ve akış alanı sonuçları gösterebilir. Bununla birlikte, bu sonuçların

güvenilirliği genellikle sorgulanabilir. Ayrıca, analizi yapılan geometrileri optimize etmek için, özellikle 3 boyutlu karmaşık yapılarda yüksek hesaplama maliyetlerine ihtiyaç duyar [5] [8]. Analiz sonuçlarının deneysel çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir. Simülasyonların sonuçları, akış davranışını incelemeyi sağlarken, tüm akışın yeniden yapılandırılmasına da yardımcı olabilir [9].

Deneysel bir araştırmada, bir kolektör hattının çıkışındaki boruların her birinde farklı hız ve basınçların oluşması sebebiyle farklı debide su çıktığı görülmüştür. Reynolds sayılarına ve CFD analizlerine göre hesaplanan konik tasarımlı farklı bir kolektör hattı sayesinde tüm çıkışlardaki su debisi eşit olacak şekilde bir sistem ortaya konulmuştur [10]. Kolektör tasarımları hakkında yapılan CFD çalışmalarında Reynolds sayısının üç değeri için (100.000, 150.000, 200.000) tek tip uzunlamasına kesitli kolektörde ilk çıkıştan geçen akış, son çıkışa kıyasla çok küçük olmaktadır. Ancak kolektör tasarımında, kolektörün ilk giriş ve son giriş arasında yapılan konik bir tasarım, daha iyi bir akış dağılımı sağlamaktadır [11]. Birden fazla borunun bir kolektöre belli açılarla bağlanması, akışın yönünde ani bir değişimin gerçekleşmesine ve sürtünme kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu duruma benzer bir örnek olarak 90° dirsek içindeki sürtünme kayıplarını azaltmak amacıyla dirsek içine yönlendirici bir kılavuz yerleştirilmiştir. Yapılan sayısal analizlerde, yönlendirici kılavuzun akışı daha kontrollü bir şekilde yönlendirdiği, akış ayrılmalarının azaldığı ve dirsekteki sürtünme kaybının %25,3 oranında düştüğü gösterilmiştir [12]. Doğru bir akış oluşumunda kolektör tasarımının yanında önemli bir parametre de akışkan basıncıdır [13]. Akış hattı içinde, akışkanın hangi bölgelere nasıl bir basınç uyguladığı, kolektöre giren diğer akışların hareketini etkilemektedir. Kolektöre giren borunun çapları, boruların giriş açıları ve bu borulardan gelen farklı basınç ve hızdaki su akışı, kolektör içindeki basınç ve hız dağılımını etkilemektedir. Kolektöre giren akış pompalar aracılığı ile sağlanıyorsa, pompaların verebileceği debi ve pompa motorlarının şebekeden çektikleri güç de değişmektedir.

Bu çalışmada Ömerli İçme Suyu Arıtma Tesisinden İstanbul'un önemli bir bölümüne içme suyu sağlayan boru hatlarının, tesis içindeki bağlantı yapıları üzerinde durulmuştur. Yüksek kotlara inşa edilmiş (151 m) Emirli Arıtma Tesislerinin deposundan çıkan içme suyu DN3000 çaplı boru hattından cazibeli akışla (yer çekimi etkisiyle) 133 m kotuna indirilmektedir. Yaklaşık olarak 127 m kotuna inşa edilen diğer arıtma tesislerinden çıkan içme suyu, Emirli deposundan gelen cazibeli hatla bir kolektörde birleştirilerek Dudullu'da 138 m kotundaki denge bacalarına gönderilmektedir. Düşük kottaki temiz suyun denge bacalarına gönderilmesi için pompalar kullanılmaktadır. Tesis içinde nispeten yüksek basınçlı cazibeli hatla düşük basınçlı pompalı hattın bir kolektörde birleştirilmesi sonucunda akışta oluşan problemler ve pompaların bu akıştan nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Tam ölçekli deneysel çalışmalar riskli

olsa da bu çalışmada tesis içindeki boru hatları ve pompalar kullanılmıştır[14]. Başlangıç noktası olarak pompa emiş bölgeleri, bitiş noktası olarak boru hatları üzerinde kot farkı ölçümünün yapılabildiği vana odaları belirlenmiştir. Debi ölçümleri İSKİ'nin SCADA merkezinden ve pompaların bulunduğu terfi merkezinden takip edilmiştir. Pompalar genel çalışma düzenlerine benzer senaryolarda çalıştırılmış, daha sonra da cazibeli hattan gelen akış da pompa hattına girecek şekilde dahil edilerek pompaların debi miktarlarındaki değişimler incelenmiştir. Boru hattı içindeki akışı tam olarak görebilmek için pompalar ve boru hatları birebir ölçekte 3 boyutlu olarak modellenmiş ve benzer bir akış sistemi oluşturularak CFD analizleri yapılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Çalışma

Tesislerdeki pompalar ve hatlar kullanılarak Şekil 2'de çalışma alanı olarak gösterilen alanda deneysel çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 2. Çalışma alanı

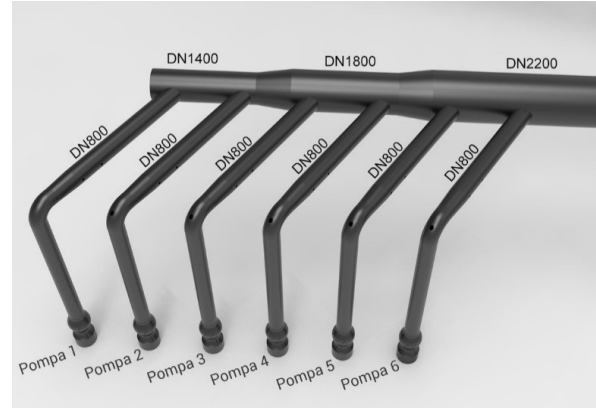
Tesiste bulunan Temiz Su-1 terfi merkezi (TM-1) 1976'da, Temiz Su-2 terfi merkezi (TM-2) 1996'da, Emirli Yavuz Sultan Selim Arıtma Tesisi 2001'de hizmete girmiştir. Emirli tesislerinin yüksek kotu sayesinde cazibeli akış sağlanmaktadır. Bu üç akış sisteminden farklı basınçlarla gelen içme suyu, bir kolektör hattına bağlanmaktadır. Kolektörden de birbirine paralel 11,5 km uzunluğundaki 3 adet boru hattı ile Dudullu'da 138 m kotunda bulunan denge bacalarına iletilmektedir. TM-1'de bulunan pompalar

projelendirme aşamasında 13 m basma yüksekliğine sahip 6 adet pompa grubu olarak tasarlanmış, ilk olarak projeye uygun 4 adet KSB markalı, 5800 m³/h debili pompaların montajı yapılmıştır. 1993'te eklenen 5 ve 6 numaralı 2 adet pompa, projeden farklı olarak Nijhuis markalı, 7200 m³/h debili daha güçlü pompalardır. TM-1'de yer alan pompa grubu Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. TM-1 pompa istasyonu

TM-1'deki 6 adet pompanın bağlı olduğu kolektör hattı, konik yapısıyla basıncın ve hızın dengesi gözetilerek tasarlanmıştır. Kolektör hattına bağlı pompaların dizilimi Şekil 4'te gösterilmiştir.

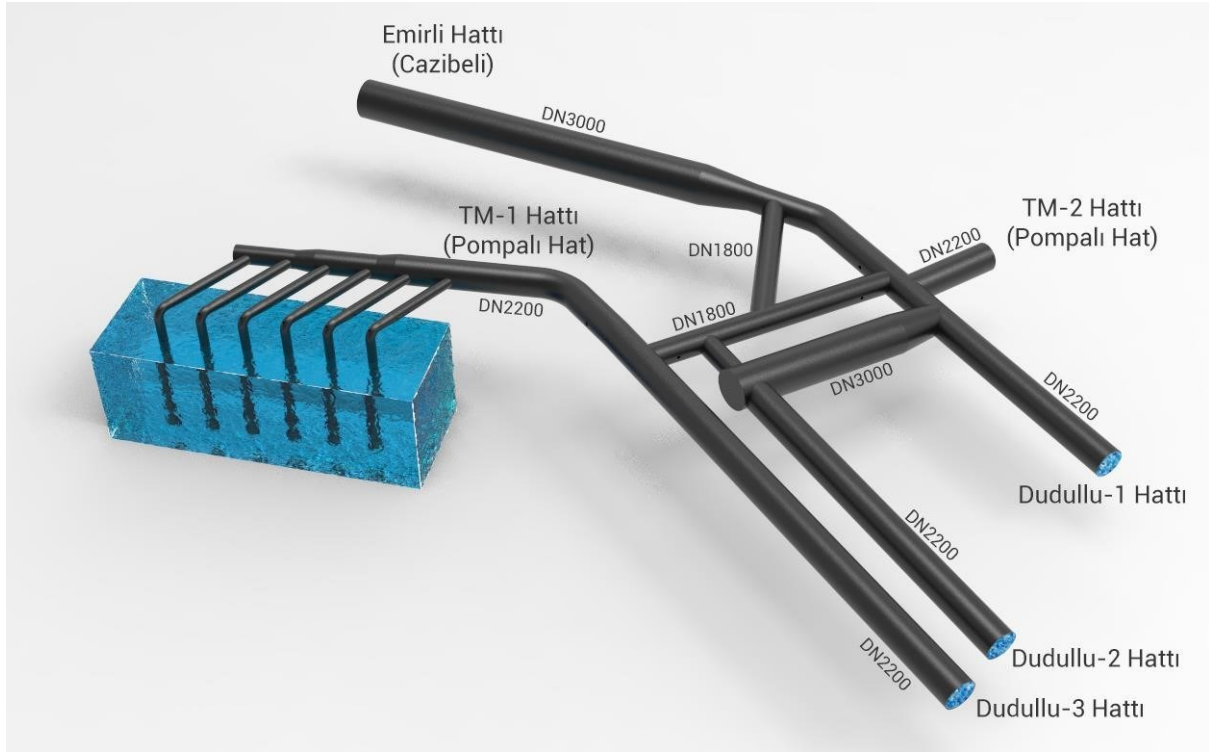


Şekil 4. Kolektör hattı modeli ve pompa dizilimi

TM-2'de yer alan pompa grubu ise Şekil 5'te gösterilmiştir. Rutin kullanıma benzer şekilde deneysel çalışmada TM-2'de 1 adet pompa kullanılmıştır.



Şekil 5. TM-2 pompa istasyonu



Şekil 6. Deney alanının 3 boyutlu modeli

Deney alanının tamamı Şekil 6'da basitleştirilmiş ve 3 boyutlu model olarak gösterilmiştir. TM-2 hattında çalıştırılan bir adet pompa DN2200 çaplı borunun diğer ucunda yer almaktadır ancak ölçeklendirilmiş mesafeden dolayı Şekil 6'te gösterilmemiştir. Deneyin yapıldığı zamanlarda Dudullu-2 hattı bakımda olduğu için kapalı durumdadır. Deneyde kullanılan pompaların motorlarına ait veriler ve pompaların debileri Tablo 1'de gösterilmiştir. TM-2'de yer alan pompa, daha fazla debi vermesi ve daha yüksek kota su basmasından dolayı daha fazla güç harcamaktadır.

Tablo 1. Pompalara ait etiket bilgileri

Motor	Güç (kW)	Gerilim (V)	Devir (d/d)	Debi (m ³ /h)	
TM-1	1	300	3000	735	5800
	2	300	3000	735	5800
	3	300	3000	735	5800
	4	300	3000	735	5800
	5	450	3000	745	7200
	6	450	3000	745	7200
TM-2	1	620	6300	593	8712

Emirli hattından gelen yüksek basınçlı akış Şekil 6'da görülen kolektör yapısı aracılığı ile pompaların da bağlı olduğu boru hattıyla birleşmektedir. Bu bağlantı, tüm hatların aktif olarak kullanılması, bir hat üzerinde bakım çalışması yapılacaksa kalan iki hattın yeterli suyu iletmesi amacıyla yapılmıştır. Bu hatlardan İstanbul'a gece-gündüz değişen debilerde su verilmektedir. Günlük rutin kullanımda, Emirli hattının cazibeli akışı ile birlikte TM-1'den 3-4 adet pompa ve gerekli durumlarda TM-2'den 1 pompa çalıştırılmaktadır. Talep azaldığında bazı pompalar durdurulmaktadır.

Deneyde seçilen senaryolar rutin çalışma düzenine benzer şekilde yapılmıştır. Pompaların çalışma düzenleri ve hatların açık-kapalı durumları göz önünde bulundurularak 6 farklı senaryo üzerinde çalışılmıştır. Boru hatları üzerindeki debimetrelerle verilen su miktarı (m³/h) SCADA merkezinde takip edilmiştir.

Deneyde takip edilen yöntem, pompaların çalıştırılma düzenlerine göre verdikleri debilerin farklarının kıyaslanması şeklindedir. Bu farklara en çok etki eden etkenler araştırılmıştır. Öncelikle TM-1'deki bazı pompalar ve TM-2'den 1 adet pompa çalıştırılmıştır. Pompalar çalıştırılırken cazibeli hattın vanası kapatılmış ve Dudullu yönüne giden boru hatlarını sadece pompalar beslemiştir. Verilen debiler ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Daha sonra pompalar çalışırken cazibeli Emirli Hattı aktif edilerek nispeten yüksek basınçlı ve hızlı akışın kolektöre girmesi sağlanmıştır. Dudullu 1 ve Dudullu 3 hattına giren akış sonucunda pompaların bu durumdan nasıl etkilendiği araştırılmıştır.

2.2. Sayısal Çalışma

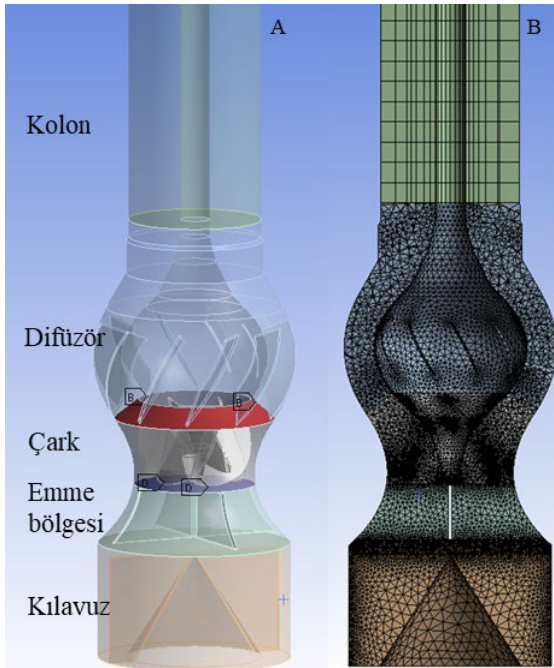
Boru hattı içinde nasıl bir akış olduğunu görmek için sayısal analizler ideal bir yöntemdir. Sistemin ana kolektör yapısındaki borularda cazibeli akışın etkisini görmek için Ansys Fluent yazılımıyla sayısal analizler yapılmıştır.

Deney alanı olarak tesisteki boru hatları ve pompa sistemleri kullanıldığından, sayısal analizlerde de birebir ölçekte 3 boyutlu modeller kullanılmıştır. Böylece deneysel ve sayısal çalışma sonuçları için kıyaslanabilir sonuçlara ulaşılmıştır. Sayısal analizlerde, deneysel çalışmadaki gibi farklı senaryolar uygulanmıştır. İlk

olarak pompaların 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin gerçek pompalarla benzerliklerinin ortaya konulması için sayısal analizleri yapılmış ve verdikleri debiler ölçülmüştür. Bu kıyaslama ile doğrulama çalışması yapılmıştır. Daha sonra pompalar, model olarak hazırlanan kolektör hattına bağlanmış ve analizleri yapılmıştır. Paralel bağlı pompaların birlikte çalışmaları esnasında debideki kayıp araştırılmıştır. Son olarak bütün saha 3 boyutlu olarak modellenmiş ve pompalarla birlikte tüm sahanın sayısal analizleri yapılmıştır. Cazibeli akışın hatlar içindeki hareketi, pompaların bu durumdan nasıl etkilendiği, debilerindeki değişimler ve basınç bölgeleri incelenmiştir.

2.2.1. Pompaların 3 boyutlu modellenmesi ve sayısal analizleri

Deney alanındaki akışın görülebilmesi ve pompalar üzerindeki akış etkilerinin anlaşılabilmesi için bütün modellerin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi gerekmektedir. Pompalar çok eski olduğu için 3 boyutlu modellerine ulaşılamamıştır. Bu nedenle arşivlerden elde edilen teknik resimler kullanılarak ve bakıma alınan benzer pompalar incelenerek 2 farklı pompa (KSB ve Nijhuis) Solidworks programında modellenmiştir. Şekil 7'de KSB pompanın modelinde, Ansys 2022 R1 yazılımı kullanılarak çark bölgesi kontak yüzeylerle ayrılmış ve oluşturulan ağ yapısı gösterilmiştir. Kontak yüzeyler B ve D oklarıyla gösterilmiştir. Kontak yüzeylerle ayrılan bölgeye dönme hareketi verilmiş, diğer bölgelerdeki elemanlar hareketsiz bırakılmıştır. Modelin çark çapı ve açıları değiştirilerek Nijhuis pompa modeli de hazırlanmıştır.



Şekil 7. a) KSB pompanın bölümleri b) Ağ yapısı

Analizde çark bölgesine dönme hareketi verebilmek için hareketli ağ yöntemi (mesh motion) kullanılmıştır. Ağ yapısı oluşturulurken çark bölgesi ile emiş ağzı ve çark bölgesi ile difüzör birbirinden kontak yüzeylerle ayrılmıştır. Böylece Ansys Fluent 2022 R1 yazılımında

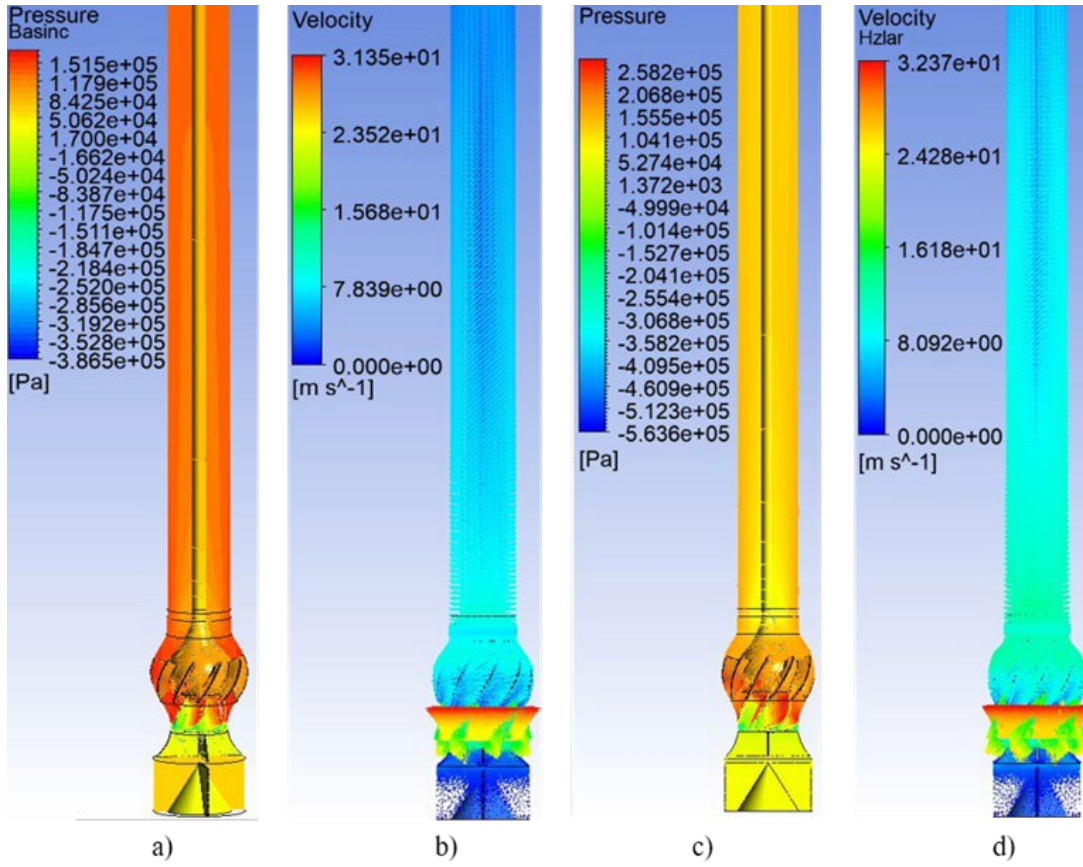
çark bölgesine dönme hareketi verilebilmiştir. Pompa geometrisi aşağıdan yukarıya doğru kılavuz, emme bölgesi, çark, difüzör ve kolon olmak üzere 5 bölgeden oluşturulmuştur.

Gerçek pompanın emme ve basma yönündeki basınçları, model pompada da kullanılmıştır. Gerçekte pompaların bulunduğu su alma yapısındaki derinlik 6,5 m olarak ölçülmüştür. Bu derinliğin pompa emme ağzında oluşturacağı statik basınç yaklaşık 65000 Pa olmaktadır. Deney alanında pompa çıkışlarında ölçülen manometrik basınç 130000 Pa olduğundan, bilinen bu değerler pompa analizinde kullanılmıştır. Ansys Fluent yazılımında giriş (inlet) basıncı 65000 Pa, çıkış (outlet) basıncı 130000 Pa olarak yazılmıştır. Çark bölgesinde devir sayıları KSB pompa için 735 d/dk, Nijhuis pompa için 745 d/dk olarak ayarlanmıştır. Kurulum debilerine göre KSB pompanın 5800 m³/h, Nijhuis pompanın pompa eğrisine göre 13 m basma yüksekliği için 8100 m³/h debide su verdiği bilinmektedir. Bu değerleri sağlayabilecek modeli oluşturmak ve ağ yapısı için uygun eleman sayısını belirlemek gerekmektedir. Pompa modellerinin gerçek pompalarla benzerliği, analiz sonucunda verdikleri debilerle kıyaslanarak sağlanabilir. Bu benzerlik oranının yüksek olması, diğer analizler için de kritik öneme sahiptir. Ağ kalitesini ve ağdaki eleman sayısını doğrulamak, sayısal analizlerin sonuçlarının doğruluğu için önemlidir. Benzer sayısal analiz çalışmalarında da sonuçların ağ yapısındaki eleman sayısından dolayı değişmediğini göstermek için farklı eleman sayılarında analizler yapılmıştır. Değerler değişmemeye ya da istenilen değerlerden uzaklaşmaya başladığı zaman en uygun eleman sayısı belirlenmiş olmaktadır [15]. Bu çalışmada da benzer şekilde her iki pompaya ait analizler yapılmış ve ağdaki eleman sayısının verilen debi miktarlarını ne kadar etkilediği araştırılmıştır.

Ağ yapılarındaki eleman sayısına göre pompaların verdiği debi miktarları Tablo 2'de gösterilmiştir. KSB pompa modelinin 1.579.000 eleman sayısı ile yapılan analizinde, 5800 m³/h debiye kıyasla %95,27 oranında gerçek pompaya benzediği görülmüştür. Nijhuis modelinin ise 8100 m³/h debiye kıyasla 1.733.073 eleman sayısı ile %98,5 oranında gerçek pompaya benzediği görülmüştür. Ağdaki eleman sayılarını daha da artırmanın benzerlik oranını değiştirmediği, hatta benzerlikten uzaklaştığı görüldüğünden dolayı bu ağ yapılarıyla analizlere devam edilmiştir.

Tablo 2. Model pompaların ağdaki eleman sayısına bağlı debi miktarları ve benzeşim oranları

KSB Modeli	Eleman Sayısı	Debi (m ³ /h)	Benzeşim Oranı %
1	1003718	5227	90,1
2	1579000	5526	95,2
3	2365973	5493	94,7
Nijhuis Modeli			
1	1068616	7654	94,5
2	1733073	7980	98,5
3	1910278	7975	98,4



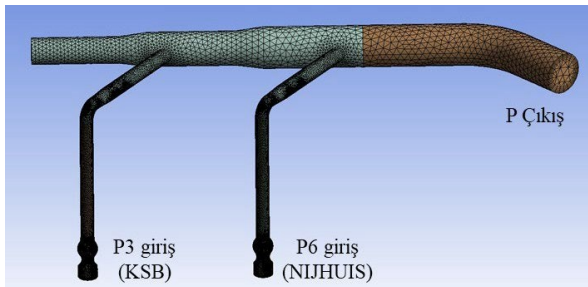
Şekil 8. a) KSB basınç konturu b) KSB hız vektörleri c) Nijhuis basınç konturu d) Nijhuis hız vektörleri

KSB ve Nijhuis pompaların analizlerinde basınç konturları ve hız vektörleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Çarkların dönmesiyle oluşan basınç ve hız değişimleri şekilde görülmektedir. Model pompaların gerçek pompalara benzerliği anlaşıldıktan sonra paralel bağlı pompalarla kolektör hattı birlikte modellenerek sayısal analizi yapılmıştır.

2.2.2. Kolektör modeli üzerinde pompa 3 ile pompa 6’nın sayısal analizi

Pompaların cazibeli bir akışın etkisine girmeden, sadece kolektör hattı üzerindeki debilerini görmek için kolektör

hattına bağlanan 3 ve 6 numaralı iki pompanın analizi yapılmıştır. Şekil 9’da oluşturulan modelin ağ yapısı ve akışın giriş-çıkışları (inlet, outlet) gösterilmiştir.



Şekil 9. TM-1 kolektörü ve bağlı pompaların ağ yapısı

TM-1 kolektörüne ve pompalara ait ağ yapısının toplam eleman sayısı 4.779.692’dir. K-epsilon türbülans

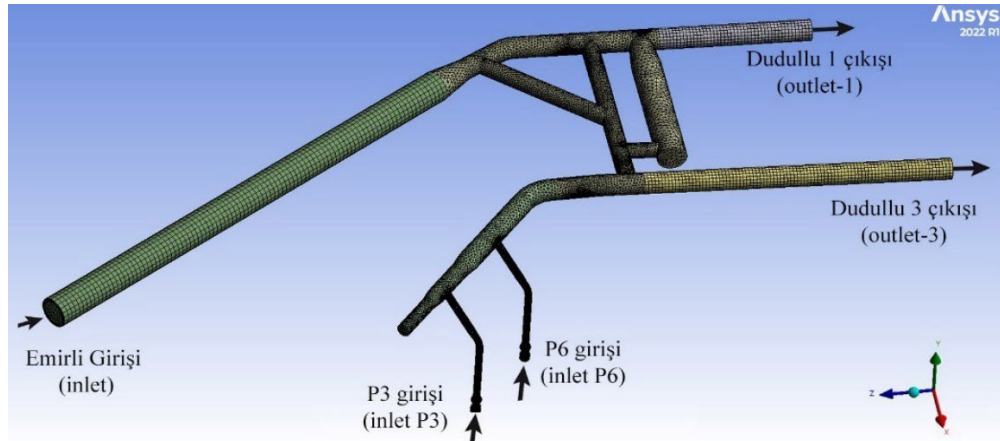
modeli, bu tür akış hesaplamalarında sıklıkla kullanıldığından dolayı, bu çalışmada da k-epsilon türbülans modeli tercih edilmiştir [12]. Kolektör sistemine besleme yapan girişler “inlet”, çıkışlar “outlet”, boru çeperleri “wall” ve pompa çarkının hacimsel bölgesi ile temas ettiği diğer difüzör ve emiş bölgeleri arasındaki ara kontak yüzeyler ise “contact region” olmak üzere dört temel sınır tipi kullanılmıştır. Çark bölgelerine dönme hareketi verilmiştir. Sayısal analizin diğer parametreleri Tablo 3’te verilmiştir. Bu parametrelerle modelin sayısal analizi yapılmıştır.

Tablo 3. Analize ait sınır şartları

P giriş_ksb	65000 Pa
P giriş_nijhuis	65000 Pa
P çıkış	130000 Pa
Akışkan cinsi	Su
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s ²
Türbülans modeli	k-epsilon, geliştirilmiş duvar fonksiyonları
KSB pompa çarkı	735 d/dk
Nijhuis pompa çarkı	745 d/dk

2.2.3. Deney alanının modeli üzerinde pompa 3 ile pompa 6’nın sayısal analizi

Pompaların kolektör hattındaki sayısal analiz sonuçlarıyla, cazibeli akışın sisteme dahil olduğu



Şekil 10. Deneysel alanın modelinin ağ yapısı ve akışların giriş çıkış yerleri

senaryonun sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırmak ve oluşan akışı incelemek için bütün deneysel alanı modellenmiş ve sayısal analizi yapılmıştır. Hazırlanan modelin ağ yapısı, akışların giriş ve çıkış bölgeleri Şekil 10'da gösterilmiştir. Dudullu 2 hattı bakım nedeniyle kapalı olduğundan analize dahil edilmemiştir. Deneysel alanının eleman sayısı 6.648.401'dir. Model oluşturulurken sahadaki kot bilgileri Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) üzerinden alınmış, bilgileri teyit etmek için sahadaki ölçümler yapılmıştır. Sayısal analiz için Dudullu yönündeki vana odaları ölçüm yapmak için ideal noktalar olarak görülmüş ve hesaplama alanı sınırları olarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümlere göre TM-1 hattı boru üst kotu 135,1 m, Dudullu 1 hattı 138,2 m, Dudullu 2 hattı 137,8 m ve Dudullu 3 hattı 137,3 m olarak hesaplanmıştır. Çıkışlarda (outlet) kot seviyeleri bilindiğinden, 1 numaralı denklemde gösterildiği gibi kot farklarından kaynaklanan statik basınç farkı TM-1 kolektörü üzerinden ölçülen basınç değerine eklenmiş ve çıkış basınçları (outlet) elde edilerek sayısal hesaplamalarda kullanılmıştır. Yerel kayıplar ihmal edilmiştir.

$$P_2 - P_1 = \rho gh \text{ (Pa)} \quad (1)$$

Emirli hattından giren debi, tesisten verilen debi miktarı kadardır. Emirli depolarından çıkan suyun debisi sürekli ölçüldüğü için sayısal hesaplamalarda Emirli girişi için basınç yerine, kütleli debi (kg/s) tanımlanmıştır. Ansys Fluent 2022 R1 yazılımında sayısal analiz öncesinde model için belirlenen sınır şartları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Modele ait sınır şartları

Emirli girişi, (kütleli debi)	10000 kg/s
P giriş_ksb	65000 Pa
P giriş_nijhuis	65000 Pa
P çıkış Dudullu-1	162000 Pa
P çıkış Dudullu-3	152000 Pa
Akışkan cinsi	Su
Yer çekimi ivmesi	-9,81 m/s ²
Türbülans modeli	k-epsilon, geliştirilmiş duvar fonksiyonları
KSB pompa çarkı	735 d/dk
Nijhuis pompa çarkı	745 d/dk

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

Deneysel çalışmada yapılan 6 farklı senaryodan elde edilen veriler Tablo 5'te gösterilmiştir. Yapılan senaryolar sonucunda Tablo 1'deki pompa verileri göz önünde bulundurulduğunda çıkışlardan alınan toplam debi miktarlarının beklenenden farklı olduğu görülmektedir. 1 numaralı senaryoda yalnızca TM-2'deki 3 numaralı pompa çalıştırılmıştır. Cazibeli akış durdurulmuştur. Toplam çıkış debisinin 5900 m³/h olduğu görülmektedir. Bu değer pompa çıkışından değil, Dudullu 1 ve Dudullu 2 hatlarının çıkışındaki debimetrelerden ayrı ayrı ölçülerek toplanmış ve elde edilmiştir.

Tablo 5. Pompalı boru hattının yüksek basınçlı cazibeli hatla birlikte çalıştırılmasının sonuçları

Senaryo No	TM-1 Çalışan Pompalar	TM-2 Çalışan Pompa	Pompalardan Beklenen Debi (m ³ /h)	Pompaların Verdiği Debi (m ³ /h)	Emirli-1 Akışı (m ³ /h)	Dudullu 1 Debi (m ³ /h)	Dudullu 2 Debi (m ³ /h)	Çıkan Toplam Debi (m ³ /h)
1	--	Pompa 3	8712	5900	--	4.400	1.500	5.900
2	Pompa 6	Pompa 3	16812	15.742	--	8.700	7.042	15.742
3	Pompa 1, 6	Pompa 3	22612	19.500	--	9.900	9.600	19.500
4	Pompa 1, 6	Pompa 3	22612	12.404	26.500	18.504	20.400	38.904
5	Pompa 1, 5, 6	Pompa 3	30712	15.988	24.600	19.386	21.202	40.588
6	Pompa 1, 5, 6	--	22000	17.238	24.600	19.749	21.964	41.713

Pompa verisine göre ölçülmesi gereken toplam debinin yaklaşık 8700 m³/h olması gerekmektedir. Dudullu 1 ve Dudullu 2 hatlarının ikisi de DN2200 çaplı çelik borulardır. Dudullu-1 hattından geçen debi 4400 m³/h ve Dudullu-2'den geçen debi 1500 m³/h olarak ölçülmüştür.

$$Q = V \cdot A \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (2)$$

2 numaralı süreklilik denkleminde, suyun hızı Dudullu 1'de 0,32 m/s ve Dudullu 2'de 0,11 m/s olmaktadır.

0,11 m/s hız, debimetrelerin kalitesine göre değişmekle birlikte ölçüm hassasiyeti açısından düşük bir değerdir. Dolayısıyla bu ölçümde pompanın gerçekte daha fazla debi verdiği ancak ölçümün hatalı olduğu söylenebilir. Bu pompanın debisi, diğer senaryolarda daha açık görülmektedir.

2 numaralı senaryoda TM-1'den 6 numaralı pompa ile TM-2'den 3 numaralı pompa çalıştırılmıştır. Toplam çıkış debisi 15742 m³/h olarak ölçülmüştür. Bu pompaların etiket değerlerine göre vermeleri gereken toplam debi 16800 m³/h olmaktadır. Birbirlerinden uzak hatlarda olmalarına rağmen aynı kolektöre su verdiklerinden dolayı bir miktar kayıp söz konusu olsa da bu kaybın makul bir değer olduğu kabul edilebilir. Beklenen debiye göre alınan debi oranlandığında oluşan kayıp %6,3'tür. Ayrıca TM-2'deki 3 numaralı pompanın bu senaryoda daha uygun bir debi verdiğinin görülmesi, 1 numaralı senaryoda yapılan yorumları doğrulamaktadır. Sonuç olarak TM-1'deki 6 numaralı

pompanın ve TM-2'deki 3 numaralı pompanın bu senaryoda kurulum değerlerine yakın çalıştıkları söylenebilir.

Tekli çalışan pompaların, paralel çalıştıklarında debi değerleri aynı oranda artmayacaktır. Bu literatür araştırmalarında da bahsedildiği gibi bilinen bir durumdur [4]. Ancak bu deneyde 3-4 ve 5-6 numaralı senaryolarda TM-1'de benzer pompalar çalıştırılmış, cazibeli hat ve TM-2'deki pompa deneydeki değişken veriler olarak kullanılmıştır. Böylece senaryolar kendi içinde kıyaslanabilir duruma getirilmiştir. Kıyasların hesaplanabilir olması için pompalardan beklenen debiler doğrudan toplanarak değerlendirilmiştir.

3 ve 4 numaralı senaryolar cazibeli hattın etkisini görmek için yapılmıştır. Her iki senaryoda da aynı pompalar çalıştırılmıştır. Bu nedenle her iki senaryoda beklenen pompa debilerin benzer olması gerekmektedir. 3 numaralı senaryoda cazibeli Emirli hattı kapalıyken pompalar 19500 m³/h su verebilmektedir. 4 numaralı senaryoda Emirli hattı açıldığında pompaların verdiği su miktarı 12404 m³/h değerine düşmektedir. Bu durum cazibeli hattın pompalı sistem üzerinde oluşturduğu akış dengesizliğini ve verim kaybını açıkça göstermektedir. 3 numaralı senaryoda pompaların toplam kayıp oranı, beklenen debiye göre kıyaslandığında %13,7 olmaktadır. Cazibeli akış sisteme girdiğinde toplam kayıp %45'e çıkmıştır.

5 numaralı senaryoda toplam 4 adet pompa çalışmaktadır. Pompaların toplam debisinin 30.712 m³/h olması beklenirken 15.988 m³/h değerinde kaldığı görülmektedir. Bu da yaklaşık olarak %47,9 kayıp anlamına gelmektedir. Bu senaryoda cazibeli akışın ve bu akış sebebiyle TM-2'deki pompada meydana gelen kayıpların etkisinin yüksek olduğu tahmin edilmektedir.

6 numaralı senaryo, 5 numaralı senaryoya benzer şekilde yapılmış ancak TM-2'de bulunan 3 numaralı pompa durdurulmuştur. Böylece cazibeli hattın TM-2'deki pompayı nasıl etkilediği araştırılmıştır. TM-1 pompaları çalıştırıldığında 22000 m³/h debi beklenirken 17238 m³/h debi alınmıştır. Bu senaryoda elde edilen kayıp oranı %21,6'dır.

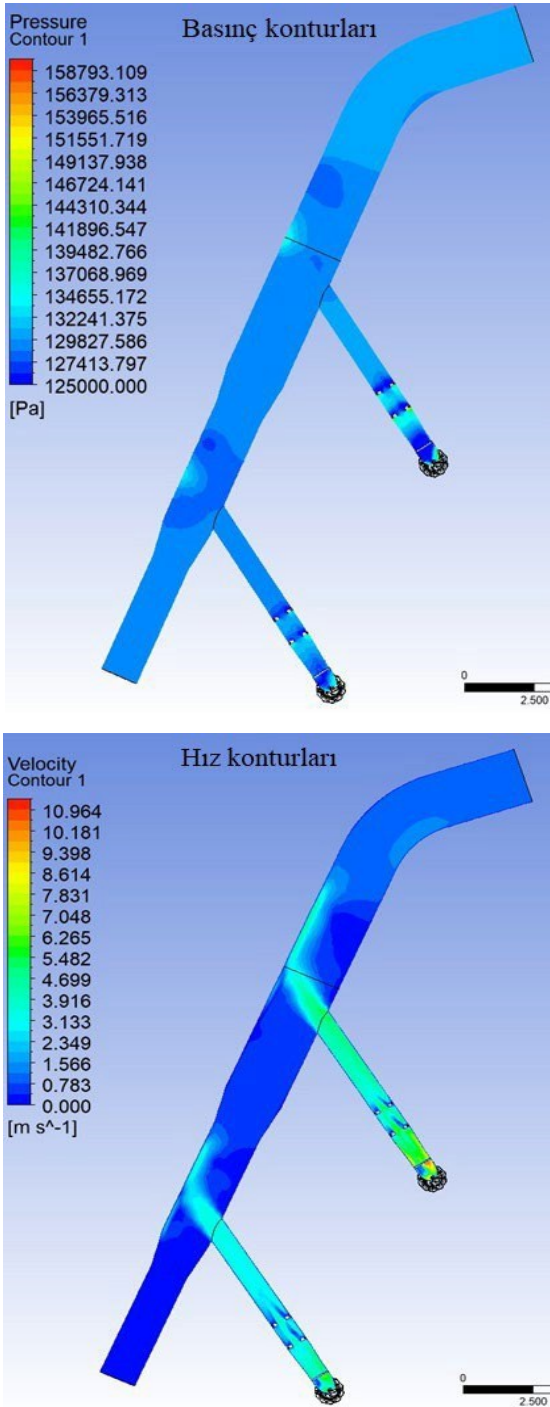
5 ve 6 numaralı senaryolarda cazibeli hattın gelen su miktarı aynı olmasına rağmen, pompalardan elde edilen debilerde ciddi bir fark oluşmuştur. 5 numaralı senaryoda 4 pompa çalıştırılırken 15988 m³/h; 6 numaralı senaryoda 3 pompa çalıştırıldığında 17113 m³/h debi elde edilmiştir. 3 numaralı pompa, paralel çalışan pompalara kıyasla iş yapamamıştır. 5 numaralı senaryoda TM-2'de bulunan pompanın kaybı, bu senaryo ile daha net ortaya konulmuştur. 3 numaralı pompanın çektiği güç 517 kW olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla, bu gücün bir kayıp olarak işletmeye yansıtıldığı, bu kayıptaki en büyük etkenin pompa akışını olumsuz etkileyen ana kolektör yapısı ve yüksek basınçlı cazibeli hat olduğu söylenebilir. Deney sonuçlarından elde edilen kayıp oranları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Deney sonuçlarına göre % kayıp oranları

Senaryo	TM 1'de çalışan pompalar	TM 2'de çalışan pompa	Cazibeli hat durumu	Kayıp oranı (%)
1	--	Pompa 3	Kapalı	--
2	Pompa 6	Pompa 3	Kapalı	6,3
3	Pompa 1, 6	Pompa 3	Kapalı	13,7
4	Pompa 1, 6	Pompa 3	Açık	45,1
5	Pompa 1, 5, 6	Pompa 3	Açık	47,9
6	Pompa 1, 5, 6	--	Açık	21,6

3.2. Sayısal Analizlerin Sonuçları

Farklı hatlardan gelen akışların pompalar üzerindeki etkisi sayılarla ortaya konulsa da borular içinde nasıl bir akış olduğu, kayıpların nerelerde gerçekleştiği, girdapların nerelerde olduğu, buna bağlı enerji kayıplarının hangi bölgelerde meydana geldiği sayısal analizlerde görülebilmektedir. Model pompaların gerçek pompalara benzer miktarda debi verdikleri analiz sonuçlarında gösterilmiştir. Pompaların TM-1 kolektöründeki basınç ve hız konturları Şekil 11'de gösterilmiştir.

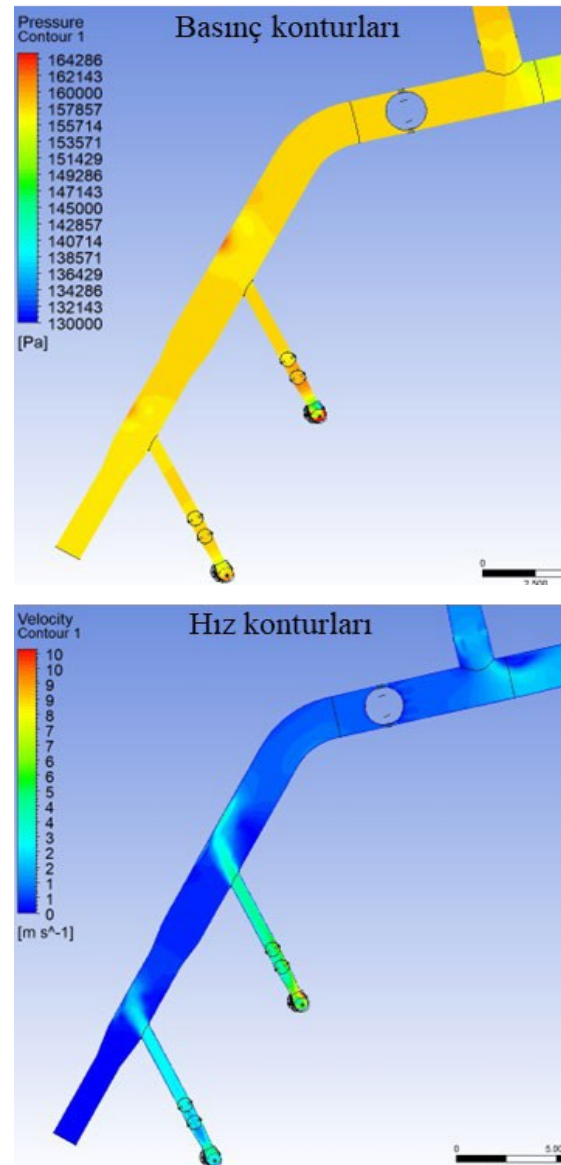


Şekil 11. Pompaların bağlı olduğu kolektör hattındaki basınç ve hız konturları

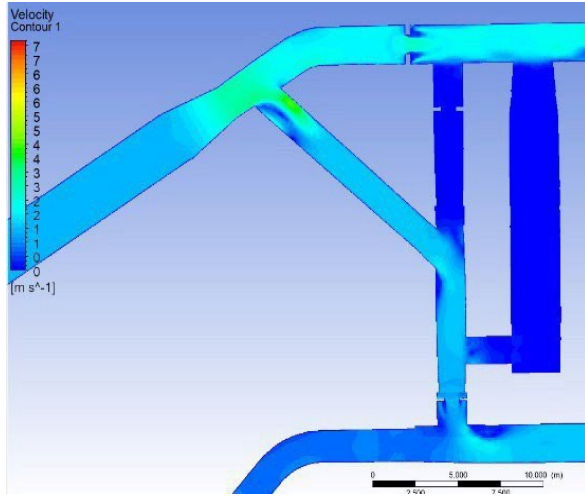
Birbirine yakın olmayan pompaların paralel çalıştırılması durumunda, kolektörün de genişleyen konik tasarımı sebebiyle pompaların birbirlerini çok fazla etkilemedikleri görülmektedir [10][11]. Analiz sonucunda 3 numaralı KSB pompanın çarkından giren suyun debisi $5533 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak Fluent yazılımında hesaplanmıştır. Elde edilen değer, kurulum debisine yakın bir değerdir ve %4 oranında kayıp görülmektedir. Bu kayıp oranı, pompanın ilk analizindeki benzerlik oranıyla aynı olduğundan, 3 numaralı pompanın kolektör hattında bir kayba uğramadığı söylenebilir. 6 numaralı pompanın debisi bu analizde $8188 \text{ m}^3/\text{h}$

olarak ölçülmüştür. 6 numaralı pompanın sayısal analizinde $7980 \text{ m}^3/\text{h}$ debi verdiği hesaplanmıştır. Bu analizle kıyaslandığında aralarında %2,5 oranında debi farkı olduğu görülmektedir. Farklı modellere ait analizler için bu farkın kabul edilebilir bir oran olduğu ve dolayısıyla bu pompa için de kolektör hattında bir kayıp olmadığı söylenebilir. Kolektör çıkışında iki pompanın verdiği debi $13644 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak ölçülmüştür. Diğer yandan kolektör hattındaki iç basınç, kontur renklerinden ortalama 134000 Pa olarak okunabilir.

Kolektör hattında sorunsuz çalışan 2 pompanın, cazibeli hattın etkisine maruz kalması durumundaki sayısal analizleri yapılmıştır. Şekil 12'de birbirinden uzak çalışan pompalarda basınç ve hız gradyanlarındaki değişim görülmektedir. İç basıncın 156000 Pa değerlerine kadar yükseldiği görülmektedir. Pompalar üzerindeki basıncın artması, pompaların basma yüksekliğini artırarak daha az debi vermesine sebep olmaktadır [13].



Şekil 12. Kolektör hattının basınç ve hız konturlarındaki değişim



Şekil 13. Deneysel alanına ait hız konturu

Deneysel alanına ait hız konturu Şekil 13'te gösterilmiştir. Cazibeli akışın Dudullu 3 hattına yüksek bir hızla girdiği daha açık bir şekilde görülmektedir. Emirli hattından gelen $36.072 \text{ m}^3/\text{h}$ debisi, DN3000 çaplı borudan $1,35 \text{ m/s}$ hızla ilerlemekte ve TM-1 yönüne doğru daralan kesitinde etkisiyle ayrılarak $2,4 \text{ m/s}$ hızla devam etmektedir. Pompaların basma gücüyle ilerleyen akışın hızı ise $0,88 \text{ m/s}$ 'yi göstermektedir. Böyle bir durumda, yüksek hızlı akışın pompaların bağlı olduğu Dudullu 3 hattına girmesi kaçınılmazdır. Sonuç olarak yüksek hızlı bu akış, Dudullu 3 hattının çapında büyük oranda bir daralma etkisi oluşturmaktadır, pompaların önündeki bir engele dönüşmektedir. Ayrıca hız arttıkça, enerji kayıpları da artmaktadır. Pompaların bu analiz sonucunda verebildiği debilerle ve belli noktalardan okunan hız değerleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Deneysel alanının CFD analizi sonuçları

	Oluşan hızlar (m/s)	Debi (m^3/h)
Pompa 3 (emme kısmında)	0,65	4434
Pompa 6 (emme kısmında)	1,05	7092
Emirli Hattı (girişte)	1,37	36072
Dudullu 1 Hattı (çıkışta)	1,93	25103
Dudullu 3 Hattı (çıkışta)	1,73	22452

İlk yapılan kolektör analizinde 3 ve 6 numaralı pompaların kolektör hattındaki debisi değerlerinin pompaların tekli çalışmalarında verdiği debilere yakın olduğu görülmüştü. Aynı modelin cazibeli akışla birlikte çalıştırılması sonucunda 3 numaralı pompanın $5536,6 \text{ m}^3/\text{h}$ 'ten $4434,2 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e düşerek %20 verim kaybına uğradığı hesaplanmıştır. 6 numaralı pompa ise $8189,2 \text{ m}^3/\text{h}$ 'ten $7092,7 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e düşerek %13 verim kaybına uğramıştır. Bu kayıplar deneysel çalışmada cazibeli hat etkisine giren sistemdeki yüksek kayıpları doğrulamaktadır. Analizde Dudullu 1 hattındaki akış hızının $1,93 \text{ m/s}$ olarak ölçülmesi, deneysel çalışmada TM 2'de çalıştırılan 3 numaralı pompadan gelen debinin kolektöre girememesinin sebebini de göstermektedir.

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Deneysel ve sayısal çalışmalar, Dudullu sisteminin çalışması esnasında pompa sisteminde meydana gelen verim kayıplarının büyük kısmının farklı basınçlara ait cazibeli hatla pompalı hatların beraber çalışmasından kaynaklandığını göstermektedir.

- Deneysel çalışmada, Emirli deposundan cazibeli gelen akışla TM-1 ve TM-2 hatlarından gelen akışlar kolektörde birleşerek Dudullu 1 ve Dudullu 2 hatlarından çıkmaktadır. Giriş ve çıkış hatlarının fazla ve farklı basınçlarda olmasının akışta düzensizliklere sebep olduğu görülmüştür. Sistemdeki yüksek basınçların, pompalı hatların önüne konulan ve iç basıncı artırarak yeterli debinin oluşmasını önleyen engellere dönüştüğü tespit edilmiştir. Bu durum pompalarda enerji kaybına neden olmaktadır. Pompalar büyük ve karmaşık bir hatta çalıştıklarında (Tablo 6, senaryo 3) oluşan en yüksek kayıp oranları %13,7 olmaktadır. Ancak cazibeli hatların etkisi altına giren pompalarda beklenen debiler daha yüksek oranda düşmekte ve %48'lere (Tablo 6, senaryo 5) çıkmaktadır.

- Bir pompanın basma tarafı tamamen kapatıldığında basma yüksekliği (Hm) artarken verdiği debinin sıfır olduğu bilinmektedir. Benzer bir durum bu deneysel çalışmadaki senaryoda gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmada 5 numaralı senaryoda (Tablo 5) TM-1'de 1, 5 ve 6 numaralı pompalar ve TM-2'deki 3 numaralı pompa çalışırken, toplam 4 adet pompanın verdiği debisi cazibeli hattın da etkisiyle $15.988 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak ölçülmüştür. 6 numaralı senaryoda aynı koşullar geçerliken sadece TM-2'deki pompa durdurulmuştur. 1 adet pompanın durdurulmasına rağmen alınan debisi $17.238 \text{ m}^3/\text{h}$ değerine yükselmiştir. Diğer bir ifadeyle, TM-2'de çalışan 3 numaralı pompanın etkisi bu senaryoda sıfır olmuştur. Bu durumun oluşmasının temel sebebi pompa hatlarının önlerindeki görülmeyen engellerdir. Pompanın hiçbir iş yapmadan harcadığı güç ise 517 kW 'tr.

- 3 ve 6 numaralı pompaların kolektör hattındaki sayısal analizinde, genişleyen konik bir kolektör tasarımı sayesinde pompalarda ciddi bir kayıp olmadığı görülmüştür.

- Deneysel ve sayısal çalışmalar sayesinde, pompa hatlarıyla yüksek basınçlı cazibeli akışlı hatların birbirinden ayrılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

- Sahada alınan verilerle sayısal hesaplamaların uyduğu görülmüştür.

- Sayısal çalışmalar sayesinde mevcut sistemlerin iyileştirilmesi için gerekli bilgiler ve görüntüler elde edilmiştir.

4.2. Öneriler

- Kolektör tasarımı yapılırken boru çaplarına ve ölü bölgelerin oluşmamasına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte sayısal analizlerin de yapılarak uygulanacak projenin kontrol edilmesi gereklidir. Doğru bir tasarım yapılmadığında, kolektörde dengeli bir akış elde edilememekte ve enerji kayıpları meydana gelmektedir. İmalat kolaylığı gözetilerek birbirine dik şekilde bağlantısı yapılan borulama sistemlerinde akış kopmaları ve girdaplar oluşmaktadır. İmalat açısından zor olsa da yıllarca kullanılacak büyük hatlarda akış ayrılmalarını ve girdapları önlemek için daha dar açılı bağlantıların yapılması gerekmektedir. İlk kurulumda imalat aşamasındaki işçiliğe gerekli önem verilmediğinde, yıllarca kullanılacak boru hatlarında günün her anında oluşan girdap hareketleri sebebiyle sürekli enerji kayıpları meydana gelebilmektedir.

- İçme suyu arıtma tesislerinin kurulumlarında arazide uygun kot olmadığında, sistemin çalışması için gerekirse zeminin doldurularak kotun yükseltilmesi teknik olarak mümkündür. Her ne kadar bu durum ilk yatırım maliyetlerini artırsa da yıllarca sürecek enerji maliyetlerinin önüne geçilecektir. Arıtma tesisinin yapılacağı arazi kotları ile suyun alınacağı kaynak ve verileceği yerleşim yerlerinin kotları birlikte değerlendirilmeli ve en az sayıda terfi merkezi kurulmalıdır. Bir arıtma tesisinin yanlış yere kurulması daha fazla terfi istasyonunun yapılmasına, gereksiz çalıştırılacak pompalara, pompa sistemlerinin mekanik ve elektrik bakımlarına, personel giderlerine ve enerji kayıplarına neden olmaktadır.

- Pompa olarak gerçekleştirilen akış sistemlerinde mümkün olduğu kadar ayrı hatların kullanılması gerekmektedir.

- Ayrı hatların kullanılması mümkün değilse farklı basınçlara sahip boru hatlarının kolektör sistemlerine girmeden önce basınçlarının dengelenmesi gerekmektedir. İğne vana gibi basınç kontrolü sağlayan vanalar değişken debilerde uzaktan kontrolle iç basıncın dengelenmesini sağlayabilmektedir. Aksi halde yıllar boyunca sürecek enerji kayıplarının oluşacağı söylenebilir.

- Kolektöre bağlı toplam 6 pompa olduğundan, aynı anda daha fazla pompanın çalıştırılmasıyla kolektör tasarımının etkinliği başka bir çalışmada tekrar analiz edilebilir.

- Farklı akış hatlarının birbirine karıştığı noktalarda borular içine yönlendirici kılavuzlar yerleştirilerek sonuçları deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılabilir.

- CFD analizleri büyük ve karmaşık alanların modellenmesinde ve analizlerinde yüksek hızlı bilgisayar sistemleri (ram, işlemci) gerektirmektedir. Böyle bir altyapıyla yapılacak farklı senaryolarla daha hassas çözümler sunulabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde araştırma imkanı sunan İSKİ Genel Müdürlüğüne, gerekli kolaylığı sağlayan tüm idarecilere ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] USA Hydraulic Institute, Europump and the US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (2001). *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LLC Analysis For Pumping Systems*.
- [2] Şenol, G. K., & Karakuş, C. (2017). Pompa ve Pompaj Sistemlerinde Enerji Tasarrufu Uygulamaları. *Mühendis ve Makina*, 58(687), 1-16.
- [3] Noon, A.A., Jabbar, A.U., Koten, H., Kim, M.-H., Ahmed, H.W., Mueed, U., Shoukat, A.A., Anwar, B. (2021). Strive to reduce slurry erosion and cavitation in pumps through flow modifications, design optimization and some other techniques: long term impact on process industry. *Materials*, 14, 521.
- [4] Guyer, J. P., P. E. ve R. A. (2013). Introduction to Pumping Stations for Water Supply Systems, *California: Createspace Independent Pub*.
- [5] Tomor, A., & Kristof, G. (2016). Validation of a discrete model for flow distribution in dividing-flow manifolds: numerical and experimental studies. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering* 60(1), 41-19.
- [6] Minocha, N., & Joshi, J. B. (2020). 3D CFD simulation of turbulent flow distribution and pressure drop in a dividing manifold system using openfoam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151.
- [7] Zhang, W., Li, A., Gao, R., & Li, C. (2018). Effects of geometric structures on flow uniformity and pressure drop in dividing manifold systems with parallel pipe arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, s. 870-881.
- [8] Wang, J. (2011). Theory of flow distribution in manifolds. *Chemical Engineering Journal*, 3(168), 1331- 1354.
- [9] Quintanar, N. R., Nguyen, T., Vaghetto, R., & Hassan, Y. A. (2019). Natural circulation flow distribution within a multi-branch manifold. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Cilt 135, 1-15.
- [10] Hassan, J. M., Mohammed, W. S., Mohamed, T. A., & Alawee, W. H. (2014). Modeling the

- uniformity of manifold with various configurations. *Journal of Fluids*, 1-8.
- [11] Hassan, J. M., Mohammed, W. S., Mohamed, T. A., & Alawee, W. H. (2014). CFD simulation for manifold with tapered longitudinal section. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 4(2).
- [12] Yin, Y., Li A., Wen, X., Zhang, J., Zhang, X., Guo, J., Li, J., Zhang, W., Che, J. (2022). Resistance reduction of an elbow with a guide vane based on the field synergy principle and viscous dissipation analysis. *Journal of Building Engineering*, 54.
- [13] Budiman, A. A., Haryanti, D., Subekti, M., & Kusuma, M. H. (2019). Preliminary study on fluid dynamics in manifolds of the reactor cavity cooling system - the experimental power reactor test facility. *Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty*. South Tangerang, Indonesia.
- [14] Hua, J., Zhang, S. ve Fu, L. (2017). Similitude criterion derivation and pipe physical property test and suitable analysis for water hammer scale model of long distance district heating pipeline. *Applied Thermal Engineering*, cilt 125, 80-90.
- [15] Khalaji, M., N., Osta, M., H., 4, K., (2018). Numerical Analysis of Heat Transfer of Hot Oil and Cold Water Fluids in a Concentric Type Heat Exchanger with Ansys Fluent. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 2-2, 24-27.