



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

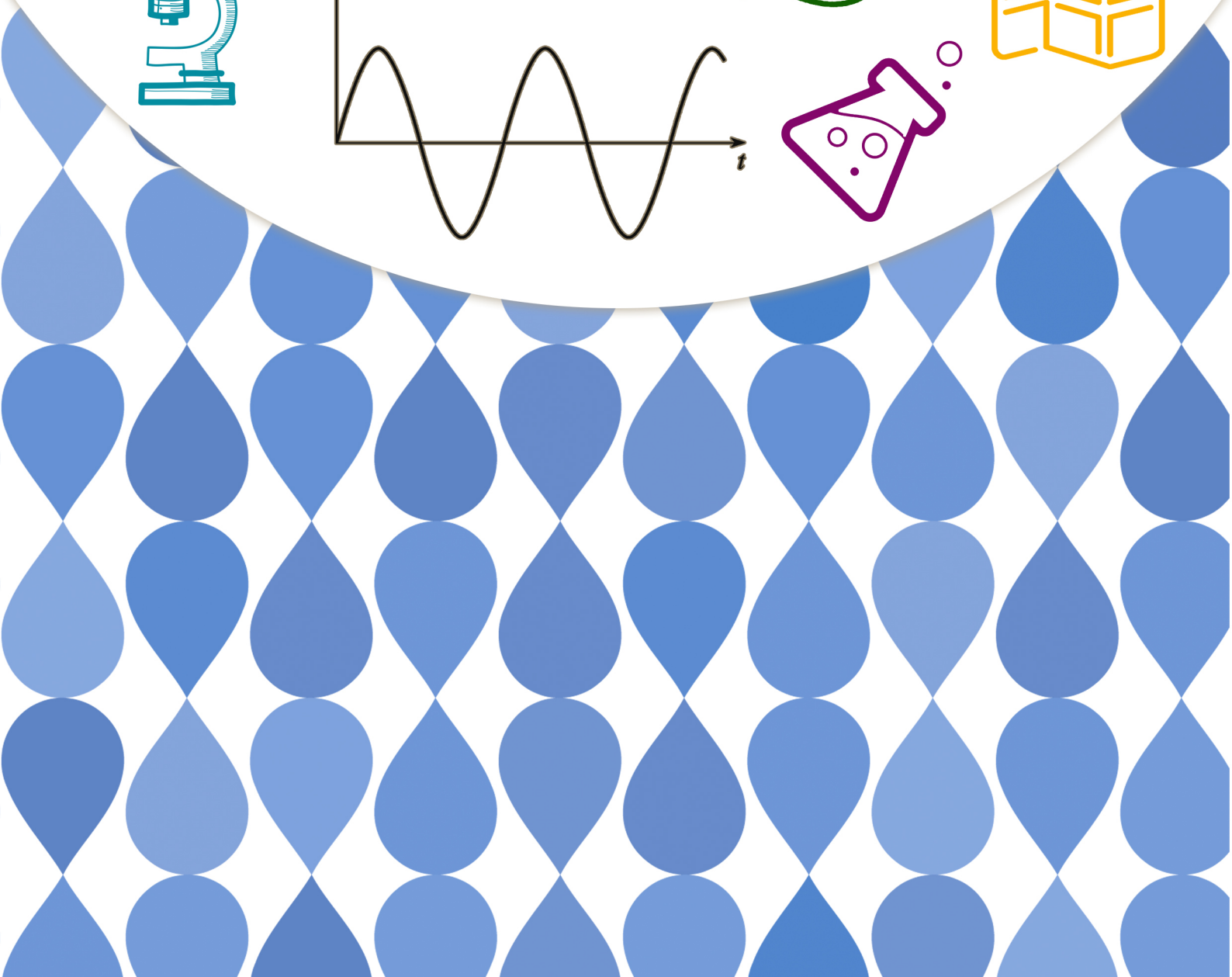
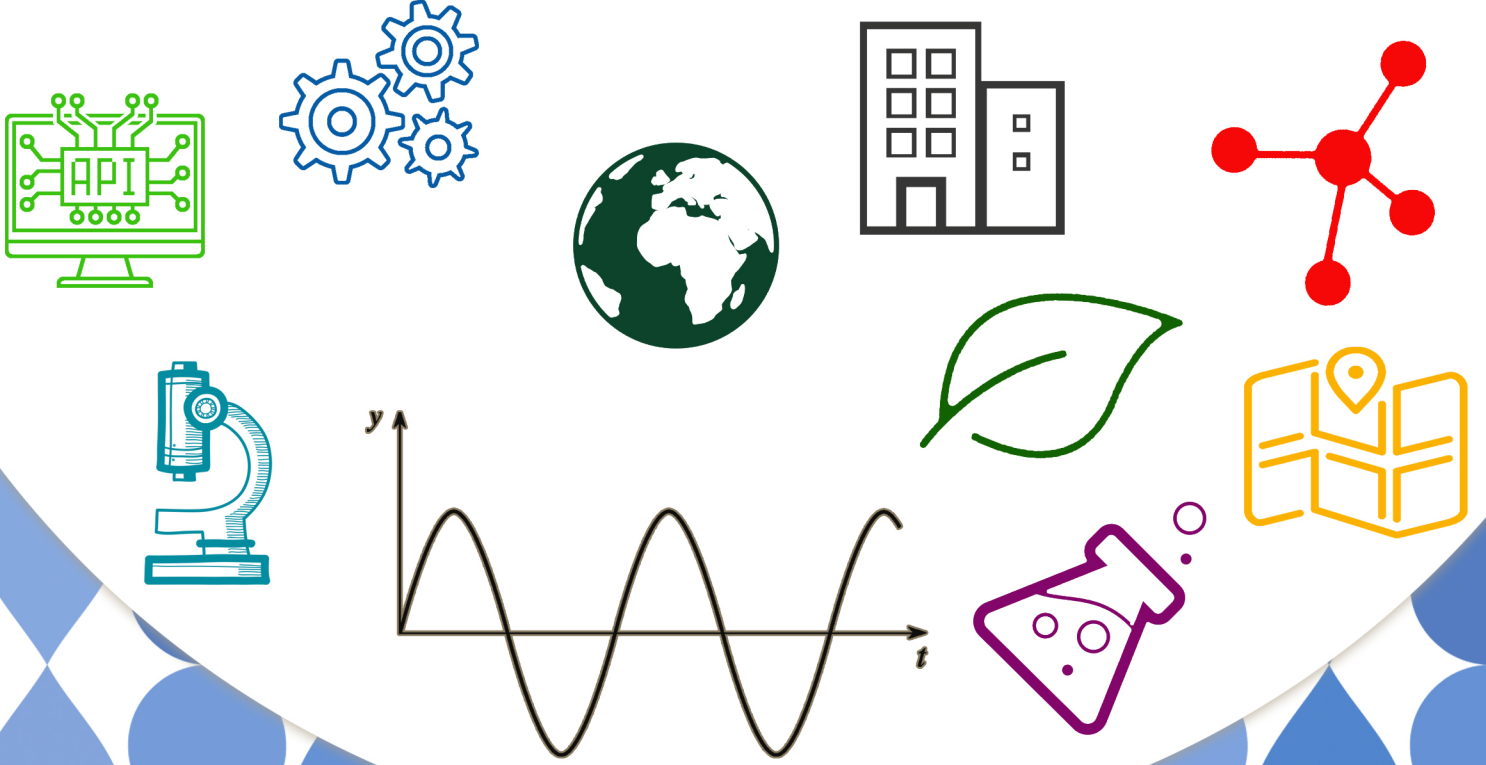
Journal of Engineering Science
of Adiyaman University

ISSN: 2149-0309

CİLT
VOLUME **10**

SAYI
ISSUE **19**

NİSAN
APRIL **2023**



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science of Adiyaman University

ISSN: 2149-0309

Dergi Yöneticisi

Prof. Dr. Murat PALA

Cilt:10 Sayı:19

Baş Editör

Prof. Dr. Murat PALA / Baş Editör ve Alan Editörü

Editörler

Prof. Dr. Leon JOLOLIAN / Alan Editörü

Assist. Prof. Dr. Oksana KOPLAK / Alan Editörü

Dr. Thomas FEGGELER / Alan Editörü

Prof. Dr. Tanju TEKER / Alan Editörü

Doç. Dr. Harun TÜRKMENLER / Alan Editörü

Doç. Dr. Şerif ÇİTİL / Alan Editörü

Doç. Dr. Miraç UÇKUN / Alan Editörü

Dr. Öğr. Üyesi Saadin OYUCU / Alan Editörü

Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT / Alan Editörü

Arş. Gör. Abuzer DOĞAN / Alan, Mizanpaj ve Dil Editörü

Yazışma Adresi / Correspondence

Address - Adiyaman Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Dekanlığı

e-mail: mbd@adiyaman.edu.tr

Tel: 0 (416) 223 38 08

Fax: 0 (416) 223 38 09

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

YAYIN KURULU/ EDITORIAL BOARD

- 1-Prof.Dr. Şemsettin TEMİZ.....(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof.Dr. Murat DEMİR AYDIN (Erzurum Teknik Üniversitesi)
- 3-Prof.Dr. İbrahim TÜRKMEN (İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof.Dr. Naci ÇAĞLAR.....(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof.Dr. Abdulkadir ÇEVİK(Gaziantep Üniversitesi)
- 6-Prof.Dr. Seyhan FIRAT (Gazi Üniversitesi)
- 7-Prof.Dr. Hasan OKUYUCU.....(Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)
- 8-Prof.Dr. Eyüp DEBİK..... (Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 9-Prof.Dr. Yusuf TUNÇTÜRK..... (Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
- 10-Prof.Dr. Nevzat ARTIK (Ankara Üniversitesi)
- 11-Prof.Dr. Hamit ADİN..... (Batman Üniversitesi)
- 12-Prof.Dr. Halef DİZLEK(Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi)
- 13-Doç. Dr. Yaşar AYZAZ (İnönü Üniversitesi)
- 14-Doç. Dr. Aysun ŞENER.....(Adana Bilim Teknoloji Üniversitesi)

DANIŞMA KURULU/ ADVISORY BOARD

- 1-Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof. Dr. Ergün ERÇELEBİ.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 3-Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN(İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof. Dr. Abdulkadir ÇEVİK.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 6- Prof. Dr. Eyüp DEBİK.....(Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 7- Prof. Dr. Sema Koç KAYHAN(Gaziantep Üniversitesi)

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Prof. Dr. Murat Pala	pala@adiyaman.edu.tr	İnşaat Mühendisliği , Deprem, Betonarme
Prof. Dr. Atilla AKKOYUNLU	akkoyun@boun.edu.tr	Çevre Bilimleri ve Mühendisliği
Dr. Öğr. Üyesi Bayram YURT	byurt@bingol.edu.tr	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği
Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÜRKER	fkurker@adiyaman.edu.tr	Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektrik Enerjisi ve Güç Sistemleri, Elektrik Tesisleri
Doç. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU	dilekoglu@harran.edu.tr	Çevre Bilimleri ve Mühendisliği, Çevre Kimyası, Su Kaynakları Yönetimi, Su ve atıksu arıtma
Doç. Dr. Harun TÜRKMENLER	hturkmenler@adiyaman.edu.tr	Arıtma Tesisi Tasarımı, Çevre Kimyası, Su ve atıksu arıtma, Toprak Kirliliği ve Kontrolü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları
Prof. Dr. İsmail BOZKURT	ibozkurt@adiyaman.edu.tr	Makine Mühendisliği, Enerji, Termodinamik, Yenilenebilir Enerji Sistemleri
Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK	kerim.kucuk@deu.edu.tr	Maden Mühendisliği, Kaya Mekaniği ve Tahkimat, Maden Tasarımı, İşletme ve Ekonomisi, Madencilik Yöntemleri ve Maden Sistem Analizi, Madenlerde İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı
Doç. Dr. Miraç UÇKUN	m.uckun@adiyaman.edu.tr	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği
Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT	mesit@adiyaman.edu.tr	Atmosfer Bilimleri, Hidroloji
Doç. Dr. Mustafa ASLAN	maslan@harran.edu.tr	Su ve atıksu arıtma, Yenilenebilir Enerji Kaynakları
Dr. Öğr. Üyesi Saadin OYUCU	saadinoyucu@adiyaman.edu.tr	Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği, Bilgisayar Sistem Yazılımı, Bilgisayar Yazılımı, Gömülü Sistemler, Veri Tabanları, Yapay Zeka
Doç. Dr. Senem TEKİN	senemtekin@adiyaman.edu.tr	Yer Bilimleri ve Mühendisliği, Deprem, Uygulamalı Jeoloji
Doç. Dr. Şerif ÇİTİL	scitil@adiyaman.edu.tr	Makine Mühendisliği
Doç. Dr. Seval UYANIK	suyanik@adiyaman.edu.tr	Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği
Doç. Dr. Mihrimah ÖZMEN	mihrimah@erciyes.edu.tr	Endüstri Mühendisliği, Yöneylem Araştırması
Prof. Dr. Tanju TEKER	tanjuteker@cumhuriyet.edu.tr	İmalat Mühendisliği, Malzeme Teknolojileri
Doç. Dr. Zuhul KARAGÖZ	zgenc@adiyaman.edu.tr	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Arş. Gör. Abuzer DOĞAN	abuzerdogan@adiyaman.edu.tr	Bilgisayar Mühendisliği

İÇİNDEKİLER- CONTENTS

<i>1- SEEPAGE ANALYSIS OF A LONG-POLLUTED RIVER IN THE STEADY-STATE USING FINITE DIFFERENCE METHOD– “Research Article”</i>	
<i>UZUN KİRLETİLMİŞ BİR NEHRİN SONLU FARKLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK KARARLI HALDE SIZINTI ANALİZİ– “Araştırma Makalesi”</i>	
Şeyma Ordu, Ertuğrul Ordu, Reşat Mutlu	1-14
<i>2- DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN KESİR DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI VE DAYANIKLILIK ANALİZİ– “Araştırma Makalesi”</i>	
<i>FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER DESIGN AND ROBUSTNESS ANALYSIS FOR SPEED CONTROL OF DC MOTOR– “Research Article”</i>	
Tufan DOĞRUER	15-28
<i>3- SEISMICALLY RISKY BUILDINGS -THE DEADLOCK OF ZONING AMNESTY UPON THE EFFECTIVE INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT– “Research Article”</i>	
<i>DEPREMSEL RİSK TAŞIYAN BİNALAR -ETKİN BÜTÜNLEŞİK AFET RİSK YÖNETİMİNDE İMAR AFFI ÇIKMAZI– “Araştırma Makalesi”</i>	
Seher Beyza KARACA , Abdullah DİLSİZ	29-37
<i>4- A COMPUTER-BASED METHODOLOGY FOR MODELING THE REMOVAL OF CADMIUM ION FROM INDUSTRIAL WASTEWATER WITH RICE HUSK ASH– “Research Article”</i>	
<i>PİRİNÇ KABUK KÜLÜ İLE ENDÜSTRİYEL ATIK SUDAN KADMİYUM İYONUNUN GİDERİLMESİNİN MODELLENMESİNE YÖNELİK BİLGİSAYAR TABANLI BİR YÖNTEM– “Araştırma Makalesi”</i>	
Yasemin ŞİRİN ERYOLDAŞ, Faruk Geyik, Tuğba TAŞKIN TOK	38-53
<i>5- BİR ISI BORULU NÜKLEER REAKTÖRDE ISI LİMİTASYONLARININ ANALİZİ– “Araştırma Makalesi”</i>	
<i>ANALYSIS OF HEAT LIMITATIONS IN A HEAT PIPE NUCLEAR REACTOR– “Research Article”</i>	
Gizem BAKIR	54-65

6- PAMUK İPLİKHANESİNDEKİ TELEFLERİN ANALİZİ – “Araştırma Makalesi”

ANALYSES OF COTTON FIBER WASTES FROM A SPINNING MILL – “Research Article”

Tuba BEDEZ ÜTE, Pınar ÇELİK..... 66-78

7- TÜRKİYE’DE LI-ION PİL ÜRETİMİ YATIRIMLARI – “Araştırma Makalesi”

LI-ION CELL MANUFACTURING INVESTMENTS IN TÜRKİYE – “Research Article”

Ahmet Turan ÖZDEMİR..... 79-86

SEEPAGE ANALYSIS OF A LONG-POLLUTED RIVER IN THE STEADY-STATE USING FINITE DIFFERENCE METHOD

Şeyma Ordu^{1*}, Ertuğrul Ordu², Reşat Mutlu³

¹ Environmental Engineering Namık Kemal University Çorlu, Tekirdağ, Turkey

² Civil Engineering Namık Kemal University Çorlu, Tekirdağ, Turkey

³ Electronics and Telecommunication Engineering Namık Kemal University Çorlu, Tekirdağ, Turkey

Geliş Tarihi/Received Date: 28.07.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.01.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1150091

ABSTRACT

It is very important to analyze the polluted water that streams transfer around them by diffusion. Dirty water leaking from streams like this causes soil and water pollution. The protection of surface and underground water resources is very important given the decreasing water resources. How deep a pollutant has infiltrated can be found by solving the diffusion equation. In this study, the concentration amount of the pollutant passing from a long-polluted stream to the soil was investigated by the finite difference method. Instead of using expensive packet programs, a widespread program Matlab used by engineers and scientists to analyze data, develop algorithms, solve problems analytically and numerically, and create models is preferred in this study. The cross-section of the stream is rectangular and its length is considered to be quite long. Therefore, the problem has been examined in two dimensions. First, the necessary finite difference equations are derived and this problem is analyzed using appropriate boundary conditions. A numerical solution has been obtained for two cases in which the bottom of the stream is permeable and it is not. The mass flow rate of both of the cases was calculated and it is found that the mass flow rate in the first case in which the bottom of the stream is permeable is almost double of the second case. The flow velocities on the boundaries have been found to be less in the case in which the bottom of the stream is impermeable.

Keywords: *Spilled Pollutants Analysis, Finite difference method, River pollution*

UZUN KİRLLETİLMİŞ BİR NEHRİN SONLU FARKLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK KARARLI HALDE SIZINTI ANALİZİ

ÖZET

Akarsuların etraflarına difüzyon yolu ile aktardıkları kirli suyun analizi oldukça önemlidir. Bu akarsulardan sızan kirli su toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır. Yüzey ve yeraltı su kaynaklarının korunması giderek azalan su kaynakları dikkate alındığında çok önemlidir. Bir kirleticinin ne kadar derine sızdığı difüzyon denklemi çözülerek bulunabilir. Bu çalışmada atıksularla kirlenmiş uzun bir dereден toprağa geçen kirleticinin konsantrasyon miktarı sonlu farklar yöntemi ile incelenmiştir. Bu çalışmada pahalı paket programlar kullanmak yerine mühendisler ve bilim insanlarının verileri analiz etmek, algoritma geliştirmek, problemleri analitik ve sayısal olarak çözmek ve model oluşturmak için kullandıkları yaygın bir program olan Matlab tercih edilmiştir. Derenin kesiti dikdörtgen alınmış ve boyu oldukça uzun kabul edilmiştir. Bundan dolayı problem iki boyutta incelenmiştir. Önce gerekli sonlu farklar denklemleri türetilmiş ve uygun sınır şartları kullanılarak problem analiz edilmiştir. Akarsuyun tabanının geçirimli olduğu ve olmadığı iki durum için sayısal çözüm elde edilmiştir. Her iki durumun kütleli debisi hesaplanmış ve akarsuyun tabanının geçirimli olduğu birinci durumdaki kütleli debinin, ikinci durumun neredeyse iki katı olduğu bulunmuştur. Akarsu tabanının geçirimsiz olması durumunda sınırlardaki akış hızlarının daha az olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Dökülen Kirletici Analizi, Sonlu farklar yöntemi, Akarsu kirliliği*

¹e-posta: sordu@nku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5097-2815> (Sorumlu Yazar)

²e-posta: eordu@nku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8877-5617>

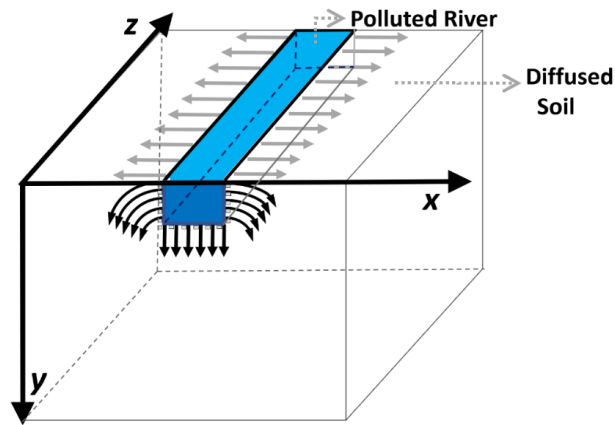
³e-posta: rmutlu@nku.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0030-7136>

1. Introduction

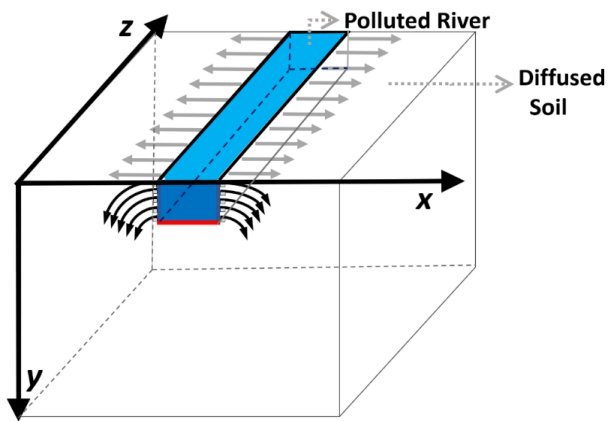
Water pollution is the mixing of substances that harm the living creatures in the water, threaten human health, prevent economic activities such as fishing, and adversely affect water quality. Due to the increasing industry and population density, pollution is increasing especially in the vicinity of the rivers near the settlements. This pollution is caused by the discharge of domestic and industrial wastewater into rivers without treatment or as a result of insufficient treatment. In addition, wastewater contaminated with pesticides and fertilizers reaches the river beds with the surface flow. As a result, the usability of water resources such as drinking and utility water or agricultural irrigation water decreases considerably [1]. Diffusion is the movement of molecules one by one and randomly, depending on the difference in concentration, from a medium in which they are concentrated to another medium in which they are less dense. Diffusion is expressed by Fick's law [2]. The motion of the molecules is related to the temperature and their kinetic energy is directly proportional to the temperature. As the temperature increases, the rate of movement and diffusion increases [3]. The coefficient used to model the passage of water through the voids in the ground under influence of gravity is called permeability [4]. The permeability coefficient varies according to the porosity and type of soil [5]. The diffusion equation is an equation that describes the diffusion of particles or different physical quantities [6]. The finite difference method is a very useful numerical solution method that provides an approximation for the solution of the diffusion equation. This method is a numerical method based on providing an approximate solution to operations by using the values of a given function at different data points. Finite difference expressions can be easily reached for applications in Cartesian coordinates with defined boundary conditions in two dimensions [6,7]. The finite difference method is the easiest of the numerical method to be applied and therefore it is frequently used in the solution of diffusion equations [8,9]. Polluted waters flowing from streams contaminated with wastewater can penetrate into the surrounding soil [10–12]. Measuring the pollutant concentration within the soil is costly and time-consuming [13]. It is an important value that may define whether the underground water sources are drinkable or not or whether the plants in the region are edible or not. Shackelford presented the equations describing the diffusion process in steady and transient states and the factors affecting diffusion [14]. Experiments which are done for finding pollutant concentration are quite expensive. That's why numerical methods are used instead of performing costly experiments or decreasing the number of experiments required. There are studies in the literature examining the diffusion from water sources to the soil using finite differences because of these reasons. Weeks et al. have used the finite difference method to study pollutant transport in an unsaturated region for the first time [15]. Noye and Tan [16] used an advantageous discretization method with a modified partial differential equation to solve the one-dimensional diffusion equation. Later, they also developed this technique for the two-dimensional diffusion equation [17]. Lardner and Song used the finite difference method to model the two-dimensional and three-dimensional transport due to a point source pollutant [18]. A 9 m long section of a stream with a flow velocity of 0.8 m/s in downstream has been examined and a solution using the finite difference method has been developed in [19]. The work of Kaczmarek et al. showed the effect of diffusion and advection processes on the development of structural damage in clay barriers using a one-dimensional finite difference method [20]. Lastochkin and Favelukis studied a situation in which the diffusion coefficient depends on the concentration using the finite difference method [21]. Kaçur et al. defined a finite difference approach scheme for the solution of pollutant transport problems by diffusion and adsorption in the stability and instability modes [22]. Craig and Rabideau investigated the connection of pollutant transport with water quality in their studies, in which they obtained various solutions with the finite difference method [23]. Sayed et al. developed a distribution model and applied it to the St. Lawrence River [24]. Zhang et al. modeled pollutant transport in saturated soils with the two-dimensional finite difference method [25]. An axisymmetric spilled pollutant problem in steady-state was analyzed with the finite difference method [26]. In this study, the pollutant diffusion from a long-polluted stream with a rectangular cross-section into the surrounding soil has been examined using the finite difference method in the steady state. It is assumed that the soil is homogenous and isotropic. The soil temperature and permeability are taken to be constant for the solution. The diffusion equation for the problem is hard to solve in three dimensions. Since the stream is very long, the effect of the third dimension can be ignored and the problem can be reduced to a two-dimensional one. Even the two-dimensional diffusion equation

is hard to solve analytically and, to the best of our knowledge, for such boundary conditions given in this study, it does not have any analytical solutions. Plaxis or Geoslope programs that use the finite element method can be used for the analysis of the problems but they are expensive. Matlab™ is a scientific calculation program used to solve differential equations and matrix systems [27]. That's why 2016a version of Matlab is used in the finite difference solution of the pollutant problem due to its cheapness and availability. The problem has been analyzed using the finite difference method in a Cartesian coordinate system in two dimensions. The distribution of the pollution concentration is normalized and given in two dimensions. The velocity of the pollutant within the surrounding soil is also calculated numerically by post-processing of the solved pollutant concentration using Darcy's law in vector form and is also drawn. The needed plots of the pollutant concentration and velocity within the earth are given. The pollutant problem has been solved for the two cases: the bottom of the stream is permeable in the first one and it is not in the second one. The boundary velocities and the mass flow rate per unit length of both cases are compared for both cases.

This paper is arranged as follows. In the second section, the pollutant problem is described and its finite difference solution is derived. In the third section, the problem is solved and the velocity of the pollutant is also calculated numerically. The solutions of the pollutant concentration and velocity field lines and equipotential concentration lines are given. The paper is finished with the conclusion section.



(a)



(b)

Figure 1. The spilled pollutant problem. a) the bottom of the river is permeable and b) the bottom of the stream is not permeable

2. Definition of the Problem and Derivation of Its Solution with Finite Difference Method

The polluted water or the pollutant is leaking from the stream into the ground as shown in Figure 1. Two cases of pollutant diffusion shown in Figure 1 are considered. In the first case, the bottom of the river is permeable as shown in Figure 1.a. In the second case, the bottom of the river is not permeable, i.e., the pollutant cannot leak into the ground from the bottom of the stream as shown in Figure 1.b. The pollutant leaks into the ground through the stream's rectangular cross-section in both cases. The problem is examined in the x-y plane in both cases. The stream is assumed to be flowing on the z-axis. The soil is assumed to be homogenous and isotropic. Therefore, the problem is two-dimensional. The defined problem is examined using Cartesian geometry. The pollutant density is assumed to be zero under a chosen depth, which can be taken as a big number such as a kilometer, and also at a predefined horizontal distance away from the stream. The predefined horizontal distance is also taken to be one kilometer. It is so often the solution of the different physical problems defined with similar differential equations is found to be the same. For example, a solution to a heat conduction problem may be found in an electromagnetic textbook [28,29]. The diffusion equation has the same form as the heat conduction equation. In this study, the solution to the problem has been inspired by the finite-difference solution of the capacitance of the water sensor given in [30].

If the permeability is constant, the diffusion equation in the Cartesian coordinates is given as

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \Delta u = \alpha \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

In steady state, Eq. (1) turns into

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Therefore,

$$\Delta u = 0 \quad (3)$$

In Cartesian coordinates, the Laplacian of the concentration of the pollutant is given as

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

where the x, y, and z are dimension components of Cartesian coordinates. The concentration of the pollutant $u(x,y,z)$ within the earth may be taken as only dependent on x and y coordinates since the river is assumed to be very long or the problem can be taken to be two-dimensional. Therefore,

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ and } \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Thus, Eq. (4) is reduced to

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

Using finite difference, second-order partial derivatives of the pollutant concentration can be approximated as

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cong \frac{u(x + \Delta x, y) - 2u(x, y) + u(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2} \quad (7)$$

and

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \cong \frac{u(x, y + \Delta y) - 2u(x, y) + u(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2} \quad (8)$$

By submitting Eq. (5) and (6) into Eq. (4):

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ &\cong \frac{u(x + \Delta x, y) - 2u(x, y) + u(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2} + \frac{u(x, y + \Delta y) - 2u(x, y) + u(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2} = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

The pollutant concentration of point (x, y) can be found as

$$u(x, y) = \frac{1}{(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2)} \left(\frac{u(x + \Delta x, y) + u(x - \Delta x, y)}{2\Delta x^2} + \frac{u(x, y + \Delta y) + u(x, y - \Delta y)}{2\Delta y^2} \right) \quad (10)$$

If $\Delta x = \Delta y$,, the pollutant concentration of point (x, y) becomes

$$u(x, y) = \frac{u(x + \Delta x, y) + u(x - \Delta x, y) + u(x, y + \Delta y) + u(x, y - \Delta y)}{4} \quad (11)$$

The pollutant gradient is calculated as

$$\text{gradu} = \frac{\partial u}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{e}_z \quad (12)$$

The components of the gradient of the pollutant concentration in the Cartesian coordinates are given as

$$-\frac{\partial u}{\partial x}, \quad -\frac{\partial u}{\partial y} \quad (13)$$

The z component of the pollutant concentration is taken to be zero since the finite difference method is applied in two dimensions to the problem. Thus, the pollutant concentration does not depend on z-coordinate:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

Respectively, the x and y components of the pollutant concentration gradient can numerically be approximated as

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \cong -\frac{u(x + \Delta x, y) - u(x, y)}{\Delta x} \quad (15)$$

and

$$-\frac{\partial u}{\partial y} \cong -\frac{u(x, y + \Delta y) - u(x, y)}{\Delta y} \quad (16)$$

The gradient of the concentration of the pollutant is

$$\text{grad}u = \frac{\partial u}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{e}_z \quad (17)$$

To calculate the velocity of the pollutant, Darcy's law in vector form is to be used:

$$\vec{v} = -k \text{grad}(u) \quad (18)$$

$$\vec{v} = v_x \vec{e}_x + v_y \vec{e}_y + v_z \vec{e}_z \quad (19)$$

where k is the permeability of the earth, is the pollutant velocity vector and v_x , v_y , and v_z are its components in Cartesian coordinates. v_z is equal to zero due to two-dimensional nature of the problem.

Numerically, the velocity vector components can be calculated as

$$v_x = -k \frac{\partial u}{\partial x} \cong k \frac{u(x,y) - u(x+\Delta x,y)}{\Delta x} \quad (20)$$

and

$$v_y = -k \frac{\partial u}{\partial y} \cong -\frac{u(x,y) - u(x,y+\Delta y)}{\Delta y} \quad (21)$$

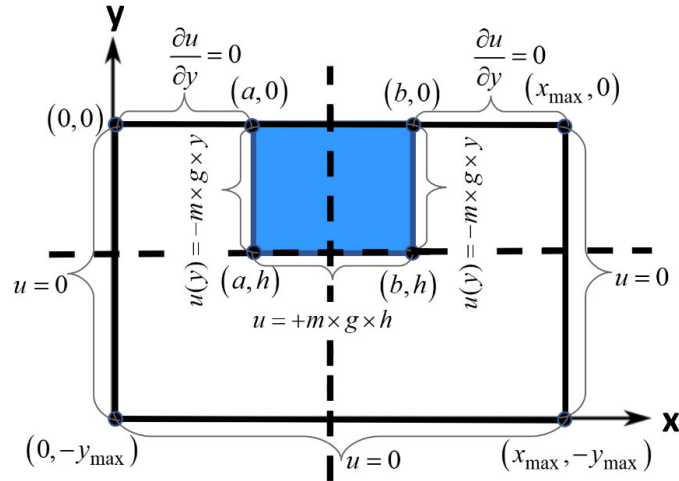
The mass flow rate of the system can be calculated using the surface integral on the outer boundaries of the system:

$$\dot{m} = \iint_S \rho \cdot \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (22)$$

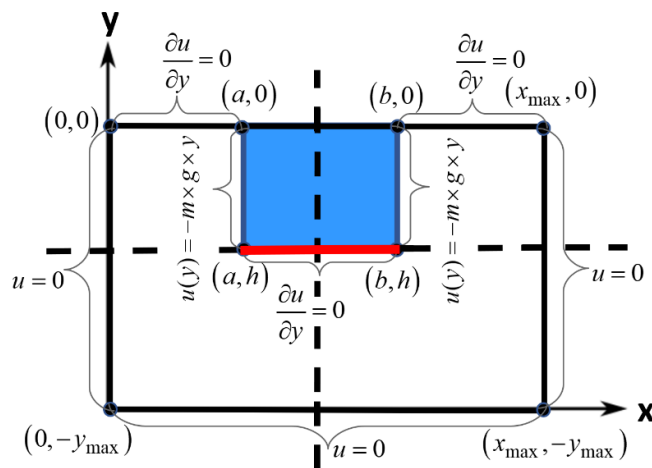
where ρ is the density of the pollutant.

The boundary conditions of both of the cases are shown for two cases in Figure 2. The first case shown in Figure 2.a can be described the follows. The boundary conditions of u or are assumed to be zero at $x=x_{\max}$ and at $y=-y_{\max}$, which are Dirichlet conditions. At $y=0$ and for $0 < x < a$, $\frac{\partial u}{\partial y}$ is zero that is a Neumann condition. At $y=0$ and for $x > b$, $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, that is also a Neumann condition. At $y=h$ and for $a < x < b$, u is constant and equal to mgh that a Dirichlet condition. At $x=a$ and for $h > y > 0$, $u = mgy$ that is a Dirichlet condition. At $x=b$ and for $h > y > 0$, $u = mgy$ that is also a Dirichlet condition.

The second case shown in Figure 2.b can be described the follows. The boundary conditions of u or are assumed to be zero at $x=x_{\max}$ and at $y=-y_{\max}$, which are Dirichlet conditions. At $y=0$ and for $0 < x < a$, $\frac{\partial u}{\partial y}$ is zero that is a Neumann condition. At $y=0$ and for $x > b$, $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$, that is also a Neumann condition. At $y=h$ and for $a < x < b$, $\frac{\partial u}{\partial y}$ is constant and equal to zero that is a Neumann condition. At $x=a$ and for $h > y > 0$, $u = mgy$ that is a Dirichlet condition. At $x=b$ and for $h > y > 0$, $u = mgy$ that is also a Dirichlet condition.



(a)



(b)

Figure 2. The definition and the boundary conditions of the problem for the case a) the bottom of the river is permeable and b) the bottom of the stream is not permeable

A flowchart of the solution algorithm is given in Figure 3. The code first produces the concentration matrix. It starts the iteration with Gauss-Seidel Method by scanning the grid points and calculates the point considering the boundary conditions. If the point is not on any boundary Eq. 11 is used to calculate its value. If the point is on a Dirichlet boundary, its calculation is skipped. If it is on a Neumann boundary, the value of the closest point on the parallel line to the Neumann boundary is assigned to its value. The algorithm scans all the points till their relative error values fall under the predefined value of 0.5%. A code is written in Matlab 2016a to simulate the diffusion phenomenon. It is well-known that the finite difference method converges for Laplace and Poisson equations. If an advection term would exist, its convergence should have been verified but the advection term did not exist in our equations in this study.

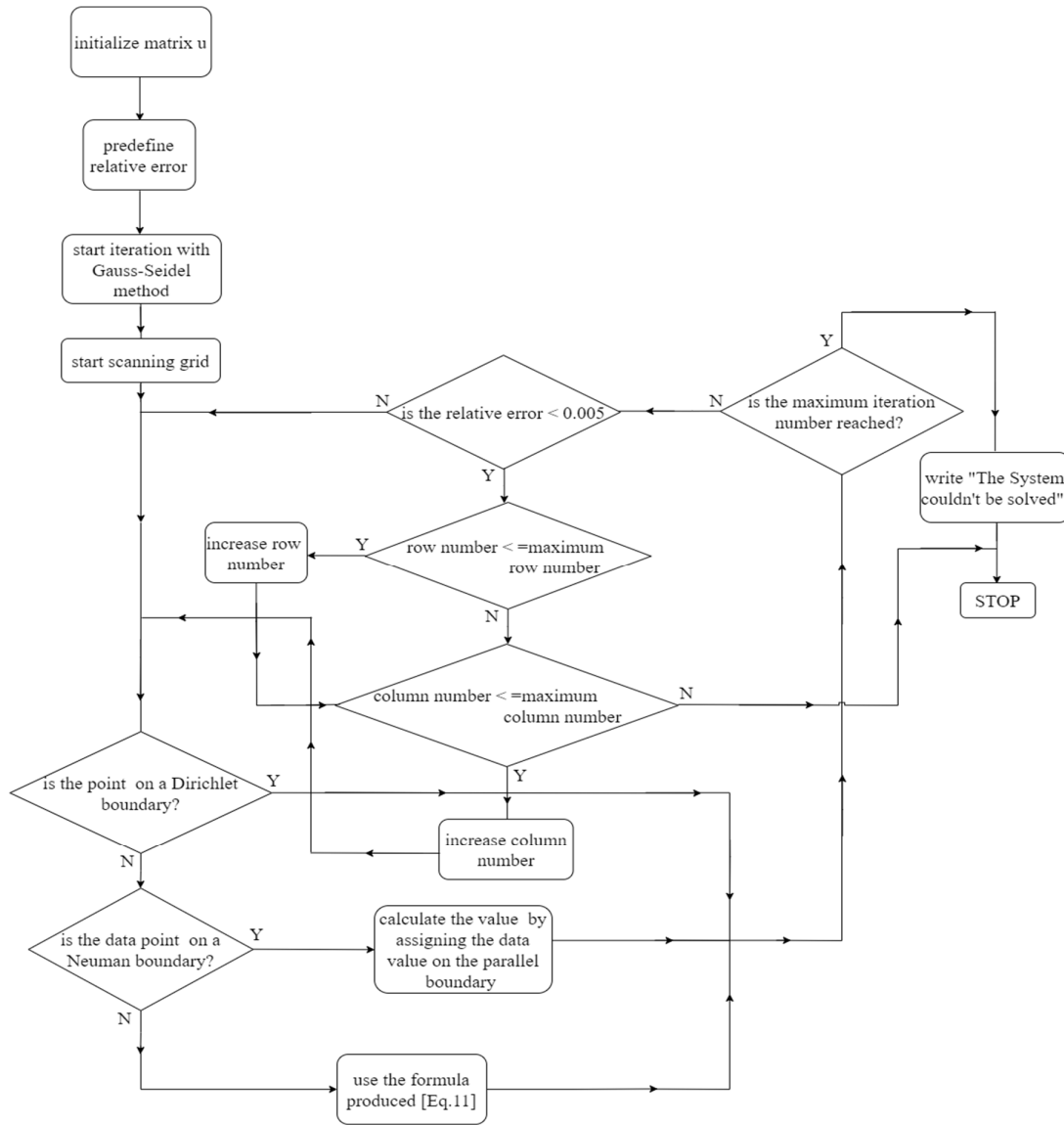


Figure 3. Flowchart of the solution algorithm.

3. Simulation Results and Discussion

Two cases given in Figure 1 are considered in this study. The written code is run for both of the cases. For the first case, the normalized pollutant concentration distribution is shown in Figure 4. The pollutant concentration is linearly dependent on the stream's height on the interface boundaries of the stream and the soil. It is zero at the ground level. The pollutant concentration decreases starting from the interface boundaries of the stream and the soil and falls down considerably at a distance of around half of the stream width as shown in Figure 4. There is a ripple in the pollutant concentration on the ground level near the stream on the Neumann boundaries. The pollutant concentration is maximum on the edges of the stream since the pressure is also maximum on the edges. The velocity field lines for the first case are shown in Figure 5.a. The pollutant velocity is much higher on the edges of the stream and it is maximum at bottom of the stream. On the left and right boundaries, the horizontal pollutant velocity is maximum on the surface (at $y=0$), starts decreasing with a small slope till around the height of the stream, and then starts falling with a higher slope and reaches zero at $y=-y_{\max}$. The vertical pollutant speed on the bottom boundary is

almost parabolic and it becomes maximum in the middle of the bottom boundary. The maximum pollutant speed on the bottom boundary is almost triple of the maximum speed on the left and right boundaries. The color map of the pollutant concentration within the soil is shown in Figure 5.b. The pollutant concentration is higher in the regions around and close to the stream as can be seen from the bright colors in the colormap.

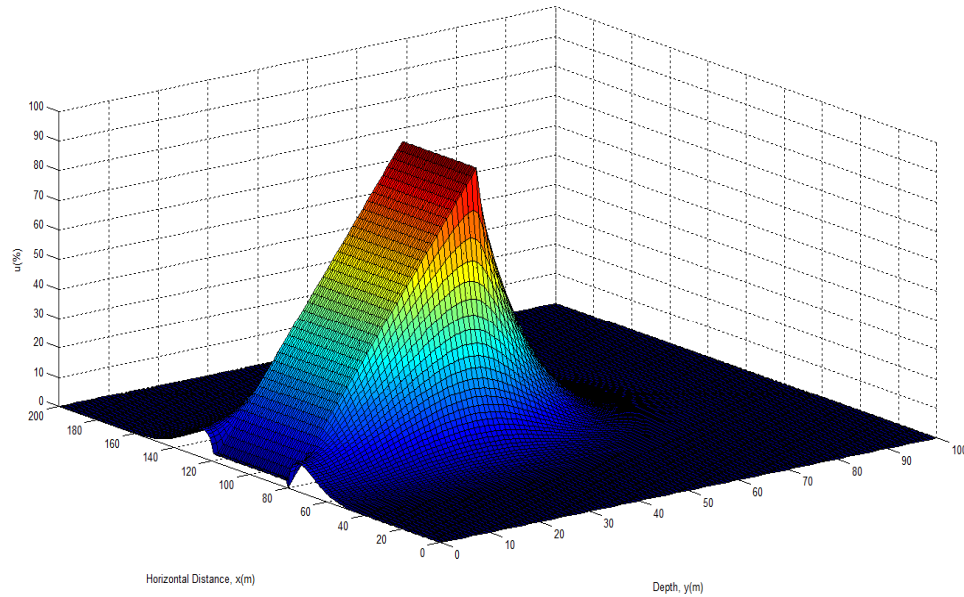
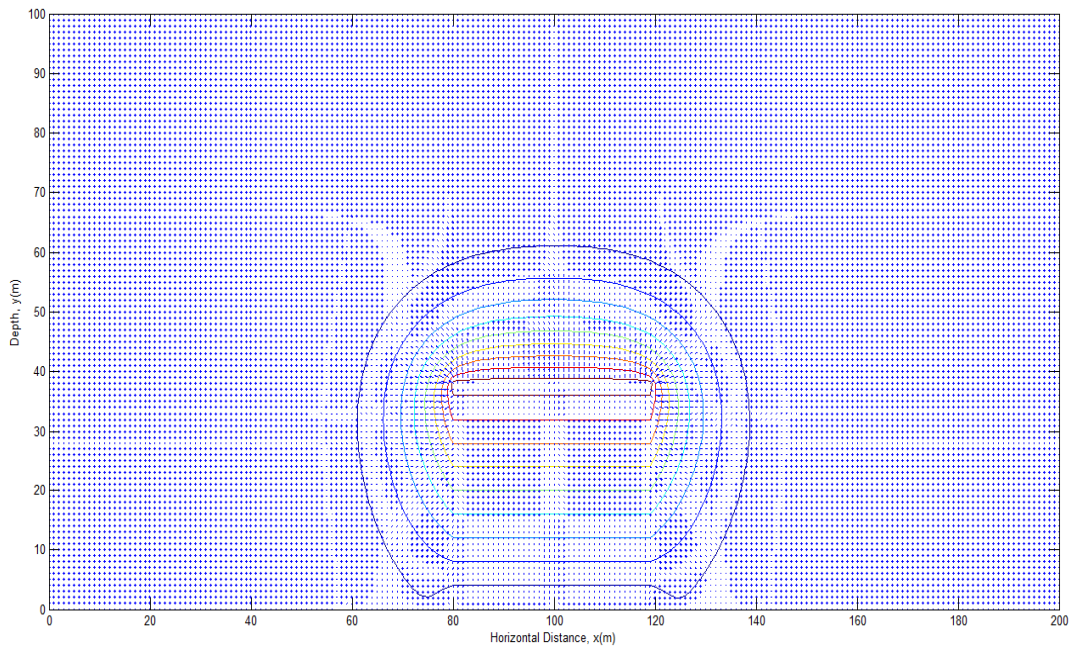
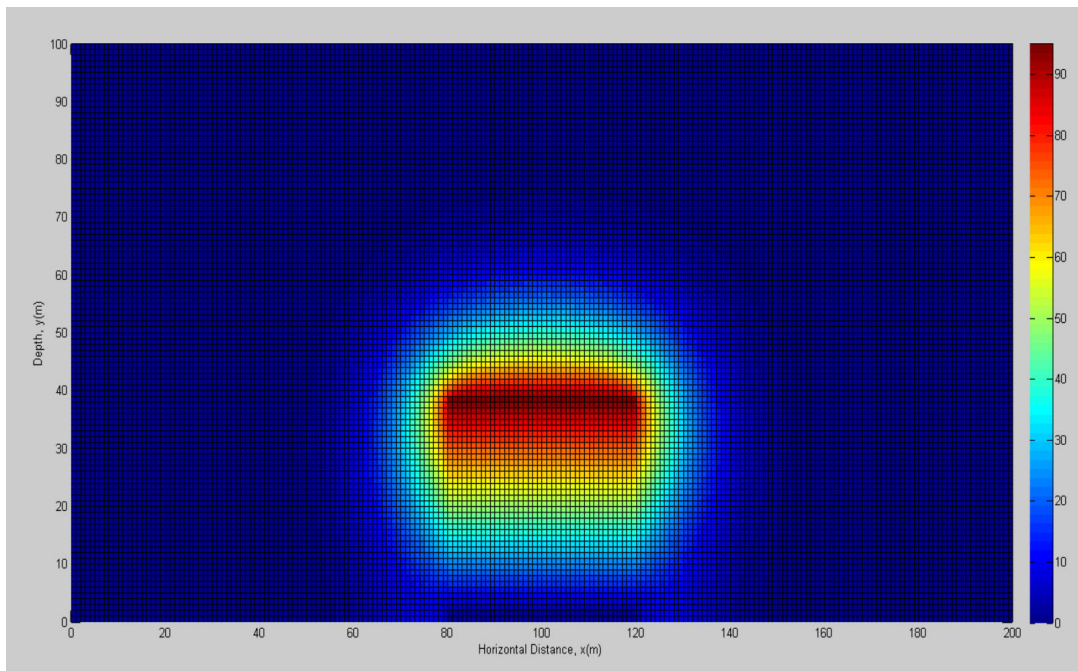


Figure 4. The concentration distribution versus the horizontal distance and height within the soil for the case the bottom of the river is permeable

For the second case, the normalized pollutant concentration distribution is shown in Figure 6. The pollutant concentration is linearly dependent on the stream's height on the interface boundaries of the stream and the soil also in this case except for the bottom of the stream which is impermeable. It is zero at the ground level. The pollutant concentration decreases starting from the left and right interface boundaries of the stream and the soil and falls down considerably at a distance of around half of the stream width as shown in Figure 6. It gets more concentrated as the water depth increases. In this case, there is also a ripple in the pollutant concentration on the ground level near the stream on the Neumann boundaries. The pollutant concentration is also maximum on the edges of the stream in this case since the pressure is also maximum on the edges even though the bottom of the stream is impermeable. The velocity field lines for the second case are shown in Figure 7.a. The pollutant velocity is much higher on the edges of the stream and it is zero on the impermeable bottom of the stream. The pollutant velocity increases as the water depth increases. It is maximum on the edges of the stream but the tangential velocity is zero on the bottom of the stream since it is not permeable. On the left and right boundaries, the horizontal pollutant velocity is maximum on the surface (at $y=0$), starts decreasing with a small slope till around the height of the stream, and then starts falling with a higher slope and reaches zero at $y=-y_{\max}$. The vertical pollutant speed on the bottom boundary is almost parabolic and it becomes maximum in the middle of the bottom boundary. The maximum pollutant speed on the bottom boundary is just 20% higher than the maximum speed on the left and right boundaries as shown in Figure 7.a. The pollutant concentration is higher in the regions around and close to the stream as can be seen from the bright colors in the colormap in Figure 7.b. However, in this case, it is the lowest on the bottom of the stream as seen from the blue color since it is impermeable.



(a)



(b)

Figure 5. a) The equi-concentration surfaces and velocity field lines within the soil and b) Colormap of the concentration for the case the bottom of the river is permeable

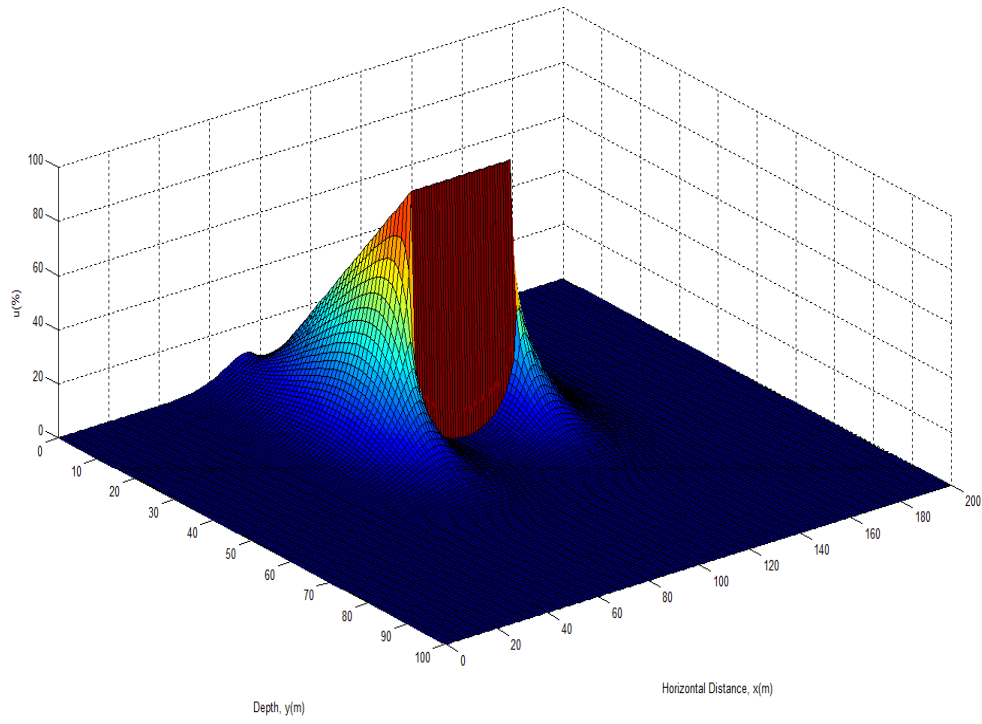
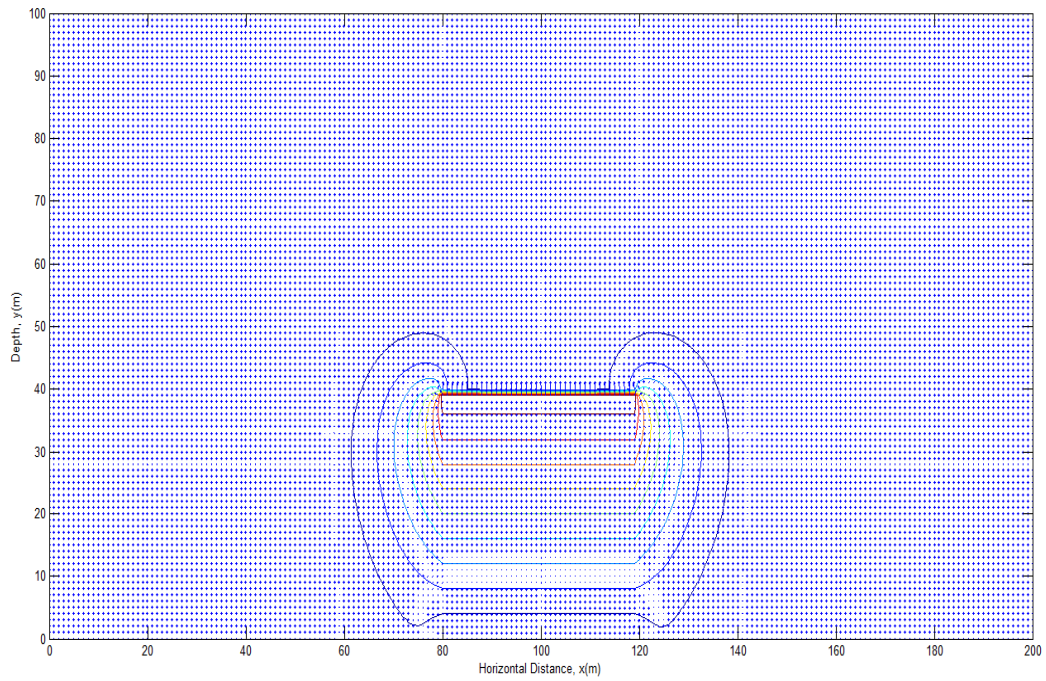
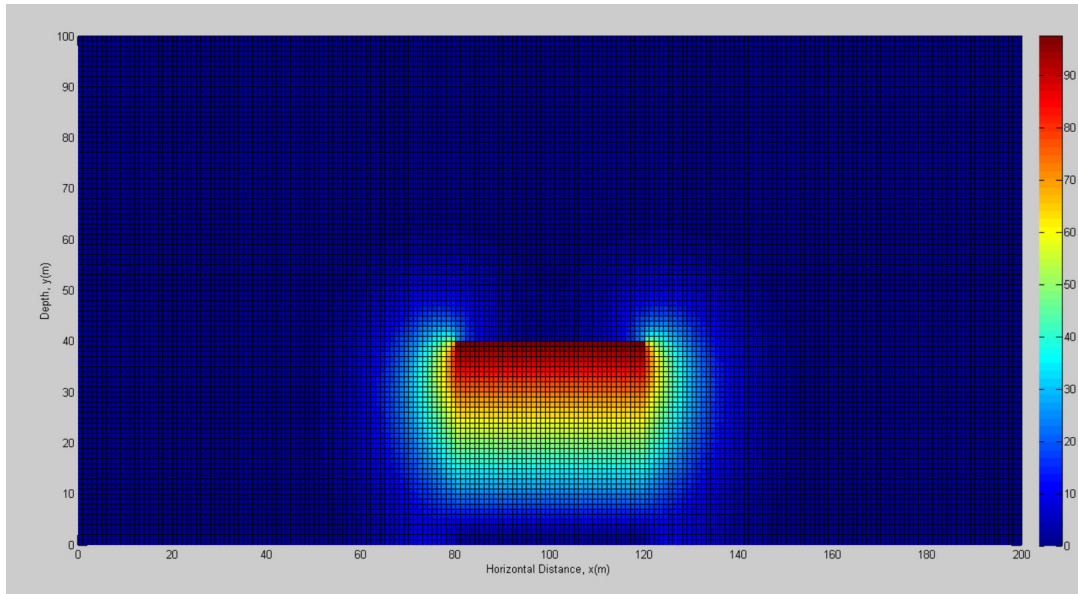


Figure 6. The concentration distribution versus the horizontal distance and height within the soil for the case the bottom of the river is not permeable



(a)



(b)

Figure 7. a) The equi-concentration surfaces and velocity field lines within the soil and b) Colormap of the concentration for the case the bottom of the river is not permeable

The mass flow rate of both of the cases is calculated and it is found that the mass flow rate is almost double of the second case. The maximum speed on the left and right boundaries was almost the same in both cases. However, the average speed on the left and right boundaries in the first case was almost twice of the second case. The maximum speed on the bottom boundary in the first case was almost 50% higher than in the second case. The average speed on the bottom boundary in the first case was slightly greater than five times in the second case. The results of the comparison indicate that the values are lower if the bottom of the stream is impermeable.

4. Conclusion

Examination of pollutant diffusion within the soil is a very important problem. The Laplace equation in two dimensions in the steady-state is solved using the finite difference method assuming that the soil temperature and permeability are constant, and the soil is homogenous and isotropic. Then, the gradient of the pollutant concentration is calculated numerically and the pollutant speed is calculated using the permeability and its gradient. The mass flow rate has also been calculated by numerical integration of the pollutant concentration velocity on the boundary area. In this paper, instead of using expensive packet programs, using Matlab is suggested for its cheapness and widespread availability to solve the seepage problem. Its numerical and visualization abilities can easily overcome the tasks required in this study. A two-dimensional pollutant diffusion problem from a stream into the soil using finite differences is solved for two cases. The bottom of the stream is permeable in the first case and vice versa. Their comparisons are made. The mass flow rate in the first case is found to be twice the impermeable case. Also, the pollutant velocities on the left, right, and bottom boundaries of the examined problem are found to be less in the second case. This has been expected since the pollutant would leak less into the ground due to the decrease of the leakage area since the bottom of the stream is not permeable.

The soil is actually not a homogenous medium. This method given here can be extended to be used in

more sophisticated diffusion problems perhaps with nonhomogeneous soil regions and irregular boundary and interface boundary conditions.

Conflict of Interest Statement

The authors of the article declare that they do not have any personal or financial conflicts of interest with any institution, organization, or person.

References

- [1] Davis ML, Cornwell DA. Introduction to environmental engineering. WCB McGraw-Hill; 1998.
- [2] Flynn G, Yalkowsky SH, Roseman T. Mass transport phenomena and models: theoretical concepts. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 1974;63:479–510.
- [3] Desai CS, Zaman M. Advanced geotechnical engineering: Soil-structure interaction using computer and material models. CRC Press; 2013.
- [4] Das BM, Das B. Advanced soil mechanics. vol. 270. Taylor & Francis New York; 2008.
- [5] Wanielista M, Kersten R, Eaglin R. Hydrology: Water quantity and quality control. John Wiley and Sons; 1997.
- [6] Das BM, Sobhan K. Principles of geotechnical engineering, Cengage Learning. Stamford, Connecticut 2010.
- [7] Kiusalaas J. Numerical methods in engineering with Matlab®. Cambridge university press; 2005.
- [8] Chatwin P, Allen C. Mathematical models of dispersion in rivers and estuaries. *Annual Review of Fluid Mechanics* 1985;17:119–49.
- [9] Dehghan M. Weighted finite difference techniques for the one-dimensional advection–diffusion equation. *Applied Mathematics and Computation* 2004;147:307–19.
- [10] Ott WR. Environmental statistics and data analysis. Routledge; 2018.
- [11] Tychon B, Vander Borcht P, De Backer LW. Water and nitrogen transfer study through soils of a small agricultural water catchment. *Water Science and Technology* 1999;39:69–76.
- [12] Johnes PJ. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology* 1996;183:323–49.
- [13] Woiatke P, Wellmütz J, Helm D, Kube P, Lepom P, Litheraty P. Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube. *Chemosphere* 2003;51:633–42.
- [14] Shackelford CD. Diffusion of contaminants through waste containment barriers. *Transportation Research Record* 1989.
- [15] Weeks EP, Earp DE, Thompson GM. Use of atmospheric fluorocarbons F-11 and F-12 to determine the diffusion parameters of the unsaturated zone in the southern high plains of Texas. *Water Resources Research* 1982;18:1365–78.
- [16] Noye B, Tan H. A third-order semi-implicit finite difference method for solving the one-dimensional convection-diffusion equation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1988;26:1615–29.
- [17] Noye B, Tan H. Finite difference methods for solving the two-dimensional advection–diffusion equation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 1989;9:75–98.
- [18] Lardner R, Song Y. An algorithm for three-dimensional convection and diffusion with very different horizontal and vertical length scales. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1991;32:1303–19.
- [19] Sankaranarayanan S, Shankar N, Cheong H. Three-dimensional finite difference model for transport of conservative pollutants. *Ocean Engineering* 1998;25:425–42.
- [20] Kaczmarek M, Hueckel T, Chawla V, Imperiali P. Transport through a clay barrier with the contaminant concentration dependent permeability. *Transport in Porous Media* 1997;29:159–78.
- [21] Lastochkin D, Favelukis M. Bubble growth in a variable diffusion coefficient liquid. *Chemical Engineering Journal* 1998;69:21–5.
- [22] Kačur J, Malengier B, Remešiková M. Solution of contaminant transport with equilibrium and non-equilibrium adsorption. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 2005;194:479–89.
- [23] Craig JR, Rabideau AJ. Finite difference modeling of contaminant transport using analytic element flow solutions. *Advances in Water Resources* 2006;29:1075–87.
- [24] Sayed M, Serrer M, Mansard E. Oil spill drift and fate model. *Oil Spill Response: A Global Perspective*, Springer; 2008, 205–20.
- [25] Zhang Y, Wang Q, Zhang ST. Numerical simulation of Benzene in soil contaminant transport by finite

- difference method. vol. 414, Trans Tech Publ; 2012, 156–60.
- [26] Ordu S, Ordu E, Mutlu R. Axisymmetric spilled pollutant analysis in steady-state using finite difference method. *Feb-Fresenius Environmental Bulletin* 2022;9587-9592.
- [27] Gündoğdu Ö, Kopmaz O, Ceviz MA. *Mühendislik ve fen uygulamalarıyla Matlab*. Nobel Yayıncılık; 2004.
- [28] Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons; 2013.
- [29] Cengel YA. a Afshin J. Ghajar A. *Heat and Mass Transfer, 4th Edition in SI Units, Special Indian Edition*, Mcgraw Hill Education, New York, United States, 2011.
- [30] Karaoğlan HC, Mutlu R. A Water Level Sensor Design Using Finite Difference Solution and Its Coding in Matlab. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020; 3(1), 37-45.

DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN KESİR DERECELİ PID KONTROLÖR TASARIMI VE DAYANIKLILIK ANALİZİ

Tufan DOĞRUER*

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tokat, 60250, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 02.08.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 04.04.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1152949

ÖZET

Kesir dereceli PID kontrolör çoğu kontrol sisteminde geleneksel PID kontrolöre göre daha başarılı bir kontrol performansı sunar. Bu çalışmada, DC motorun hız kontrolü için kesir dereceli PID kontrolörün kullanıldığı optimizasyon-tabanlı bir metot önerilmiştir. Önerilen yöntem, optimal kesir dereceli PID kontrolör parametrelerini belirlemek amacıyla yusufoçuk algoritması ve çok-ölçütlü bir amaç fonksiyonu kullanır. Kontrol sistemlerinde amaç fonksiyonu oluşturulurken hatayı esas alan ölçütler ya da zaman cevabı özelliklerini esas alan ölçütler kullanılır. Bu çalışmada hatayı esas alan integral performans ölçütleri ve zaman cevabı özelliklerinden yüzde aşma değeri birleştirilerek bir çok-ölçütlü amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla zaman cevabı analizi ve dayanıklılık analizi yapılmıştır. Her iki analizde de güncel literatürden çalışmalarla karşılaştırmalar yapılarak, yöntemin başarısı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şekiller ve çizelgelerle sunulmuş, önerilen yöntemin DC motorun hız kontrolü için başarılı bir kontrol gerçekleştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kesir dereceli PID kontrolör, Yusufoçuk algoritması, DC motor hız kontrolü, Dayanıklılık analizi, Optimal kontrol

FRACTIONAL ORDER PID CONTROLLER DESIGN AND ROBUSTNESS ANALYSIS FOR SPEED CONTROL OF DC MOTOR

ABSTRACT

A fractional-order PID controller offers better control performance than a traditional PID controller in most control systems. In this study, an optimization-based method using a fractional-order PID controller is proposed for speed control of DC motor. The proposed method uses the dragonfly algorithm and a multi-criteria objective function to determine the optimal fractional-order PID controller parameters. In control systems, criteria based on error or based on time response specifications are used while creating the objective function. The study, a multi-criteria objective function is defined by combining the error-based integral performance index and the percent overshoot from the time response properties. Time response analysis and robustness analysis are performed to evaluate the performance of the proposed method. In both analyzes, the success of the method is tested by making comparisons with studies from the current literature. The obtained results are presented with figures and tables, and it is seen that the proposed method performs a successful control for the speed control of the DC motor.

Keywords: Fractional order PID controller, Dragonfly algorithm, DC motor speed control, Robustness analysis, Optimal control

1. Giriş

DC motorlar, günümüz dünyasının vazgeçilmez elemanlarından bir tanesidir ve kullanılmadığı endüstriyel bir uygulama hemen hemen yoktur [1]. Tercih edilmesinin ana sebepleri arasında düşük

*e-posta: tufan.dogruer@gop.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-3042> (Sorumlu Yazar)

maliyetli olmaları, dayanıklılıklarının yüksek olması ve kontrollerinin kolay olması sayılabilir. DC motorların hız kontrol uygulamalarında ya alan sargısındaki akım sabit tutulurken, armatür sargısındaki akım değiştirilir ya da bunun tam tersi yapılarak hız kontrolü sağlanır [1]. DC motorların hız kontrolü ile ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmış ve literatürde yerini almıştır. Yapılan çalışmalarda çeşitli kontrolör yapılarının kullanıldığı birçok yeni yöntem önerilmiştir.

Kontrol uygulamalarında faz ilerlemeli ve faz gerilemeli kontrolör, fuzzy kontrolör, kayan kipli kontrolör, PID (oransal-integral-türev) kontrolör gibi kontrolör yapıları kullanılmaktadır. Bunların içerisinde PID kontrolörler, yapısının basit olması, verimliliği, uygulama kolaylığı ve anlaşılmasının kolay olması gibi sebeplerden dolayı klasik kontrolde sıklıkla tercih edilirler. Kesir dereceli matematik ile ilgili gelişmeler bu alana olan ilgiyi üzerinde toplamış ve son otuz yıldır kontrol alanında da uygulamaları hızla çoğalmıştır. Kesir dereceli PID kontrolör (FOPID) yapısı bu duruma verilebilecek en iyi örneklerden birisidir. Geleneksel PID kontrolör yapısındaki integral ve türev derecelerinin kesir dereceli olması sonucu ortaya çıkan kesir dereceli PID kontrolörler, DC motor hız kontrolünde bazı avantajlar sağlamaktadır. İkinci ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışmada, DC motorun hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolörle gerçekleştirmiş ve elde ettikleri sonuçları literatürden farklı yöntemlerle tasarlanan PID kontrolör ile gerçekleştirilmiş çalışmalarla karşılaştırmışlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile yapılan hız kontrolünün, geleneksel PID kontrolöre göre yapılan hız kontrolünden daha iyi bir performans sağladığını vurgulamışlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile yapılan hız kontrolünde özellikle yerleşme zamanının ciddi derecede azaldığı açıktır. Benzer bir çalışmayı Agarwal ve arkadaşları [3] sunmuşlardır. DC motor hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolör kullanarak gerçekleştirmiş ve kontrolör parametrelerini optimizasyon yöntemi ile ayarlamışlardır. Çalışmalarında geleneksel PID kontrolör ve kesir dereceli PID kontrolör performanslarını da karşılaştırmış ve elde ettikleri sonuçları çizelge ve şekiller ile sunmuşlardır. Kesir dereceli PID kontrolör ile daha iyi bir performans sağlandığını görebileceğimiz bir başka çalışma Hekimoğlu [4] tarafından yapılmıştır. DC motorun hız kontrolünün kesir dereceli PID kontrolör ile yapıldığı çalışmaları çoğaltmak mümkündür [5-8]. DC motorun hız kontrolünün kesir dereceli PID kontrolör ile gerçekleştirilmesinde yeni bir yöntem ortaya koyan ve mevcut kontrol performansını ileriye taşıyan çalışmalar bu alana katkı sağlayacaktır.

İlk olarak PID kontrolör parametrelerini ayarlayan yöntem Ziegler ve Nichols (1942) [9] tarafından tanıtıldı, daha sonra birkaç farklı ayar kuralı önerildi. Åström ve Hägglund (1995) [10] tarafından önerilen yöntem bunlardan birisidir. Günümüzde, kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan çok sayıda teknik bulunmaktadır. Analitik metotlar, frekans cevabı yöntemleri, adaptif yöntemler ve optimizasyon yöntemleri bunlara örnek olarak sayılabilir [11]. Bunların içerisinde optimizasyon yöntemleri günümüzde bilgisayar işlem kapasitelerinin artmasıyla birlikte sıklıkla kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Genetik algoritma (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), balina optimizasyon algoritması (WOA), gri kurt optimizasyonu (GWO), yapay arı kolonisi algoritması (ABC), manta vatozu beslenme optimizasyonu (MRFO), yusufoçuk algoritması (DA) gibi sezgisel algoritma tabanlı optimizasyon algoritmaları kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde optimal çözümler sunmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, sosyal hayvanların doğada sergiledikleri davranışlardan esinlenerek ortaya çıkan algoritmaların, optimizasyon problemlerinde klasik yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Sabir ve Khan [1] çalışmalarında sezgisel teknikleri kullanarak DC motor hız kontrolünü PID kontrolör ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, Ziegler-Nichols ve Cohen-Coon yöntemlerine göre belirledikleri PID kontrolör parametrelerine göre de kontrol gerçekleştirmişlerdir. GA ve PSO kullanarak yaptıkları tasarımların diğer klasik yöntemlere kıyasla oldukça başarılı sonuçlar sağladığını ifade etmişlerdir. Bir başka çalışmada DC motor hız kontrolü, Böbrek-ilhamlı Algoritma kullanılarak PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesiyle gerçekleştirilmiştir [12]. Çalışmalarında, DC motorun hız kontrolü için tasarlanan PID kontrolörün kapalı çevrim sisteminin yüzde aşma, yükselme zamanı ve yerleşme zamanı gibi zaman cevabı karakteristiklerini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

Optimizasyon algoritmalarında en önemli konulardan bir tanesi amaç fonksiyonunun tanımlanmasıdır. Kontrol sistemlerinde oluşan hata, hatanın integrali (IE), hatanın karesinin ortalaması (MSE), hatanın mutlak değerinin integrali (IAE), hatanın karesinin integrali (ISE), hatanın zaman ağırlıklı mutlak değerinin integrali (ITAE) ve hatanın zaman ağırlıklı karesinin integrali (ITSE) gibi performans ölçütleri ile minimize edilir [11]. Bununla beraber, sistemin zaman cevabı karakteristikleri kullanılarak amaç fonksiyonu oluşturmak mümkündür. Sistemin isterleri (yerleşme zamanı ya da maksimum yüzde aşma değerleri gibi) göz önünde bulundurularak ve daha iyisi hedeflenerek amaç fonksiyonu tanımlanabilir.

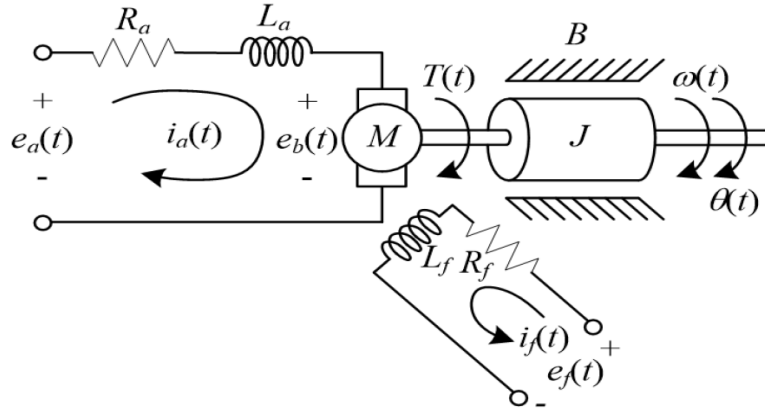
Bu makalede yapılan çalışma ve literatüre katkısı aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Bu çalışmada, DC motorun hız kontrolü, kesir dereceli PID kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrolör parametreleri yusufçuk algoritmasına dayalı bir optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada, hem integral performans ölçütleri hemde zaman cevabı özellikleri kullanılarak çok kriterli bir amaç fonksiyonu önerilmiştir.
- Çalışmada, DC motor hız kontrol sistemi için zaman cevabı ve dayanıklılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürden önemli çalışmalarla karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki şekilde organize edilmiştir. Sonraki bölüm materyal ve metod bölümüdür. Bu bölümde DC motorun matematiksel modeli ve optimizasyon yöntemi hakkında bilgi verilmiştir. 3. Bölüm simülasyon çalışmasını içerir. Bu bölümde kesir dereceli PID kontrolör tasarımları yer almaktadır. Kontrol edilen sistemin zaman cevabı performansı ve dayanıklılık analizi bu bölümde sunulmuştur. Son bölüm sonuçlar kısmını içerir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde, DC motorun matematiksel modeli verilerek transfer fonksiyonu elde edilecektir. Ardından DC motorun hız kontrolünde kullanılacak olan yusufçuk algoritması hakkında bilgi verilecektir. Son olarak, kesir dereceli PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması ele alınacaktır.



Şekil 1. DC motor hız kontrolünün eşdeğer devresi [13]

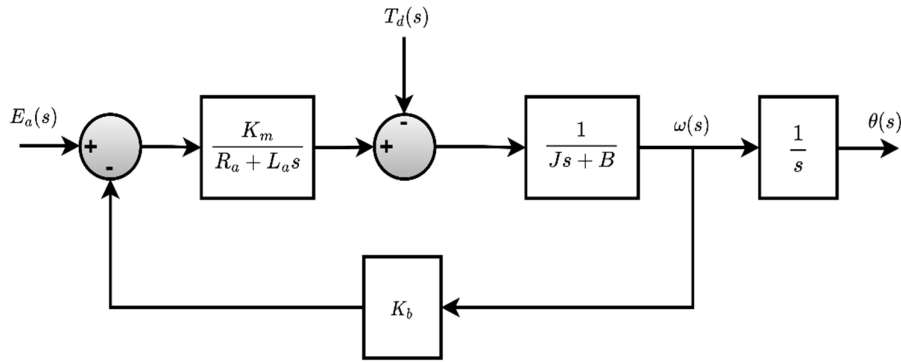
2.1. DC Motorun Matematiksel Modeli

DC motor doğru akım elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren eyleyici bir cihazdır. Motorun armatüründe (rotor) üretilen torkun büyük bir kısmı harici bir yükü sürmek için kullanılır. DC

motorun endüstride kullanılan başlıca iki tipi vardır. Bunlardan ilki sabit kutup yapısının alan bobini boyunca akım tarafından akının üretildiği geleneksel DC motordur. İkinci tip, sabit mıknatısın tel sargılı alan direkleri yerine gerekli hava aralığı akısını sağladığı fırçasız DC motordur (BLDC motor). BLDC motor, daha küçük hacim, yüksek tork ve basit yapısının avantajlarından dolayı, yüksek performanslı sürücü gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Şekil 1’de görülen bir DC motorun eşdeğer devresinde R_a ve L_a sırasıyla armatür direnci ve armatür endüktansını göstermektedir. Ayrıca, i_a armatür akımını, i_f alan akımını, e_a uygulanan armatür gerilimini, e_b ters elektromotor kuvvetini, T motor momentini, ω motor mili açısal hızını, J motorun eylemsizlik momentini, K_b elektromotor kuvveti sabitini, K_m motor momenti sabitini ve B motor sürtünme sabitini temsil etmektedir [13].

Bir DC motor modeline ait blok diyagram Şekil 2’de verilmiştir. Blok diyagrama göre DC motorun hız transfer fonksiyonu Denklem (1)’deki gibi ifade edilir.



Şekil 2. DC motor kontrol şeması

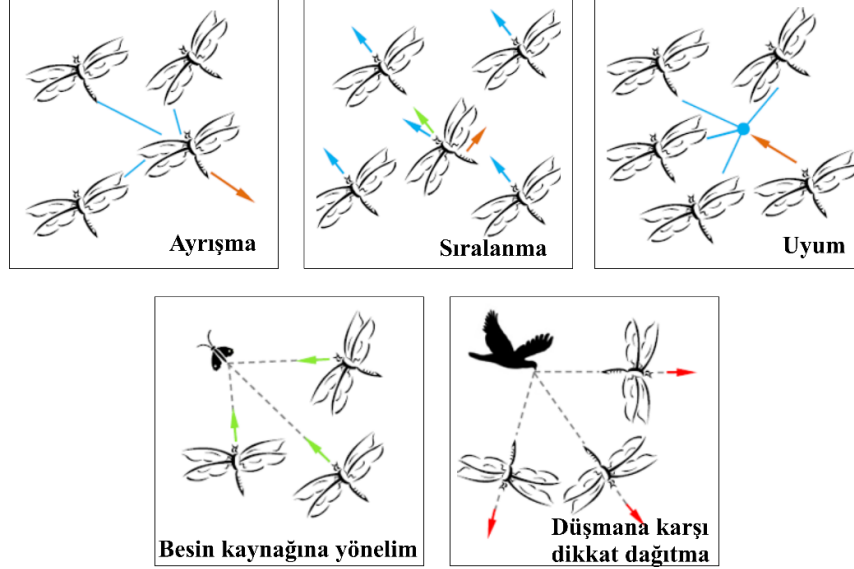
$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{[(R_a + L_a s)(J s + B) + K_b K_m]} \quad (1)$$

2.2. Yusufçuk Algoritması

Yusufçuk algoritması, sürü tabanlı bir algoritma olup, yusufçukların doğada sergiledikleri davranışlardan esinlenerek Seyedali Mirjalili [14] tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir. Yusufçuklar, doğada bulunan küçük böceklerin birçoğunu avlayan küçük avcılar olarak bilinir [14]. Yusufçukların oğul verme davranışları ilginç ve benzersiz bir davranıştır. Yusufçuklar, avlanma ve göç olmak üzere sadece iki amaç için toplanır. Beslenen sürü statik, göç eden sürü dinamik sürü olarak kabul edilir. Statik sürüde, yusufçuklar küçük gruplar oluşturur ve kelebekler ve sivrisinekler gibi diğer uçan böcekleri avlamak için küçük bir alan üzerinde ileri geri uçar [15]. Yerel hareketler ve uçuş yolundaki ani değişiklikler, statik bir sürünün ana özellikleridir. Bununla birlikte, dinamik sürülerde, çok sayıda yusufçuk, sürüyü uzun mesafelerde tek yönde göç etmek için oluşturur [16]. Statik ve dinamik sürü davranışları yusufçuk algoritmasının temel esin kaynağıdır. Bu davranışlar, keşif ve sömürü olarak adlandırılan iki ana optimizasyon aşamasına çok benzer. Yusufçukların statik bir sürüde alt sürüler oluşturması ve farklı alanlar üzerinde uçması keşif aşamasının temel amacıdır. Bununla beraber, statik sürüde, yusufçuklar daha büyük sürüler halinde ve tek bir yön boyunca uçarlar, bu da kullanım aşamasında elverişlidir.

Reynolds'a göre, sürülerin davranışı üç ilkel ilkeyi takip eder [17]. Bunlardan ilki ayrışmadır ve bireylerin çevresindeki diğer bireylerden statik çarpışmadan kaçınmasını ifade eder. İkincisi sıralanma

ya da gruplaşma davranışdır ve bireylerin çevresindeki diğer bireylerle hız eşleşmesini gösterir. Son ilke, bireylerin sürü merkezine doğru eğilimini ifade eden uyum davranışdır. Yusufçuk algoritmasında, bu üç temel ilkeye besine yönelme ve düşmandan uzaklaşma şeklinde iki ilke daha eklenmiştir. Herhangi bir sürünün temel amacı hayatta kalmaktır, bu nedenle tüm bireyler yiyecek kaynaklarına yönelmeli ve düşmanlara dikkat etmelidir. Bu iki davranış göz önüne alındığında, Şekil 3'te gösterildiği gibi, sürüdeki bireylerin konum güncellemelerinde beş ana faktör vardır.



Şekil 3. Yusufçukların sürü içerisindeki temel davranışları [14]

Yusufçuk algoritmasında, bu davranışların her biri matematiksel olarak modellenmiştir. Ayrışma ya da ayrılma davranışını hesaplamak için kullanılan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$S_i = -\sum_{j=1}^N X - X_j \quad (2)$$

Burada, N komşu bireylerin sayısını gösterirken, X mevcut bireyin konumunu ve X_j komşu bireyin j . konumunu gösterir.

Sıralanma ya da gruplaşma davranışı Denklem (3) ile ifade edilir. Denklemde V_j komşu bireyin j . hızını temsil eder.

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^N V_j}{N} \quad (3)$$

Uyum davranışı Denklem (4) ile modellenir.

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} - X \quad (4)$$

Besin kaynağına doğru yönelim aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir. Denklemde X mevcut bireyin konumunu gösterirken, X^+ besin kaynağının konumunu gösterir.

$$F_i = X^+ - X \quad (5)$$

Bir düşmana karşı oyalama ya da dikkat dağıtma davranışı aşağıdaki eşitlikle modellenir. Denklemde X mevcut bireyin konumunu gösterirken, X^- düşmanın konumunu temsil eder.

$$E_i = X^- + X \quad (6)$$

Yusufoçukların davranışlarının yukarıda verilen beş matematiksel modelin birleşiminin olduğu kabul edilir. Bir arama uzayındaki yapay yusufoçukların konumunu güncellemek ve hareketlerini simüle etmek için adım (DX) ve konum (X) vektörleri dikkate alınır. Adım vektörü, PSO'daki hız vektörüne benzerdir ve yusufoçuk algoritması, PSO algoritmasının çerçevesine dayalı olarak geliştirilmiştir. Adım vektörü Denklem (7)'deki gibi tanımlanır ve yusufoçukların hareket yönünü gösterir.

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (7)$$

Denklem (7)'de, s ayırma ağırlık katsayısı iken S_i i . bireyin ayrılmasını temsil eder. a sıralanma ağırlık katsayısıdır, A_i i . bireyin sıralanmasıdır. c uyum ağırlığını, C_i i . bireyin uyumudur. f besin faktörünü temsil ederken F_i i . bireyinin besin kaynağını temsil eder. e düşman faktördür ve E_i i . bireyin düşmanının konumunu gösterir. Ayrıca w ve t sırasıyla eylemsizlik ağırlığı ve iterasyon sayısını gösterir.

Konum vektörü ise aşağıdaki gibi hesaplanır. Denklemde t mevcut iterasyondur.

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (8)$$

Yapay yusufoçukların rastgeleliğini, stokastik davranışını ve keşfini geliştirmek için, komşu çözümler olmadığında rastgele bir yürüyüş (Le'vy uçuşu) kullanarak arama alanı çevresinde uçmaları gerekir. Bu durumda, yusufoçuk konumlarını güncellemek için Denklem (9) ve Denklem (10) kullanılır.

$$X_{t+1} = X_t + Le'vy(d) \times X_t \quad (9)$$

$$Le'vy(x) = 0.01 \times \frac{r_1 \times \sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (10)$$

Denklem 9'da t geçerli iterasyon ve d ise konum vektörlerinin boyutudur. Denklem 10'da r_1 ve r_2 $[0, 1]$ aralığında rasgele sayılardır. Aynı denklemde β ise sabit bir değerdir [14].

Yusufoçuk algoritması sözde kodu Şekil 4'te verilmiştir.

```

Yusufoçuk popülasyonu başlat,  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
Adım vektörlerini başlat,  $\Delta X_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )
while son koşul sağlanmadı
    Tüm yusufoçukların objektif değerlerini hesapla
    Besin kaynağını ve düşmanı güncelle
     $w$ ,  $s$ ,  $a$ ,  $c$ ,  $f$  ve  $e$ 'yi güncelle
    Denklemleri kullanarak  $S$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $F$  ve  $E$ 'yi hesapla
    Komşu yarıçapı güncelle
    if bir yusufoçukta en az bir komşu yusufoçuk varsa
        Hız vektörünü güncelle (Denklem 8)
        Konum vektörünü güncelle (Denklem 9)
    else
        Konum vektörünü güncelle (Denklem 10)
    end if
    Değişkenlerin sınırlarına göre yeni konumları kontrol et ve düzelt
end while

```

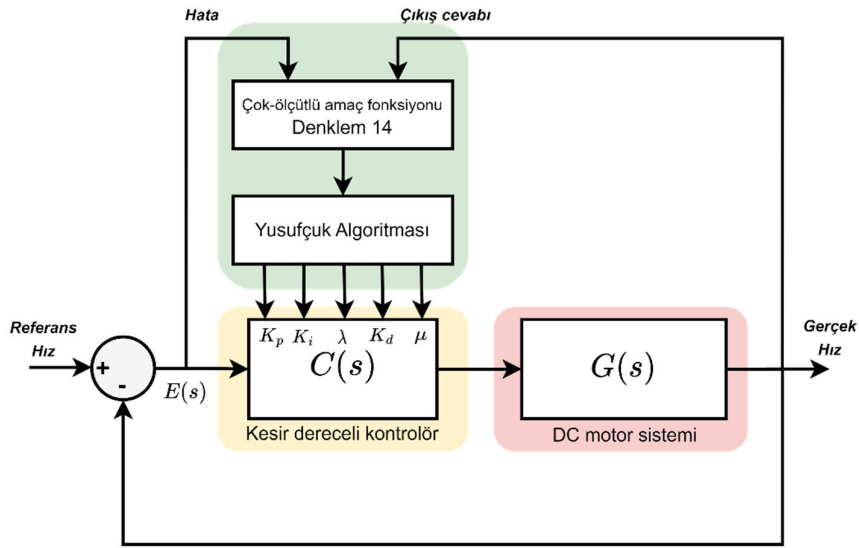
Şekil 4. Yusufoçuk algoritması sözde kodu [14]

2.3. Kesir Dereceli PID Kontrolörün Parametrelerinin Ayarlanması

Kesir dereceli PID kontrolörler, geleneksel PID kontrolörlere göre daha başarılı bir kontrol sağlarlar [18]. Bu sebeple günümüzde kesir dereceli PID kontrolörlere olan ilgi artmıştır. Bu kontrolör yapısında geleneksel PID kontrolöre göre fazladan iki parametre vardır. Bu ilave parametrelerden λ integral derecesi, μ türev derecesini ifade eder. Kesir dereceli PID kontrolörün eşitliği Denklem (11)'de verilmiştir [19, 20]. Denklemde λ ve μ değerleri 1 olarak alındığında kesir dereceli PID geleneksel PID olur.

$$C_{fopid}(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (11)$$

DC motorun hız kontrolünde kesir dereceli PID kontrolör kullanılan yapının blok diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. Şekil ayrıca optimizasyon yöntemini de içerir.



Şekil 5. Kesir dereceli PID kontrolöre dayalı DC motor hız kontrolü blok diyagramı

Kesir dereceli PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması için optimizasyon algoritmasında kullanılacak amaç fonksiyonunun tanımlanması gerekir. Kontrol sistemlerinde hatayı esas alan integral performans ölçütleri geliştirilmiştir. Bu ölçütlerden sıkça kullanılan ikisi sırasıyla ITAE ve ITSE kriterleridir. Bu iki performans ölçütünün eşitlikleri sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (13)'te verilmiştir [21].

$$J_{ITAE} = \int t \times |e(t)| dt \quad (12)$$

$$J_{ITSE} = \int t \times e^2(t) dt \quad (13)$$

Amaç foksiyonunda integral performans kriterlerinin haricinde zaman cevabı özelliklerinden yüzde aşma, yerleşme zamanı, kalıcı durum hatası gibi performans kriterleri de kullanılabilir. Bahsi geçen kriterlerden birden fazlası aynı amaç fonksiyonunda tanımlandığında, amaç fonksiyonu çok-ölçütlü amaç fonksiyonu adını alır. Çalışmada kullanılan çok-ölçütlü amaç fonksiyonu Denklem (14)'te verilmiştir.

$$J_{\min} = a_1 \times J_{ITAE} + a_2 \times J_{ITSE} + a_3 \times J_{Mp} \quad (14)$$

Burada, a katsayıları $[0 1]$ aralığında değişen ağırlık katsayılarıdır ve değerleri deneme-yanılma tekniğiyle ayarlanmıştır. Ayrıca, hedef maksimum yüzde aşma değeri sıfır olacak şekilde tanımlanmıştır. Denklem (14)'te M_p maksimum aşmayı temsil eder ve Denklem 15'teki gibi ifade edilir [13].

$$M_p = y(t_p) - 1 \quad (15)$$

Optimizasyon algoritması popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve kontrolör parametrelerinin alt-üst sınır değerlerinin girilmesiyle başlatılır. Algoritma, durma kriteri sağlanınca durur. Böylece optimal kontrolör parametreleri elde edilmiş olur.

3. Simulasyon Çalışması

Bu bölümde, parametreleri verilen DC motor MATLAB/Simulink ortamında modellendi ve hız kontrolü için optimizasyon algoritması oluşturuldu. Tasarlanan kesir dereceli PID kontrolöre göre zaman cevabı ve dayanıklılık analizi yapılarak elde edilen sonuçlar farklı çalışmalarla karşılaştırıldı. Çalışmada kullanılan DC motora ait parametreler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. DC motorun parametreleri [3]

	Parametre	Değer
R_a	Armatür direnci	0.4Ω
L_a	Armatür indüktansı	2.7H
K_m	Motor moment sabiti	0.015
K_b	Elektromotor kuvveti sabiti	0.05
J	Motorun eylemsizlik momenti	0.0004
B	Motor sürtünme sabiti	0.0022

Verilen parametrelerin Denklem (1)'de yerine yazılmasıyla DC motorun transfer fonksiyonu Denklem (16)'teki gibi elde edilir.

$$G_m(s) = \frac{0.015}{0.00108s^2 + 0.0061s + 0.00163} \quad (16)$$

Optimal kontrolör parametrelerine ulaşabilmek için optimizasyon algoritması 20 kez çalıştırıldı. Algoritmada, popülasyon sayısı 30, iterasyon sayısı 50 olacak şekilde ayarlandı. En küçük amaç fonksiyonu değerine göre seçilen kesir dereceli PID kontrolör parametreleri Çizelge 2'deki gibi belirlendi. Simulasyon çalışmasında K_p , K_i ve K_d parametrelerinin alt ve üst sınırları $[0 20]$, λ ve μ parametresinin alt ve üst sınırları $[0 1]$ olarak alınmıştır. Ayrıca kesir dereceli PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi, zaman cevaplarının elde edilmesi gibi kesir dereceli işlemler Fomcon araç kutusu kullanılarak yapılmıştır [22].

Çizelge 2. Kontrolör parametreleri

Algoritma / Kontrolör	K_p	K_i	K_d	λ	μ
DA/FOPID (önerilen yöntem)	20	8.0164	5.2154	0.7291	0.9452
GWO/FOPID [3]	18.328	4.9418	3.2612	0.9998	0.9845
MRFO/FOPID [2]	19.0527	6.3585	5.3293	0.9466	0.9222
GWO / PID [3]	6.8984	0.5626	0.9293	-	-
WOA / PID [23]	20	5.3442	3.5419	-	-

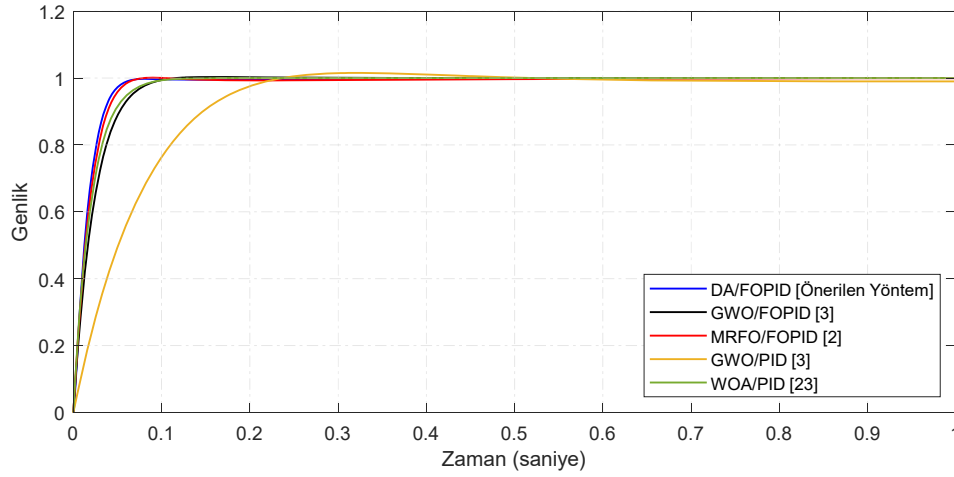
Belirlenen kontrolör parametrelerinin kesir dereceli PID kontrolör denkleminde yerine yazılmasıyla kontrolör denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C_{fopid}(s) = 20 + \frac{8.0164}{s^{0.7291}} + 5.2154s^{0.9452} \quad (17)$$

Belirlenen kontrolörün Denklem (16)'daki gibi modellenen sisteme uygulanmasıyla kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu Denklem (18)'deki gibi elde edilir.

$$G_{kç}(s) = \frac{0.078231s^{1.6743} + 0.3s^{0.7291} + 0.12025}{0.00108s^{2.7291} + 0.0061s^{1.7291} + 0.078231s^{1.6743} + 0.30163s^{0.7291} + 0.12025} \quad (18)$$

Kapalı çevrim sistemin birim basamak cevap eğrisi Şekil 6'da sunulmuştur. Şekilde ayrıca farklı yöntemlere göre belirlenmiş çeşitli çalışmalarla karşılaştırma yapılmıştır. İlave olarak, zaman cevabı özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.



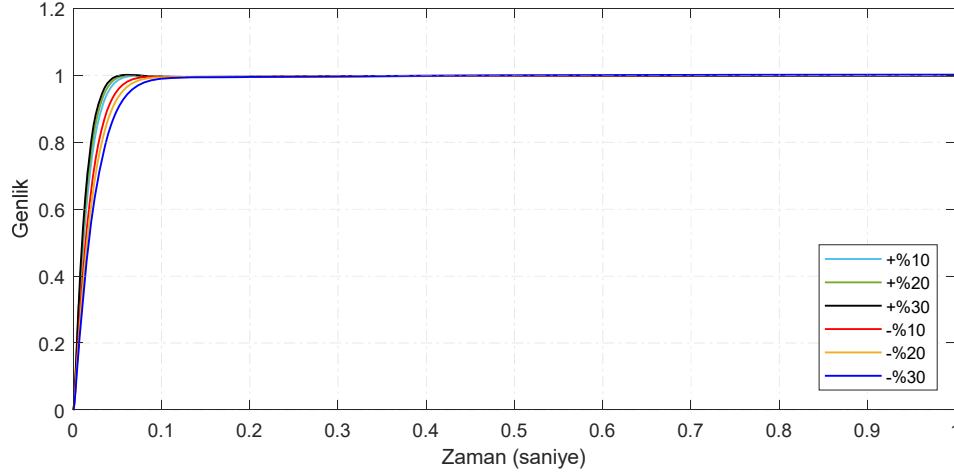
Şekil 6. Bazı yaklaşımlara göre DC motor hız kontrolünün performans karşılaştırması

Şekil 6 incelendiğinde, önerilen yöntemin aşısız ve hızlı bir cevabı olduğu görülmektedir. Ayrıca karşılaştırılan diğer yöntemlere göre üstün bir kontrol sağladığı açıktır. Önerilen yöntemin zaman cevabı özellikleri detaylı olarak Çizelge 3'ten incelenebilir. Çizelgede yerleşme zamanı %2 tolerans değerine göre hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Zaman cevabı özellikleri

Algoritma / Kontrolör	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)	Yüzde aşma (%)
DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0534	0.0323	0
GWO/FOPID [3]	0.1172	0.058	0.51
MRFO/FOPID [2]	0.0562	0.0355	0.1546
GWO/PID [3]	0.254	0.171	1.06
WOA/PID [23]	0.0795	0.0447	0

Yapılan kontrolör tasarımının dayanıklılık performansını değerlendirmek amacıyla motorun R_a ve K_b parametreleri sırasıyla %10, %20, %30, -%10, -%20 ve -%30 oranında değiştirilmiştir. Denklem (17)'deki kontrolörün yeni oluşan modellere uygulanması sonucunda oluşan cevap eğrileri Şekil 7'de verilmiştir. Yapılan kontrolör tasarımının dayanıklı olduğu Şekil 7'den açıkça görülmektedir.



Şekil 7. R_a ve K_b parametrelerinin değişimlerine göre çıkış cevabı

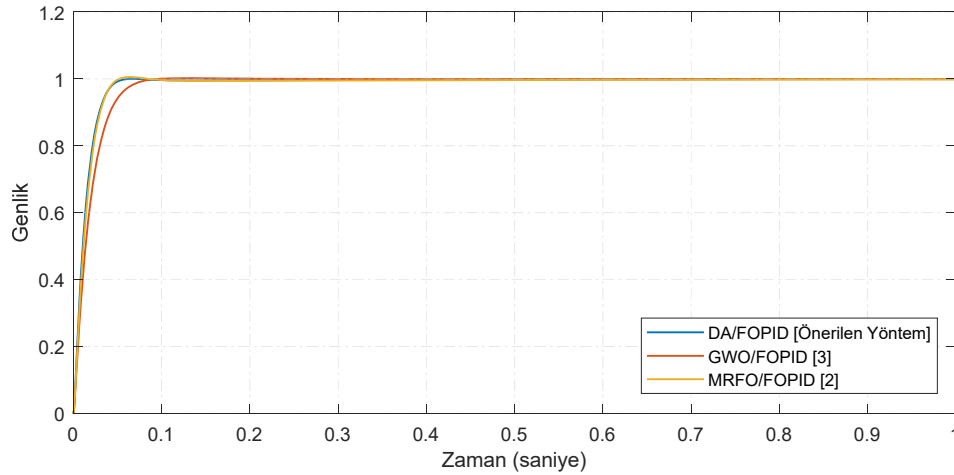
Ayrıca, farklı yöntemlerin karşılaştırıldığı dayanıklılık analizi dört durum için incelenmiştir. Detaylı zaman cevabı özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgede yerleşme zamanı %2 toleransla hesaplanmıştır.

Durum 1: Motorun R_a ve K_b parametrelerinin her ikisinde %25 arttırılmıştır. Bu duruma göre oluşan transfer fonksiyonu Denklem (19)'daki gibi olmaktadır.

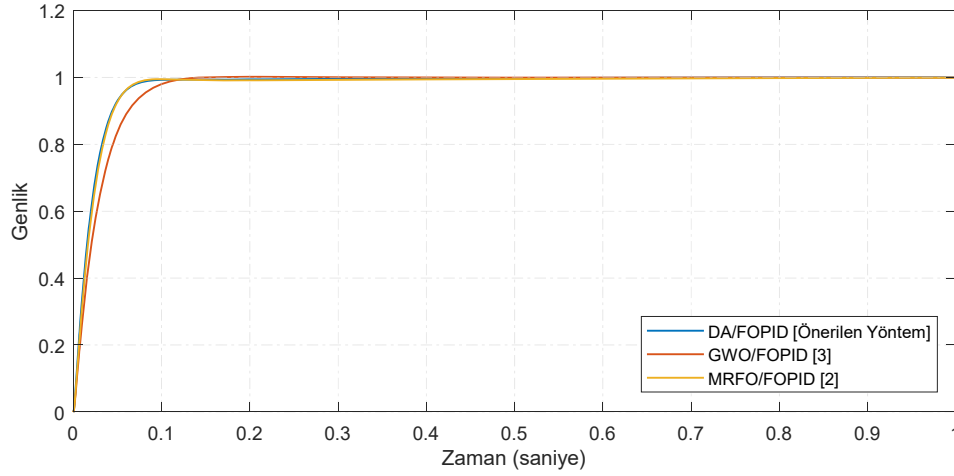
$$G_1(s) = \frac{0.018}{0.00108s^2 + 0.00614s + 0.002} \quad (19)$$

Çizelge 2'de parametreleri verilen kontrolörlerin Denklem (19)'a uygulanmasıyla elde edilen sistemin birim basamak cevap eğrileri Şekil 8'deki gibi olmaktadır. Önerilen yöntem ve İkinci ve ark. [2] tarafından önerilen yöntemin neredeyse aynı çıkış cevabını verdiği şekilden görülmektedir. Ek olarak, üç yöntemin de dayanıklılık sağladığı açıktır.

Durum 2: Motorun R_a parametresi %25 arttırılmış ve K_b parametresi %25 azaltılarak Durum 1'deki çalışma tekrarlanmıştır. Elde edilen cevap eğrileri Şekil 9'daki gibi sunulmuştur. Önerilen yöntemin Agarwal ve ark. [3] yöntemine göre göre iyi bir performans sağladığı ve [2] ile hemen hemen aynı performansı gösterdiği şekilden görülmektedir.



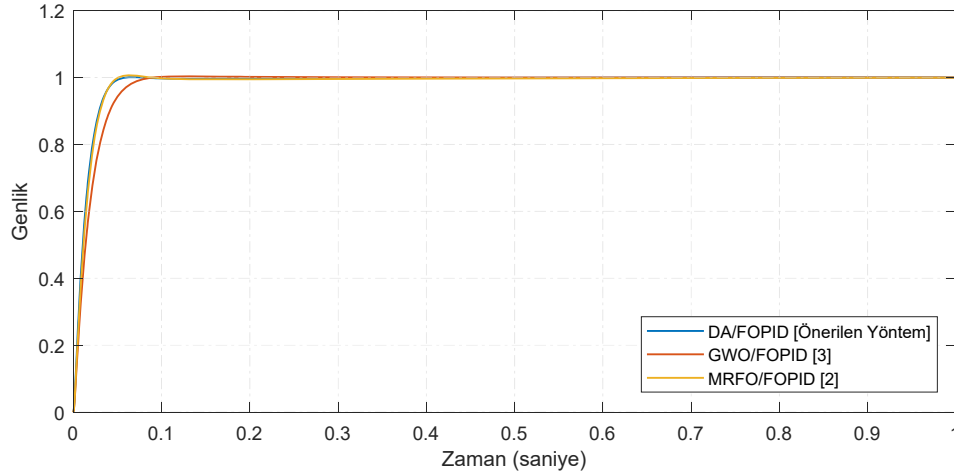
Şekil 8. DC motor hız cevaplarının Durum 1'e göre karşılaştırılması



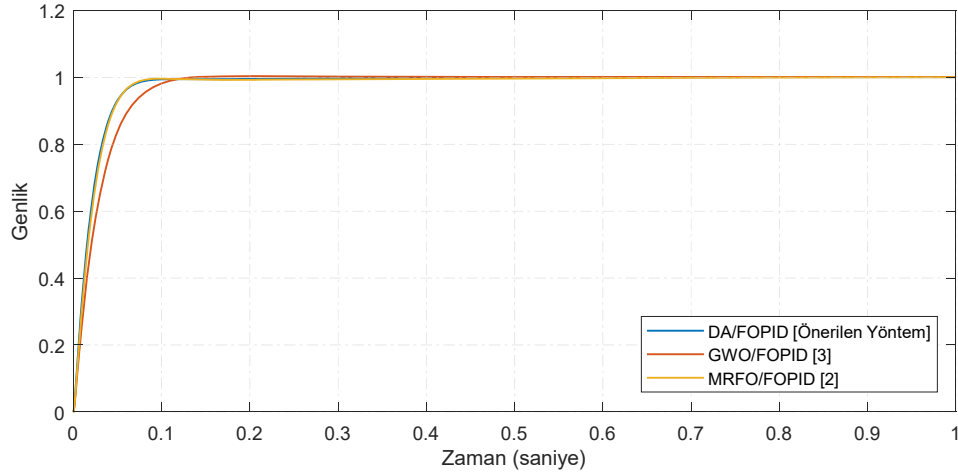
Şekil 9. DC motor hız cevaplarının Durum 2'ye göre karşılaştırılması

Durum 3: Motorun R_a parametresi %25 azaltılmış ve K_b parametresi %25 artırılarak dayanıklılık analizi gerçekleştirilmiştir. Çıkış cevap eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Önerilen yöntemin [3]'e göre daha hızlı bir cevap sağladığı ve [2] ile karşılaştırıldığında yerleşme süresi ve yükselme zamanı olarak çok yakın olduğu, yüzde aşmada daha iyi bir performans sağladığı Çizelge 4'ten görülmektedir.

Durum 4: Motorun R_a ve K_b parametrelerinin her ikisinde %25 azaltılarak çalışma tekrarlanmıştır. Şekil 11, DC motor hız cevaplarının Durum 4'e göre karşılaştırmasını sunmaktadır. Diğer durumlardaki tablo yaklaşık olarak burada da aynıdır.



Şekil 10. DC motor hız cevaplarının Durum 3'e göre karşılaştırılması



Şekil 11. DC motor hız cevaplarının Durum 4'e göre karşılaştırılması

Sonuç olarak, yapılan kesir dereceli PID kontrolör tasarımının hem zaman cevabı analizinde hemde dayanıklılık analizinde başarılı bir performans gösterdiği karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4. Dört farklı durum için zaman cevabı özellikleri

Durum	Parametre	Algoritma / Kontrolör	Yerleşme zamanı (s)	Yükselme zamanı (s)	Yüzde aşma (%)
Durum 1	$R_a=0.5$ $K_m=0.018$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0434	0.0267	0.0704
		GWO/FOPID [3]	0.0649	0.0384	0.3000
		MRFO/FOPID [2]	0.0424	0.0274	0.6759
Durum 2	$R_a=0.5$ $K_m=0.012$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0706	0.0407	0.0000
		GWO/FOPID [3]	0.0993	0.0583	0.2253
		MRFO/FOPID [2]	0.0678	0.0414	0.0000
Durum 3	$R_a=0.3$ $K_m=0.018$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0434	0.0267	0.0835
		GWO/FOPID [3]	0.0648	0.0384	0.3291
		MRFO/FOPID [2]	0.0424	0.0274	0.6813
Durum 4	$R_a=0.3$ $K_m=0.012$	DA/FOPID [önerilen yöntem]	0.0705	0.0408	0.0000
		GWO/FOPID [3]	0.0991	0.0583	0.2645
		MRFO/FOPID [2]	0.0678	0.0414	0.0000

4. Sonuçlar

Bu çalışmada DC motorun hız kontrolünü kesir dereceli PID kontrolör ile gerçekleştirmek için bir parametre ayarlama metodu önerildi. Öncelikle, optimal kontrolör parametrelerini belirlemek için optimizasyon algoritması oluşturuldu ve yusuçuk algoritması kullanılarak parametreler belirlendi. Algoritmada çok-ölçütlü amaç fonksiyonu ITAE, ITSE kriterleri ve yüzde aşmaya göre ayarlanarak optimal çözümler arandı. Kontrolör tasarımının performansını değerlendirmek için zaman cevabı ve dayanıklılık analizleri gerçekleştirildi. Yapılan analizler literatürden farklı çalışmalarla kıyaslanarak performans analizleri yapıldı. Zaman cevabı performansı açısından bir değerlendirme yapıldığında önerilen yöntem ile aşımın olmadığı bunun yanında diğer üç yöntemde aşım olduğu görülmektedir. Ayrıca, önerilen yöntemle yerleşme süresi 0.0534 s olurken, diğer yöntemlerden en yakın sonuç 0.0562 s yerleşme süresi ile MRFO/FOPID ile elde edilmiştir. Diğer üç yöntem ise daha uzun yerleşme sürelerine sahiptir. Benzer durum yükselme süresi için de geçerlidir. Önerilen yöntem ile dayanıklılık analizinde neredeyse sıfır maksimum aşma, çok kısa bir yerleşme ve yükselme zamanı elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak, önerilen DA/FOPID metodunun DC motorun hız kontrolünde diğer yöntemlere göre daha başarılı kontrol gerçekleştirdiği elde edilen şekil ve çizelgelerden görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Sabir M.M.,Khan J.A. Optimal design of PID controller for the speed control of DC motor by using metaheuristic techniques. *Advances in artificial neural systems*, vol. 2014, 2014,
- [2] Ekinci S.,Izci D.,Hekimoğlu B. Optimal FOPID speed control of DC motor via opposition-based hybrid manta ray foraging optimization and simulated annealing algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, no. 2; 2021, pp. 1395-1409.
- [3] Agarwal J.,Parmar G.,Gupta R.,Sikander A. Analysis of grey wolf optimizer based fractional order PID controller in speed control of DC motor. *Microsystem Technologies*, vol. 24, no. 12; 2018, pp. 4997-5006.
- [4] Hekimoğlu B. Optimal tuning of fractional order PID controller for DC motor speed control via chaotic atom search optimization algorithm. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 38100-38114.
- [5] Idir A.,Kidouche M.,Bensafia Y.,Khattab K.,Tadjer S.A. Speed control of DC motor using PID and FOPID controllers based on differential evolution and PSO. *evolutionary computation*, vol. 20, 2018, p. 21.
- [6] Jain R.V.,Aware M.,Junghare A. Tuning of fractional order PID controller using particle swarm optimization technique for DC motor speed control. in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-4: IEEE.
- [7] Puangdownreong D. Fractional order PID controller design for DC motor speed control system via flower pollination algorithm. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, vol. 17, no. 1; 2019, pp. 14-23.
- [8] Singhal R.,Padhee S.,Kaur G. Design of fractional order PID controller for speed control of DC motor. *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, no. 6; 2012, pp. 1-8.
- [9] Ziegler J.G.,Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, vol. 64, no. 11; 1942,
- [10] Astrom K.J. *PID controllers. Theory, Design, and Tuning*, 1995,
- [11] Joseph S.B.,Dada E.G.,Abidemi A.,Oyewola D.O.,Khammas B.M. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: Review, approaches and open problems. *Heliyon*, 2022, p. e09399.
- [12] Hekimoğlu B. Böbrek-ilhamlı Algoritma ile Ayarlanan PID Kontrolör Kullanarak DC Motor Hız Kontrolü. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2; 2019, pp. 652-663.
- [13] Ogata K. *Modern control engineering*. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2010.

- [14] Mirjalili S. Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, vol. 27, no. 4; 2016, pp. 1053-1073.
- [15] Wikelski M., Moskowitz D., Adelman J.S., Cochran J., Wilcove D.S., May M.L. Simple rules guide dragonfly migration. *Biology letters*, vol. 2, no. 3; 2006, pp. 325-329.
- [16] Russell R.W., May M.L., Soltesz K.L., Fitzpatrick J.W. Massive swarm migrations of dragonflies (Odonata) in eastern North America. *The American Midland Naturalist*, vol. 140, no. 2; 1998, pp. 325-342.
- [17] Reynolds C.W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. in *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1987, pp. 25-34.
- [18] Das S., Saha S., Das S., Gupta A. On the selection of tuning methodology of FOPID controllers for the control of higher order processes. *ISA transactions*, vol. 50, no. 3; 2011, pp. 376-388.
- [19] Podlubny I. Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers. *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 44, no. 1; 1999, pp. 208-214.
- [20] Shah P., Agashe S. Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, vol. 38, 2016, pp. 29-41.
- [21] Atherton D. *Control engineering*. Bookboon, 2009.
- [22] Tepljakov A. FOMCON: fractional-order modeling and control toolbox. *Fractional-order modeling and control of dynamic systems*, 2017, pp. 107-129.
- [23] Şahin A.K., Akyazı Ö., Sahin E., Çakır O. DC Motorun Hız Kontrolü İçin Meta-Sezgisel Algoritma Tabanlı PID Denetleyici Tasarımı. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 10, no. 2; pp. 533-549.

SEISMICALLY RISKY BUILDINGS -THE DEADLOCK OF ZONING AMNESTY UPON THE EFFECTIVE INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT

Seher Beyza KARACA¹ , Dr. Abdullah DİLSİZ^{2*}

¹Ankara Yıldırım Beyazıt University, Post-war and Post-disaster Reconstruction and Rehabilitation, Ankara/Türkiye

²Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Civil Engineering, Ankara/Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 14.10.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 15.03.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1189213

Abstract

Integrated Disaster Management is a plan for various interventions for unfavorable situations that occur before/after disasters. To ensure the implementation of successful disaster management, management plans have to be implemented and supported by laws for permanent solutions. Türkiye, as one of those disaster prone countries, particularly for earthquakes, created various action plans and laws at different level. One of the most important example in this regard might be the zoning amnesty that is carried out on registration of unlicensed buildings to identify them for urban transformation. However, deficiencies have appeared in practice and governance were insufficient to eliminate the threats. The Aegean Sea Earthquake affected İzmir in 2020 has brought this predicament to light once again. This study mentions disaster management and mitigation plans in Türkiye generally, and focuses on the İzmir earthquake that occurred on October 30th, 2020. It highlights inconsistency of zoning amnesty with disaster resilience.

Keywords: Earthquake; Disaster Management; Resilience; Zoning Amnesty; İzmir

DEPREMSEL RİSK TAŞIYAN BİNALAR -ETKİN BÜTÜNLEŞİK AFET RİSK YÖNETİMİNDE İMAR AFFI ÇIKMAZI

Özet

Bütünleşik afet yönetimi, afetlerden önce veya sonra meydana gelen olumsuz durumlara yönelik çeşitli müdahaleleri düzenleyen plandır. Başarılı bir afet yönetimi ve kalıcı çözümler için bu planlar uygulanmalı ve kanunlarla düzenlenmelidir. Özellikle deprem konusunda afete yatkın ülkelerden biri olan Türkiye, farklı düzeylerde çeşitli eylem planları ve kanunlar oluşturmuştur. Bunların en önemli örneklerinden biri, ruhsatsız yapıların tespiti ve dönüşümünün sağlanması için uygulamaya koyulan imar affıdır. Ancak bu kanunun uygulamasında eksiklikler ortaya çıkmış ve denetimler tehditleri ortadan kaldırmak için yetersiz kalmıştır. 2020 yılında İzmir'i etkileyen Ege Denizi Depremi, bu açmazı bir kez daha gün yüzüne çıkarmıştır. Bu çalışma, Türkiye'de genel olarak afet yönetimi ve zarar azaltma planlarını değerlendirerek, 30 Ekim 2020'de meydana gelen İzmir depremine odaklanmakta ve imar affının afete dirençlilik ile tutarsızlığını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem; Afet Yönetimi; Dirençlilik; İmar Affı; İzmir

1. Introduction

Integrated disaster management is the process of dealing with disaster and its negative effects. It considers all possible threats in order to build a resilient society, and it can carry out the work and measures required in the disaster management stages such as, improvement, mitigation, preparedness, response, and recovery [1]. By this way, losses and damages caused by the hazard can be minimized, awareness of the

¹ E-posta: seherbm@gmail.com ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-5234-5989>

² E-posta: adilsiz@ybu.edu.tr ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-1750-9327> (Sorumlu Yazar)

communities can be improved for disaster resilience and national and municipal level disaster-resistant mechanisms can be built.

Recovery is one of the parts of the management system that follows the disaster response phase. This process includes the legal, institutional, physical, social, and economic actions required to meet the needs of communities in the most rational ways and techniques. It strives to restore normalcy as quickly as possible, as well as to offer possibilities to cope with potential hazards and to create a safer living environment with the least amount of damage [1]. In order to provide successful management and recovery, a holistic strategy is required to build a legal and systematic management basis. For this reason, several countries have become a part of the Sendai Framework which was adopted in March 2015 at the 3rd UN World Conference in Sendai, Japan. The agreement has some priorities to establish a disaster management system, one of the aim is *“Enhance disaster preparedness for effective response and to “Build Back Better” in recovery, rehabilitation, and reconstruction.”* Build Back Better (BBB) is the guiding philosophy of recovery to enhance the social, physical, economic and environmental status of a community in order to create a resilient community [2]. Actions to BBB in recovery have been identified in the UNISDR report as the basic human right that states, international governments, and other stakeholders are expected to safeguard their citizens against future disasters [2].

Despite the fact that governments have implemented disaster management plans on various stages, current legislations and implementations are fundamentally impeding disaster management success; however, some of these may not have desired impact. One of the current practices in Türkiye is zoning amnesty which threatens the lives of millions. It aims to solve the problem of unlicensed housing which has a risky situation for living. The license problem of these buildings is handled as a result of the zoning amnesty with the certificates provided to buildings without technical competence. However, since these buildings are in use by the people, even the slightest disaster hazards might cause tremendous losses. Even though the state or government claimed that the purpose of the regulation is to register unlicensed dwellings for upcoming transformation facilities; anyhow it was unable to handle risky situations due to a lack of a regulatory system.

Following the earthquake in Izmir on October 30th, 2020, numerous experts questioned the zoning amnesty in terms of integrated disaster risk management and implementation on disaster-prone regions. There were 795.934 unlicensed buildings [3] that have applied for building registration certificates in Izmir only, and because of the earthquake-prone environment of the city, it means most of the settlements are located close to the fault lines. When the research reports and statements made after the earthquake are evaluated, it is clear that there were demolitions and deaths in the structures that benefited from the zoning amnesty legislation. As a result, in this paper, the topic of disaster management is highlighted from the disaster risk reduction point of view, as well as the potential harm of the zoning amnesty on this process.

This study firstly focuses on the general description and disaster management plans in Türkiye, then describes the regulations about zoning amnesty which is totally against the idea of disaster management. Additionally, the study explains general situations after the İzmir earthquake and recovery facilities in the area and criticizes the zoning amnesty and the case of the disaster management implementation in İzmir, in the following sections.

2. Integrated Disaster Risk Management

Along with the disasters that occur across the world, the topic of resilience is frequently highlighted in debates. The term ‘resilience’ was defined in the report of the UNISDR [4] as *“the capacity of a system, community, or society potentially exposed to hazards to adapt, by resisting or changing in order to reach and maintain an acceptable level of functioning and structure”*. In unforeseen occurrences, it is vital to establish a resilient society so that life may resume its normal path as quickly as feasible. It is critical to create resilience to disasters that strike individuals at an instant of time when they do not expect it. Obviously, this imposes new tasks and responsibilities to each part of the society. A more effective system can be created with a set of frameworks to be developed for the time of pre-disaster, during disaster, and post-disaster phases.

According to Amendola et al. [5]; integrated disaster risk management is a process for completely and credibly estimating and managing risks from numerous synergistic sources, and it poses a challenge to the scientific and policy communities. Management system can be divided into four stages; mitigation, preparedness, response and recovery [6]. To have successful disaster management, all phases must be carried out as a continuous intertwined system, without being separated from one another. And, all stakeholders, institutions as well as the individuals must take their responsibilities that are defined by the corresponding frameworks. Among those phases, while mitigation refers to any activities made to minimize the effect of future catastrophes, preparedness refers to the activities done to lessen the impact of disasters that are predicted or imminent. Although these stages are the phases that are followed before the disaster occurs, the response stage comes when the disaster occurs or after it. Response phase comprehends the emergency efforts conducted both during the disaster's effect and in the immediate aftermath. When a disaster collides a specific location, quick action is required to ensure the survival of people, resources, and so on. These are the components of the "Immediate / Urgent Response Phase." Search and rescue, and first aid are such actions that have to be considered early on this stage in order to manage the cooperation amongst teams and actors. Recovery is the following process of damage assessment, repairing damage, restoring services, and reconstructing infrastructure after a disaster has occurred [6]. These tasks might differ depending on how the situation is perceived and a variety of disciplines provide fruitful research opportunities [7]. For example, while social scientists are primarily concerned with social rehabilitation of a community, engineers approach physical rebuilding from another perspective. Depending on the sort of exercise, recovery might take months to years.

All of these stages are linked by the concept of Build Back Better, which attempts to reduce the disaster risks while recovering and create a more resilient society. While this method tries to avert potential hazards with the least amount of harm, it also ensures to be ready for future disasters and to raise awareness about it. The notion was incorporated into the Sendai Framework, which was adopted at the 3rd UN World Conference in March 2015.

Türkiye is one of the nations that signed the Sendai Framework action protocol. In addition to the worldwide studies conducted within the scope of the framework, Türkiye is preparing several disaster management plans with the priority of AFAD (Disaster and Emergency Management Presidency). TAYSB (Türkiye Disaster Management Strategy Document), TARAP (Türkiye Disaster Risk Reduction Plan), TAMP (Türkiye Disaster Response Plan), UDSEP (National Earthquake Strategy and Action Plan), are among the plans and strategic documents handled within the scope of Sendai Framework, which determine post-disaster organizational schemes and stakeholders in order to prevent physical, economic, social, environmental and political losses and make cities more resilient [8, 9]. Along with these initiatives, it is planned to build a disaster-resilient society, and AFAD's work in disaster awareness has made significant progress. However, raising public awareness is not enough to produce disaster-resilient cities and communities; besides, current practices must also be evaluated.

Türkiye is prone to a variety of natural disasters, the most common types of which are earthquakes, floods, and landslides. Earthquakes produce the most devastation and deaths, with 70 percent of the population living in active seismic zones [10]. This situation has made many legal regulations mandatory. In terms of legal regulations, the turning point in the field of disaster management and coordination in Türkiye is the August 17th, 1999 Marmara Earthquake. After the great losses in the Marmara earthquake, many laws, decrees, statutes and regulations were enacted in order to return to normal life in the region. With these regulations, it is aimed to solve the problems caused by the earthquake and to eliminate the problems and deficiencies of the country's institutional structure and legislation in disaster management [11].

Despite all these regulations, some of the decisions and laws that have been put into practice have caused controversy. Actions such as opening risky regions for development and legalizing settlements without engineering services are debated promptly after disasters occur. The zoning amnesty, which was implemented several times in the history of Türkiye in order to solve the registration problem of unlicensed buildings and then reintroduced in certain periods, is completely contrary to disaster resilience. Since such applications legalize illegally constructed buildings which are constructed without any

engineering knowledge and ignoring the hazards and risks, result in significant disaster losses, unfortunately.

3. Regulations about Zoning Amnesty in Türkiye

Unregistered construction is divided into two categories: squatter dwellings and building in contrast to zoning legislation [12]. In Law No. 775, the definition of squatter houses is as follows:

“Unauthorized buildings made on land or plots that do not belong to them, without the consent of the owner, without being bound by the legislation and general provisions regulating the zoning and construction works”³ [13].

Additionally, the definition of building that contrary to zoning legislation is;

“Buildings that are contrary to the license and its annexes, science and health rules, floor order, building precedent values, neighboring distances”⁴ [14].

Since these buildings have not been submitted to the requisite testing and do not have regulated static projects, they are at risk of being collapsed in the event of a disaster. As a result, they are dangerous for individuals who live within or stroll adjacent to structures. According to a brochure published by the Ministry of Environment and Urbanization, unregistered buildings account for nearly 50% of Türkiye's existing building stock [3].

The notion of zoning amnesty was first discussed in relation to squatter settlements and neighborhoods, which were once viewed as the problem of urban development. Because of politics and rapid urbanization, squatter settlement began to constitute a critical part of urban areas in the early 1950s, particularly on the outskirts of large cities, and their percentage of the urban population increased [15].

Various laws / regulations were enacted in different periods regarding these structures as shown in Table 1, although the main purpose seemed to solve the problem, it caused them to gain more rights.

The details of these laws and legislation are not within the scope of this article, however, some of them can be briefly mentioned as examples here [15]. Law No.5218 is the first law on zoning amnesty and aimed to solve the unlicensed building problem in Ankara. It is about the allocation of land owned by the Municipality and the state to those who will dwell in the city. Later, Law No.6188 was removed due to the formation of squatters in Istanbul. The residences that municipalities can build on their own lands will be sold primarily to those whose slums have been destroyed. However, this law was not able to solve the problems of newcomers to the city. During the Law No.775 period, the squatters were semi-dependent on the zoning law. Policies of improvement, elimination and prevention should be followed for that type of housing.

Following these zoning amnesty legislations recently, the provisional article 16 included in the "*Law on Restructuring Certain Receivables and Amending Certain Laws*"⁵ which is published in the Resmi Gazete on May 18th, 2018, and added to the Zoning Law. In accordance with this article, unauthorized constructions built prior to December 31st, 2017, are in the process of being recorded [16]. The enforcement has known as "*zoning amnesty*" which was defined by the Ministry of Environment and Urbanization [17] as:

“solving the zoning problems of our citizens with the building registration certificate to be given to the buildings that violate zoning legislation or the license”⁶

³ In Turkish: “*imar ve yapı işlerini düzenleyen mevzuata ve genel hükümlere bağlı kalınmaksızın, kendisine ait olmayan arazi veya arsalar üzerinde, sahibinin rızası alınmadan yapılan izinsiz yapılar*”

⁴ In Turkish: “*İmarlı alanlarda kamu ve özel mülkiyete konu olan parsellerde mülk sahipleri tarafından ruhsat ve eklerine, fen ve sağlık kurallarına, kat nizamına, yapı emsal değerlerine, komşu mesafelere aykırı yapılar*”

⁵In Turkish: “*Bazı Alacakların Yeniden Yapılandırılması ile Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına İlişkin Kanun*”

⁶In Turkish: “*İmar mevzuatına veya ruhsata aykırı yapılara verilecek yapı kayıt belgesiyle vatandaşlarımızın imar sorunlarının çözülmesidir*”

Table 1: Laws in order to solve the problem of unlicensed housing (based on [15])

Period/Topic	Year	Law No
The Period Before Slum Law No. 775	1948	5218
		5228
	1949	5431
	1953	6188
	1959	7367
The Period After Slum Law No. 775	1966	775
For Problems that Slum Law Cannot Solve	1983	2805
	1985	2981
	1986	3290
	1987	3366
	1988	3414
About The Ability to Buy and Sell Unlicensed Buildings	2001	4706
Additional Articles Added to the Laws for Amnesty	2003	4833
		5027
	2005	5377
		5398
EXTENSION OF APPLICATION TIME	2012	6306
	2015	6639
	2018	7143

Zoning Amnesty, in general, is the forgiveness and protection of the buildings that were built until a certain period of time by not obeying the rules in legislation, and those that comply with the conditions specified in the law in terms of condition and location [15]. It should be also mentioned that these buildings had not been serviced following the engineering requirements such as the current seismic codes which are the vital parts of the construction legislation. Although the main goal appeared to be to remedy the problem, it resulted as gaining additional rights of the owners, by leaving many question marks from the disaster risk reduction point of view.

The purpose of this act is to manage unregistered buildings and to generate an economic resource for urban transformation through payments made by individuals who profited from the regulation. A license is given to the buildings who benefitted from the amnesty in order to open a workplace without seeking a building utilization certificate, and the right to connect water, natural gas and electricity services [18]. According to the legislator, this agreement between the state and building owners who have earned the Building Registration Certificate, will be valid until the urban transformation. Citizens who want to benefit from the zoning amnesty firstly receive the Building Registration Certificate on "*e-devlet*" which enables them to carry out the procedures online. There is no need to submit any sketch, project or drawings. Because the process is based on the statement principle only, the probability of abuse of the act is significantly high. Following then, the "*Transition to Condominium Ownership and Genre Changes*" stage begins to ensure the legitimation of the buildings [18]. As is known today, the total number of Building Registration Certificates received within the scope of the Zoning Amnesty has reached 3.153.044 across Türkiye while 332.356 of these buildings are located in İzmir [19].

4. İzmir Case

Izmir is located in Aegean Region in western Türkiye which has a significant seismic hazard level. Among the earthquakes in the last century, the biggest earthquake before the October 30th, 2020 was the Torbalı earthquake dated March 31st, 1928 (M: 6.5). This earthquake had a very wide effect, more than 2000 houses were destroyed or damaged. Latest earthquake occurred on October 30th, 2020, with the epicenter close to Sisam Island (Izmir Seferihisar Offshore) with a magnitude of M_w 6.6 at 14:51 (local hour) [20]. According to the proofs; the duration of the earthquake was 15.68 sec., and 5799 aftershocks with magnitudes varying from 0.7 to 5.1 occurred after the earthquake until December 31st, 2020 [21].

According to the AFAD Report [21], at the time of the earthquake, Level 3 "National Level" response activities were implemented in conjunction with the Türkiye's Disaster Response Plan. The crisis management for this earthquake has been successfully completed satisfactorily. Approximately 3000 people of search and rescue, security and other expert teams from other provinces were transferred to the disaster region shortly after the earthquake. The disaster victims were initially relocated to a tent city for shelter before being transferred to container cities [21].

Although this quick-response activity should be applied after the earthquake, in the time of Covid-19, it has endangered people in terms of epidemic disaster. People have run out of their homes without precaution. A lot of people stay outside together. For this issue, thousands of masks and disinfectants were sent to the region by the Presidency of Republic in order to prevent the spread of disease with high acceleration [22].

According to the report of TBMM [19], 718 structures were collapsed or severely damaged by the earthquake, while 7671 were deemed to be slightly affected. During the first inquiry following the earthquake, it was discovered that 17 structures in the city were entirely collapsed. Despite the fact that the Emergency Management Presidency (AFAD), National Medical Rescue Team (UMKE), Turkish Red Crescent, and other NGOs from all around Türkiye have played an active role in responding quickly, 117 people were killed as a result of these damages [19].

Following the earthquake, the Ministry of Environment and Urbanization teams conducted damage-assessment campaigns. There were 30 buildings which needed urgent demolishing, 9 buildings were already collapsed and 127 buildings with heavy damage in the Bayraklı region [23].

After the assessments, urban transformation projects were launched, with the project stage by deciding on 7 basic zones with 7.53 hectare as a reserve area for new buildings in Bayraklı, Adalet, Manavkuyu, and Mansuroğlu neighborhoods, which were the most impacted by the earthquake [19]. During this process, rent subsidies were disbursed for people whose homes had been destroyed or substantially damaged, and they were offered the chance to utilize the municipality's stock of housing for free. Several infrastructure payments have also been postponed [23].

According to the AFAD [21], when the structures in the earthquake zone were assessed, it was discovered that there was more damage than expected in buildings exposed to risk-increasing improper practices without taking the earthquake hazard into account. Examining the ground motions in Bayraklı reveals that the ground conditions amplify the structural damage [24]. The damages were caused by the similar factors that were effective in earlier earthquakes. The damage is concentrated on 7 to 10 story buildings in Bayraklı, due to the aforementioned ground amplification effects. Another crucial issue in the report is that it cannot be inferred that the undamaged and less damaged structures are earthquake resistant [21]. In addition, according to the statements from the Ministry of Environment and Urbanization [25]; 4 buildings (44% of total) requiring urgent demolition after the earthquake and 36 of the heavily damaged buildings (28% of total) received building registration certificates within the scope of the Zoning Amnesty. Furthermore, two of the collapsed structures (10% of total) had building registration certificates, indicating that they were registered in the Ministry's system, but had no protections against destructive earthquake effects.

5. Evaluation

In Turkey's history, there have been several conversations concerning the zoning amnesty Altındal and Konak warned about avoiding zoning amnesty and similar practices in publications published following the Marmara Earthquake [26]. However, zoning amnesties have come back in a number of forms during the last 23 years.

An important debate on the last zoning amnesty application is on the last sentence of the 10th paragraph of the temporary article 16 of the Zoning Law, which is "*Earthquake resistance of the building is under the responsibility of the owner*" [27]. This is the most controversial part of the Building Registration Certificate. This statement gives the impression that the responsibility for the earthquake resistance of the buildings with the Building Registration Certificate passes to the owner of the building. However, because the administration has financial responsibilities and has an inspection requirement in these structures. It should be examined in a coordinated manner. In order to preserve public order, the administration is the primary owner of law enforcement and cannot transfer administrative responsibilities to individuals within the extent of these authorities [28].

In the meantime, it is apparent that there are also many more risky structures than recorded ones with this law. Furthermore, older buildings, even if they have a license, should be assessed immediately to check their vulnerability. In summary, the zoning amnesty is inadequate to register all of the structures and to take the appropriate measures.

Returning to the İzmir case, according to Court of Accounts statistics as of the end of 2016, the average age of buildings is 25 years or more, and the ratio of the risky structures is about 65 percent [19]. The fact that the average age of the building is over 25, and even more than 30 today. This means that these structures were built before the 1999 Marmara Earthquake, which is considered as a milestone in Türkiye for broad and vital earthquake risk reduction regulations.

Another report [29] showed that only 21% of the buildings in the area are licensed; 7% of these buildings received new construction permits before 2000, and 14% after 2000. 79% of the buildings in the area are unlicensed. By the way, before the earthquake, in various reports prepared by the Municipality and the Ministry, it is mentioned that the settlement in the area should be done with certain measures due to the ground conditions, but the area seems open to settlement. While this situation is included in the reports, the fact that the controls in the area are not carried out and the settlements determined as high density settlements are allowed in the plans show that only those who have a building registration certificate are not responsible for damages after the earthquake.

When the report prepared by the Turkish Grand National Assembly after the İzmir earthquake is examined, it is clear that there are certain shortcomings regarding the zoning amnesty. For example, it is mentioned that there is no information about which building received the building registration certificate for what reason and to what degree does not conform with the requirements [19]. While these evaluations are a process that should be put into practice as of 2018, right after the enactment of the relevant law, it is seen that these examinations are not completed even in 2021. These shortcomings may lead to the loss of hundreds of lives and present a quite opposite situation with disaster resilience strategies.

Since zoning amnesty regulations do not aim to strengthen risky buildings, undertake essential static interventions, or execute parcel-based transformation if requested, policies have no direct effect on reducing disaster-related damages. On the contrary, it has transformed the unhealthy and unlicensed construction to legal and paved the way for the damages that will occur as a disaster.

Despite the drawbacks of this system, it has resulted in the identification of about 3 million [19] risky structures throughout Türkiye as of today. Although it is not a solution that records structures whether they are safe or not, it may be regarded a step made within the framework of disaster risk preparedness. By the way, structures that are proven to pose a disaster risk, endanger public safety, or were not built in accordance with construction and science standards must be demolished.

6. Conclusion

Earthquakes have caused significant damages in Türkiye so far, as well as traumatic experiences. The causes of damage stated in İzmir earthquake reports were the same as in other earthquakes and it cracked the city's and its policies' vulnerability open once again. This circumstance demonstrates that we have not entirely learned from the previous earthquakes or neglected the mistakes which have experienced before. In Türkiye's legal system, it is clear that disaster-response methods appear to be fairly sophisticated, despite the fact that there are deficiencies in the operation and management phases.

The earthquake in İzmir made deficiencies visible once again. The response and recovery phases seem to be carried out successfully with the first aid activities with the coordination of AFAD after the earthquake and the urban transformation projects that started right after the earthquake. However, recovery does not mean only rebuilding the environment after destruction, it is defined in the dictionary of AFAD as to develop the opportunities to cope with possible disasters and to create a safer living environment that will ensure the least damage.

From this stage on, it should be the primary policy to complete these shortcomings without waiting for the next earthquake, and Emergency Response and Disaster Risk Reduction Action Plans should be put forward in this regard. However, beyond these, it should be aimed to successfully provide disaster management with the regulations to be made in the existing laws.

A practice such as zoning amnesty that cannot be reconciled with disaster management and that will put the responsibility of the loss of life on those who applied for amnesty should be reviewed in all aspects. It is to take extra precautions during the execution of zoning regulations in hazardous regions and where construction is not appropriate. It is necessary to carry out the necessary controls with the teams to be formed specific to the neighborhoods, and to ensure the demolition of risky buildings – even if they have benefited from the zoning amnesties until now. Only when this happens, disaster risk management will be fully provided and efficient results will be obtained in recovery works.

References

- [1] AFAD Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü. <https://www.afad.gov.tr/aciklamali-afet-yonetimi-terimleri-sozlugu> (Access date: 15.04. 2022)
- [2] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Build Back Better in Recovery, Rehabilitation and Reconstruction. 2017.
- [3] Kasparoğlu M, Suri L. İmar barışı. İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi 2019; 2(1): 47-60.
- [4] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. In: Word Conference on Disaster Reduction, Hyogo, Japan; 2005.
- [5] Amendola A, Linnerooth-Bayer J, Okada N, Shi P. Towards integrated disaster risk management: case studies and trends from Asia. Nat Hazards 2008; 44:163-168.
- [6] Alexander D. Principles of Emergency Planning and Management. New York: Harpenden, UK, and Oxford University Press; 2002.
- [7] Olshansky R, Hopkins L, & Johnson L. Disaster and Recovery: Processes Compressed in Time. Natural Hazards Review 2012; 13(3): 173-178.
- [8] AFAD (a). Ulusal Deprem Stratejisi ve Eylem Planı 2012-2023. 2013.
- [9] AFAD (b). Türkiye Afet Müdahale Planı (TAMP). 2013.
- [10] Istanbul Project Coordination Unit (IPCU). Preparing Istanbul for Future Disasters. https://www.unisdr.org/files/18408_azilimegacitiesandriskreductionista.pdf (Access date: 10.05.2022)
- [11] Azimli Çilingir G. Türkiye’de Uygulanan Afet Yönetimi Politikalarının İncelenmesi: Yasal Düzenlemeler ve DASK. Journal of Resilience , 2018; 2(1) 13-21.

- [12] TMMOB. İzmir Depremi İlk Gözlem Raporu. 2020. https://www.tmmob.org.tr/sites/default/files/tmmob_deprem_on_rapor.pdf (Access date: 29.04.2022)
- [13] TBMM Gecekondu Kanunu. Resmi Gazete. 1966.
- [14] TMMOB. “Kaçak Yapılaşma İle İlgili Süreçler, Sorunlar, Çözüm Önerileri” Değerlendirme Raporu. Planlama Dergisi. 2004;3:95-105.
- [15] Tercan, B. İmar Affi 1948’den Bugüne İmar Afları. Mimarlık Dergisi , 20; 2018.
- [16] Sayıştay Başkanlığı. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2019 Yılı Sayıştay Denetim Raporu <https://sayistay.gov.tr/reports/download/408-cevre-ve-sehircilik-bakanligi> (Access date: 25.04.2022)
- [17] Ministry of Environment and Urbanization. İmar Barışı. 2018. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/imarbarisi/icerikler/brosur-20180603111057.pdf> (Access date: 19.04.2022)
- [18] TBMM Yapı Kayıt Belgesi Verilmesine İlişkin Usul ve Esaslar. ResmiGazete. 2018a. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/06/20180606-8.html> (Access date: 19.04.2022)
- [19] TBMM. Depreme Karşı Alınabilecek Önlemlerin ve Depremlerin Zararlarının En Aza İndirilmesi için alınması gereken tedbirlerin belirlenmesi amacıyla kurulan Meclis araştırması raporu. 2021. <https://www.tbmm.gov.tr/sirasayi/donem27/yil01/ss278.pdf> (Access date: 21.06.2022)
- [20] İzmir Governorship. İzmir İl Afet Müdahale Planı. İzmir Valiliği. https://izmir.afad.gov.tr/kurumlar/izmir.afad/Tamp-Izmir-2019/2021-TAMP-/TAMP_Izmir-2021.pdf (Access date: 21.04.2022)
- [21] AFAD (2020). Sisam Adası Deprem Raporu. <https://deprem.afad.gov.tr/downloadDocument?id=2065> (Access date: 1.04.2022)
- [22] Directorate of Communications of Türkiye. (2020).
- [23] Ministry of Environment and Urbanization (ÇŞB). İzmir Deprem Raporu, 2020.
- [24] Günay S, Mosalam KM, Archbold J, Dilsiz A, Djima WG, Gupta A, Hormpzaad SJ, Hassan W, Heresi P, Morales-Beltran M, Muin S, Romao X, Kijewski-Correa TL. Aegean sea earthquake: preliminary virtual reconnaissance report. Structural Extreme Events Reconnaissance (StEER). 2020.
- [25] Euronews. İzmir Depreminde Yapı Kayıt Belgesi Alan Yapılar. <https://tr.euronews.com/2020/12/03/izmir-depreminde-y-k-lan-ya-da-ag-r-hasarl-binalar-n-42-si-imar-aff-ile-ruhsat-alm-s> (Access date: 19.04.2022)
- [26] Altındal A, Konak N. 17 Ağustos Depreminde Yıkılan Binaların Mimari Hataları. SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2002; 6(2): 147-152.
- [27] TBMM. İmar Kanunu Geçici 16. Madde. 2018b. https://webdosya.csb.gov.tr/db/afyon/menu/3194-degisiklik-gecici-16_20180607081602.pdf3 (Access date: 19.04. 2022)
- [28] Özlüer, I. İmar Barışı Düzenlemesine Hukuki Bir Yaklaşım. İnönü Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi 2018; 9(2): 313-340.
- [29] Bayraklı Municipality. Adalet ve Manavkuyu Mahalleleri 1/1000 Ölçekli Revizyon İmar Planı Plan Açıklama Raporu <https://www.bayrakli.bel.tr/images/plandosya/dosya20182215836990.pdf> (Access date: 16.04.2022)

A COMPUTER-BASED METHODOLOGY FOR MODELING THE REMOVAL OF CADMIUM ION FROM INDUSTRIAL WASTEWATER WITH RICE HUSK ASH

Yasemin ŞİRİN ERYOLDAŞ¹, Faruk Geyik², Tuğba TAŞKIN TOK³

¹ Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep, Turkey.

² Tarsus University, Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Mersin, Turkey.

³ Gaziantep University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Gaziantep, Turkey.

Geliş Tarihi/Received Date: 20.10.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 12.03.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1207543

ABSTRACT

Rice husk is a significant waste issue due to its high manufacturing rate. The removal of heavy metals from industrial wastewater using the adsorption method is one of the significant usage areas of rice husks. In addition to being more cost-effective than other methods for removing heavy metals from industrial wastewater, using rice husks for this purpose would solve the storage problem of the rice husks. In this study, Gaussian® 0.9 software is utilized to describe and simulate the binding process of the Cd²⁺ ion to the rice husk adsorbent and to perform geometric optimizations to identify the most stable structure. These optimized structures' adsorption energies were computed utilizing the Material Studio® 6.1 software. According to the findings, rice husks can be utilized as an adsorbent in place of more expensive substances. It has been demonstrated that, when compared to experimental procedures, the suggested strategy is both quicker and less expensive.

Keywords: rice husk; Cd²⁺ ion; geometry optimization; adsorption simulation.

PİRİNÇ KABUK KÜLÜ İLE ENDÜSTRİYEL ATIK SUDAN KADMIYUM İYONUNUN GİDERİLMESİNİN MODELLENMESİNE YÖNELİK BİLGİSAYAR TABANLI BİR YÖNTEM

ÖZET

Pirinç kabuğu, yüksek üretim hızı nedeniyle önemli bir atık sorunudur. Adsorpsiyon yöntemi kullanılarak endüstriyel atık sudan tekstil boyalarının ve ağır metallerin uzaklaştırılması, pirinç kabuğunun önemli bir uygulama alanıdır. Endüstriyel atık sulardan ağır metallerin uzaklaştırılması için diğer yöntemlere göre daha uygun maliyetli olmasının yanı sıra, bu amaçla pirinç kabuğunun kullanılması, pirinç kabuğunun depolanma sorununun çözümü için de etkili bir çözüm yöntemi olmuştur. Bu çalışmada Gaussian ® 0.9 yazılımı Cd²⁺ iyonunun pirinç kabuğundan hazırlanan adsorban yapıya bağlanma süreci belirlemek ve simüle etmek ve en kararlı yapıyı belirlemek üzere geometri optimizasyonu yapmak üzere kullanıldı. Bu optimize edilmiş yapıların adsorpsiyon enerjileri, Material Studio® 6.1 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulara göre pirinç kabuğu, daha pahalı maddeler yerine adsorban olarak kullanılabilir. Deneysel prosedürlerle karşılaştırıldığında, önerilen metodolojinin hem daha hızlı hem de daha ucuz olduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: pirinç kabuğu; Cd²⁺ iyonu; geometri optimizasyonu; adsorpsiyon simülasyonu

¹ e-posta: yasemineryoldas@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-7212-9108 (Sorumlu Yazar)

² e-posta: farukgeyik@tarsus.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-2355-0529

³ e-posta: ttaskin@gantep.edu.tr

ORCID ID: 0000-0002-0064-8400

1. Introduction

According to the Agricultural Products Markets Reports for 2021 [1], rice production has increased globally overall, with Asian nations dominating the world in rice consumption. Additionally, according to the same report, the world's supply of rice climbed by 2.4% to 735.4 million tons in 2021/22. China produces 212 million tons of paddy and imports 4.5 million tons annually, while India produces 184 million tons. The data on rice exports and imports by countries, as well as data on paddy production, are shown in Figure 1.

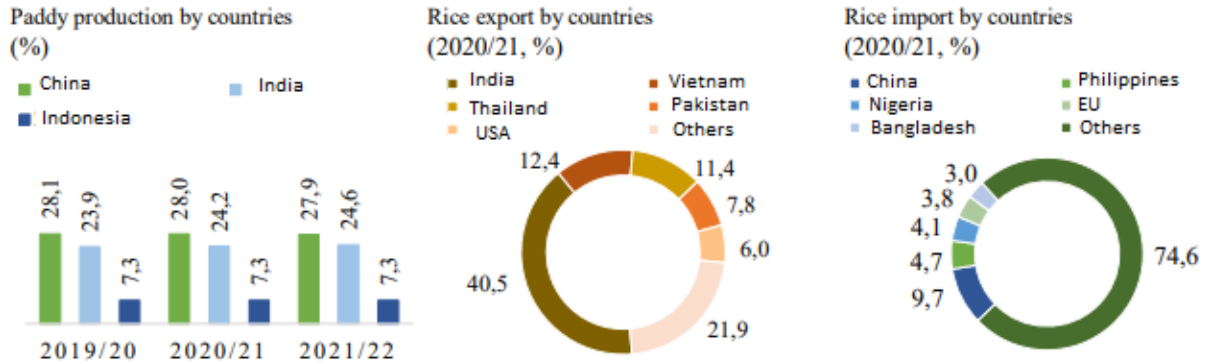


Figure 1. Paddy production, rice export, and import data by countries [1].

One of the nations with the highest increases in paddy production during the past ten years is Turkey. The growth in cultivated fields and the improvement in yield per unit area are the causes of this increase. On 125 000 acres of land, 980 000 tons of paddy were produced in 2020–21 [1]. Additionally, 14 158 tons of semi- and fully-milled rice were exported, along with 98 716 tons of paddy, 227 690 tons of semi-milled rice, and 8 000 tons of brown rice [1]. We refer to the 2021 reports of the Agricultural Products Markets [1] for a full report of the data about rice husk (such as consumption, importation, and productivity) in the world and Turkey.

Rice husks ash (RHA) is an agricultural residual or byproduct produced during the milling of rice that is frequently disposed of or underused, having a negative impact on the environment and increasing the cost of producing rice [2]. Due to the increased production of rice for human use, RHA production has also grown [3]. Since its production began, rice husk has mostly been utilized as a fuel in rice mills to create steam for the parboiling process, and around 25% of this rice husk's weight is transformed into RHA [4]. The amount of RHA produced by cogeneration plants is anticipated to rise dramatically due to the world's expanding population and rising demand for rice, a key staple grain. Because there won't be as many landfill places accessible in the future, it will be challenging to dispose of and manage the RHA effectively. Scientists have carried out several studies, and as a consequence of those investigations, it has been discovered that rice husk may be utilized in a variety of industries, from solar panel production to construction. The removal of heavy metal contamination from industrial wastewater using rice husks will be explored in this study.

In this study, the ability of the rice husk to behave as an adsorptive substance was investigated using geometry optimization and absorption simulation approaches. This was accomplished by looking into the mechanism of Cd^{2+} adsorption from industrial wastewater by rice husk. This study's findings supported the idea that using rice husks for adsorption can help with two major issues: first,

the large production rates of rice husks, which cause storage problems; and second, it is a less expensive way to remove heavy metals from industrial wastewater. All the studies in the literature focused on experimentally evaluating the adsorption efficiency of the RHA-based absorbents for removal of the heavy metals and the adsorption kinetics of this process experimentally. In terms of the application of geometry optimization and adsorption simulation approaches, our study is the first in the literature to offer a computer-based method to identify the binding mechanism of rice husks.

This study is regulated as follows: first, we provided a brief overview of the background of the study and a literature survey about the heavy metal adsorption from industrial wastewater by rice husks. Subsequently, we described the methodology used to handle geometry optimization and adsorption simulation. Then, we demonstrated the results of these simulation processes for removing cadmium ions from industrial wastewater by using an agricultural byproduct. Finally, we summarized the executed study in the conclusion section.

2. Background of the Study

The oldest known toxins are metals, which, depending on their concentration, can be detrimental to living things. Mining operations, the use of fossil fuels, the increasing rate of industrialization, etc. are all contributing factors to today's rise in heavy metal pollution [7]. The different kinds of metals emitted to the environment by the fundamental industries are listed in Table 1.

Table 1. Heavy metal distribution in industrial wastewater [8].

INDUSTRY	Fe	Zn	Cu	Ni	Pb	Sn	Hg	Cr	Mn	Cd
Coating Industry	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+
Leather Industry	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Metal Industry	-	+	+	-	+	+	+	+	-	+
Fertilizer Industry	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Iron-Steel Industry	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Energy Production	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Chlor-Alkali Production	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+
Petrochemistry	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+
Glass, Cement Industry	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Textile Industry	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Paper Industry	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-

Laws to protect the environment are now necessary around the world, including in Turkey, due to the rise in demands for scarce water resources and their exploitation. Today, less than 3% of water is suitable for consumption. As a result, safety measures must be implemented before the contaminated water is discharged into the surrounding environment. Given that industrial wastewater may include significant levels of hazardous contaminants, the WHO and legislation have set lower limits for the concentrations of heavy metals in the wastewater. For the list of the maximum values for heavy metals in marine ecosystems, industrial wastewater, and drinking water that the TSE-226, EU, WHO, and other organizations have permitted, we refer to [9] and [10].

Due to these adverse consequences, wastewater containing heavy metals must be filtered. Some techniques used for filtration include adsorption, chemical sedimentation, ion exchange, and reverse osmosis. These methods, however, fall well short of being affordable and useful in terms of facilities, technology, and other criteria. Because of this, attention was given to employing biowastes as adsorbents to remove heavy metals from wastewater, such as rice husks [11].

3. Literature Review

A byproduct of agriculture, rice husk is a plentiful natural resource. Due to its heat insulation characteristics and the high silica ratio of its structure, it finds use in a variety of industries, from the energy sector to the construction industry. For a detailed analysis of the application of rice husk ash in different areas, we refer to [12]. There is a large literature on the usage of rice husk ash for the adsorption of heavy metals from an aqueous medium that must be analyzed in depth, and we think it should be the focus of a different study. However, we will summarize the most important and the most recent studies in this section.

The potential use of rice husk as a biosorbent for the removal of heavy metal ions (Cr, Pb, Zn) present in aqueous solutions was investigated by Priya et al. [13]. And according to the findings of their experiments, rice husk powder can be used as a cheap adsorbent to remove heavy metal ions from industrial wastewater. Moreover, their experimental findings indicated that the amount of metal ion adsorption increases in direct proportion to the pH of the solution, the amount of rice husk powder used, and the duration of contact. In contrast, the adsorption effectiveness decreases when the temperature and the concentration of heavy metal ions rise.

Javed et al. [14] used RHA and iron-oxide-modified RHA adsorbents to extract arsenic from drinking water. In the study of Chanda et al. [15], silica is extracted from RHA and used to synthesize the zeolite Faujasite (FAU). This adsorbent is then used for batch-wise adsorptive removal of Cr(VI) and Pb(II) ions from an aqueous medium. Bahrami et al. [16] synthesized a biosorbent using RHA modified by hexadecyltrimethylammonium bromide surfactant (HDTMAB-RHA) to remove nitrate ions from the aqueous medium.

Montalvo-Andía et al. [17] investigated the absorption process of Cadmium (Cd) ions by utilizing untreated and chemically modified rice husk, and their results proved that the rice husk is an easily managed, low-cost, and efficient biosorbent. RHA and parboiled-RHA that have undergone chemical treatment are used by Gamboa et al. [18] as adsorbents to remove Cr(VI) from wastewater. Their experimental results confirmed that the RHA is an economical and environmentally friendly bio-material that effectively eliminates Cr (VI) from diluted aqueous solutions.

Hossain et al. [19] synthesized potassium hydroxide (KOH)-activated novel rice husk (RH)-based adsorbents and used them on synthetic wastewater to remove hazardous heavy metal ions (such as Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+}) using fixed-bed flow column adsorption. It can be said that the considerable capacity of these novel adsorbents to adsorb heavy metals and dyes will lead to a new understanding of adsorption mechanisms and the creation of next-generation commercial adsorbents for the treatment of industrial wastewater.

Because rice husk ash is a porous substance with a high silica content, Nurandini [20] further demonstrated that it has a significant ability to absorb heavy metals in water. The goal of this study was to determine the optimum amount of rice husk ash that could be used as an adsorbent and the maximum amount of Hg^{2+} ions that could be absorbed from the column adsorption process utilizing RHA.

For further information on the adsorption properties of rice husk and studies on this subject, we refer to [8] and the latest review study [13], and we refer to [21] and [22] for rice husk usage for the removal of textile dyes from industrial wastewater. We can infer from the literature that chemical adjustments have a favorable impact on the adsorption capacity of these agricultural sorbents.

All the studies mentioned above focused on experimentally evaluating the adsorption efficiency of the RHA-based adsorbents for removal of the heavy metals based on some criteria such as adsorbent dosage, pH, pollutant concentration, and interaction time. Additionally, they studied the adsorption kinetics of this process experimentally. In our study, we used computer programming to show the adsorptive feature of rice husks. This is the first study in the literature to provide a computer-based strategy for optimizing the binding mechanism of rice husk through the use of geometry optimization and using absorption simulation techniques for modeling Cd^{2+} adsorption from industrial effluent by rice husk.

4. Materials and Methods

The proposed methodology starts with creating the molecular projections of the polyacrylamide, combination structure, and rice husk on the computer-generated media. The expected 36 structures that will arise when Cd has been adsorbed are then shown and optimized.

A two-step process can be used to summarize the optimization of a structure [9]. The first one is called an energy assessment (for a given conformation, an energy statement must be described and analyzed), and the second one is called a conformation adjustment (the conformation is modified to find the minimum energy value; this value could be discovered after a single adjustment or after thousands of iterations). The size of the structure and the complexity of the algorithm influence the number of iterations.

Comparing the structures with various optimization energies, the most stable structure is found to have the lowest energy. Additionally, it was discovered that Cd binds to the adsorbent at that location. The geometry optimization process will be explained in Section 4.1 in detail. All of this research was completed using the Gaussian 0.9 software package, Semi-Empirical/PM3MM module.

As a next step, the adsorption capability of rice husk covered with polymers is examined using the Material Studio 6.1 software. Using the Adsorption Locator module of this application, we computed the adsorption energies of 36 hypothetical structures on an unmodified rice husk. After that, the structures with the highest adsorption energies were identified, along with the adsorption energies at which the Cd ion binds in single, double, quadruple, and sextant bonds.

Adsorption Locator modules, which we utilized to simulate the adsorption of Cd ions to rice husk adsorbent, are based on three hypotheses. These ideas include the Metropolis Monte Carlo method [23, 24], the generation of substrate-adsorbate configurations [25], and the Simulated Annealing Algorithm [26]. We selected the Simulated Annealing Algorithm for the adsorption energy calculations.

The primary principle of the Simulated Annealing algorithm was influenced by the annealing theory. This algorithm simulates the cooling process that occurs in molten materials. First, the algorithm begins with an initial solution (Q) and a temperature value (T). Then, based on the

employed neighbor structure, it identifies the neighbor of the current solution and determines the objective function value of the neighbor solution at each iteration.

The Boltzmann-type exponential probability distribution, which is controlled by a temperature parameter T , determines whether these new neighbor solutions are accepted. The acceptance likelihood (p) of a given solution is:

$$p = 1, \quad \text{if } Q_{\text{new}} < Q_{\text{current}} \quad \text{or}$$

$$p = e^{-(Q_{\text{new}} - Q_{\text{current}}) / T}, \quad \text{in another case}$$

The best solution is then left unchanged if none of the conditions are met, and the temperature value is updated at the end of each iteration. For a detailed explanation of the Simulated Annealing algorithm, we refer [9] and [26].

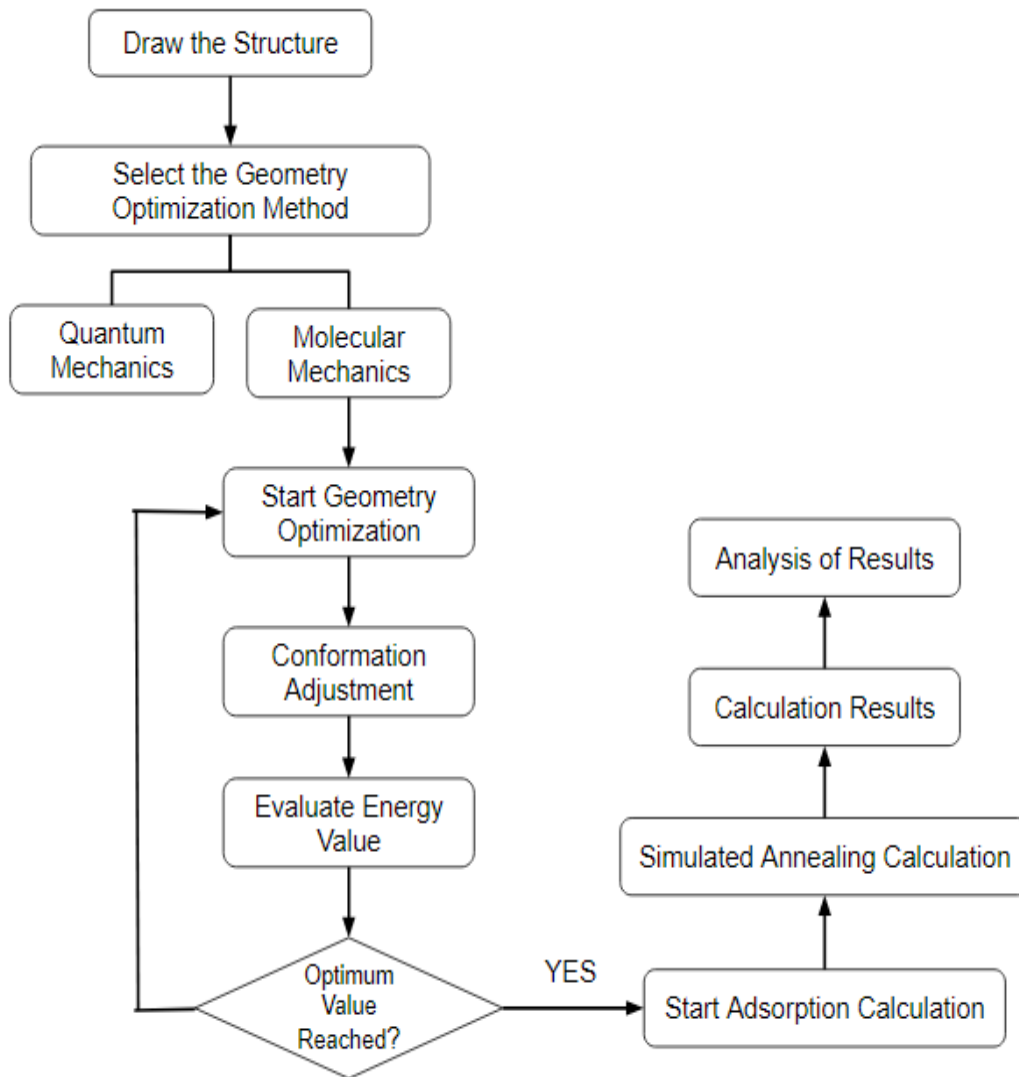


Figure 2. Flowchart of the proposed methodology.

After adsorption energies are calculated via the Adsorption Locator tool, these results are analyzed, and the structure with the highest energy value is chosen. The adsorption simulation process will be explained in Section 4.2 in detail.

We summarized the overall methodology that we utilized in our investigation in Figure 2. All experiments were run on an Intel® Core™ i5-3317U CPU @ 1.7 GHz with 8GB RAM computer.

4.1. Geometry Optimization

The technique of iterating on a molecule to determine the lowest energy state where it is stable or to define the reaction's intermediate products is known as geometry optimization [27]. In order to do geometry optimization, the method starts with a set of cartesian coordinates for a chemical and looks for a new set of coordinates with the least amount of potential energy. If the energy has decreased to its lowest level or the target structure has taken on a particular shape, the program converges and presents the results of the computations. The given error is checked, the geometry data is managed, and an appropriate value must be input for the following run if the program does not converge.

There are two markers for the effectiveness of the optimization: the number of iterations required to converge to the minimum and the time it takes to assess the energy expression. Additionally, there are various standard algorithms for a structure's geometry optimization. These algorithms are [28]:

- Steepest Descents [29]
- Conjugate Gradient [30]
- Newton- Raphson methods [31]

The number of optimization cycles and the root-mean-square gradient are two convergence criteria that can be utilized in optimization calculations. Since it might be challenging to predict the precise number of cycles required for good geometry optimization, the root-mean-square gradient can be utilized to end the optimization process. When mixing optimization techniques are used, the cycle number can be utilized as a termination. The default number of cycles is determined by the Gaussian 0.9 software to be 15 times the number of atoms.

The molecular structures of polyacrylamide and rice husk were simulated in this section. Subsequently, the Gaussian 0.9 package program was used to model the start-up geometries of the prepared adsorbent from polyacrylamide and rice husks and the probable structures that would occur when Cd was adsorbed.

4.2. Adsorption Simulation

As we have already stated, it is crucial to effectively and safely purify industrial wastewater. As a substitute, it has been extensively researched to use agricultural and inexpensive products as sorbents. Recent research has focused primarily on agricultural materials and their byproducts, such as rice husk, sawdust, treated orange trash, etc. [32-34].

Subsequently, we examined the adsorption property of polymer-coated rice husks using the Material Studio 6.1 software. Using the Adsorption Locator function, we computed the adsorption

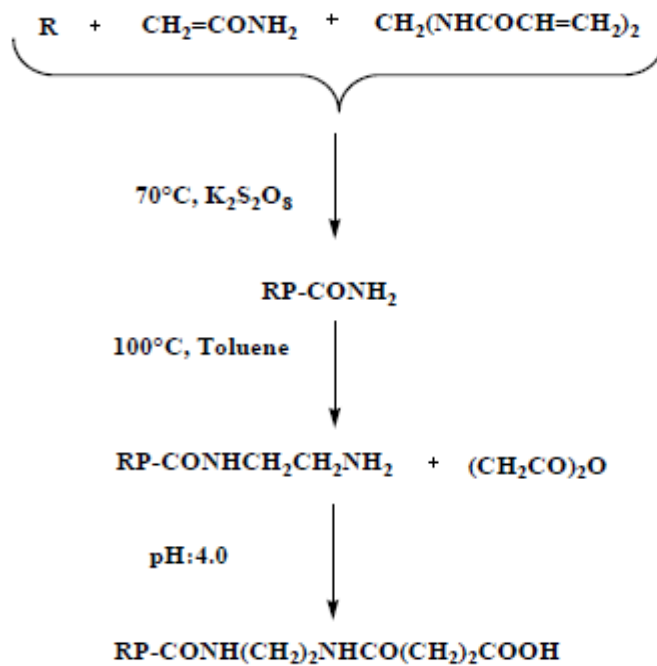
energies of our 36 potential structures. After that, the structures with the highest adsorption energies were identified, along with the adsorption energies at which the Cd ion binds in single, double, quadruple, and sextant bonds.

The Adsorption Locator is used to discover low-energy adsorption locations on the adsorbent and simulate the adsorption of pure adsorbates or adsorbate combinations. In adsorption calculation studies, there are some advantages to using a computer program as opposed to an experimental study, such as cost and time savings, the ability to develop new materials faster than through experimentation, a reduction in researcher workload, an increase in productivity, etc.

5. Results

5.1. Results of the Geometry Optimization

In this part of the study, we attempted to explain the binding mechanism of Cd^{2+} to the adsorbent, prepared by combining polyacrylamide and rice husks. Figure 3 demonstrates the reaction mechanism of the prepared adsorbent. adsorbent that will be employed in the Cd adsorption process. The rice husk is designated by the R in the adsorbent.



RP: polymer coated adsorbent (rice husk)

Figure 3. Prepared adsorbent [35].

The next step was to determine the likely areas where the Cd atom would bind to the adsorbent once the structure of the rice husk and the generated adsorbent had been established. We then presented potential molecular structures using the package program, followed by geometry optimizations to find the most stable structure.

The structure that requires the least amount of optimization energy would be the most stable. These steps enable the identification of the region where Cd binds to the structure. As these probable structures were being determined, the functional groups (typically phosphate (PO₄), amide (NH₂), thiols (SH), carboxylate (COO), and hydroxide (OH)) that connect the metal ion to the biomaterial surface were taken into consideration [36].

A geometry's potential energy for a molecule is described by Rappié et al. [37] as “a sum of bonded ($E_R, E_\theta, E_\Phi, E_w$) interactions and nonbonded ($E_{vdw} + E_e$) interactions [37]:

$$E = E_R + E_\theta + E_\Phi + E_w + E_{vdw} + E_e \quad \text{Equation 1.}$$

E_R = The valence interactions consist of bond stretching

E_θ = Angle bend term

E_Φ = Torsional term

E_w = Inversion parameter

E_{vdw} = Van der waals energy

E_e = Electrostatic energy”

The software was utilized to determine the energy value because it is impossible to calculate it manually. The calculated optimization energies as an outcome of the geometry optimization are shown in Table 2. If we had to describe the representations in the table, we would say that “rice husk ash- polyacrylamide-Cd-O1 (1)” represents the primary condition where the Cd ion has a single bond with an O ion, and “rice husk ash- polyacrylamide-Cd-O1 (2), (3), and (4)” represent the Cd ion having four single bonds with different O ions. One of the four instances of the Cd ion having a double bond with an O ion is shown as “rice husk ash- polyacrylamide-Cd-O2 (3)”. So, while the numbers around the atom indicate whether the bonding is single, double, quadruple, or sextet, the numbers in parenthesis reveal how many various ways of bonding are in these numbers.

Table 2. Optimization energies of prepared adsorbent, polyacrylamide, rice husk ash, and all potential Cd-bound molecules.

Structures	Optimization Energies(kcal/mol)	Structures	Optimization Energies (kcal/mol)
Rice husk ash	2,5	Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N2(1)	83
RHA- polyacrylamide	68	Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N2(2)	82
polyacrylamide -cis	11	Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N2(3)	88
polyacrylamide -trans	10	Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N2(4)	81.5
Rice husk ash- polyacrylamide-Cd- O1(1)	65	Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N2(5)	73

Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O1(2)	65	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(6)	77
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O1(3)	66	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(7)	80
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O1(4)	66	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(8)	98
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O2(1)	67	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(9)	95
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O2(3)	70	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(10)	75
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O2(4)	74	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(11)	70
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-O2(2)	70	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N2(12)	64
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(1)	64	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4(1)	155
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(2)	64	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4(2)	128
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(3)	63	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4(3)	128
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(4)	66	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4(4)	140
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(5)	64	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4-O2(1)	352
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(6)	65	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4-O2(2)	329
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(7)	65	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4-O2(3)	354
Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(8)	65	Rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4-O2(4)	325

Table 2. Continue..

Figure 4 is provided based on the calculated optimization energies as an outcome of the geometry optimization which is provided in Table 2. As we mentioned above, the structure that requires the least amount of optimization energy would be the most stable. We can infer from Figure 4 that the structure “Rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N1(3)” has the minimum optimization energy and the most stable structure. These steps enable the identification of the region where Cd binds to

the structure. Additionally, the structures in which the Cd ion forms single bonds have lower optimization energies. In this instance, it can be claimed that the structures are more stable when the Cd ion takes the H ions from the O and N ions.

Furthermore, there are a few structures (such as "rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N1(5)") whose optimization energies are comparable to those of "rice husk ash- polyacrylamide-Cd-N1(3)" and may be classified as stable. Figure 5 provides this structure's optimization energies, which are single-bonding Cd ion configurations.

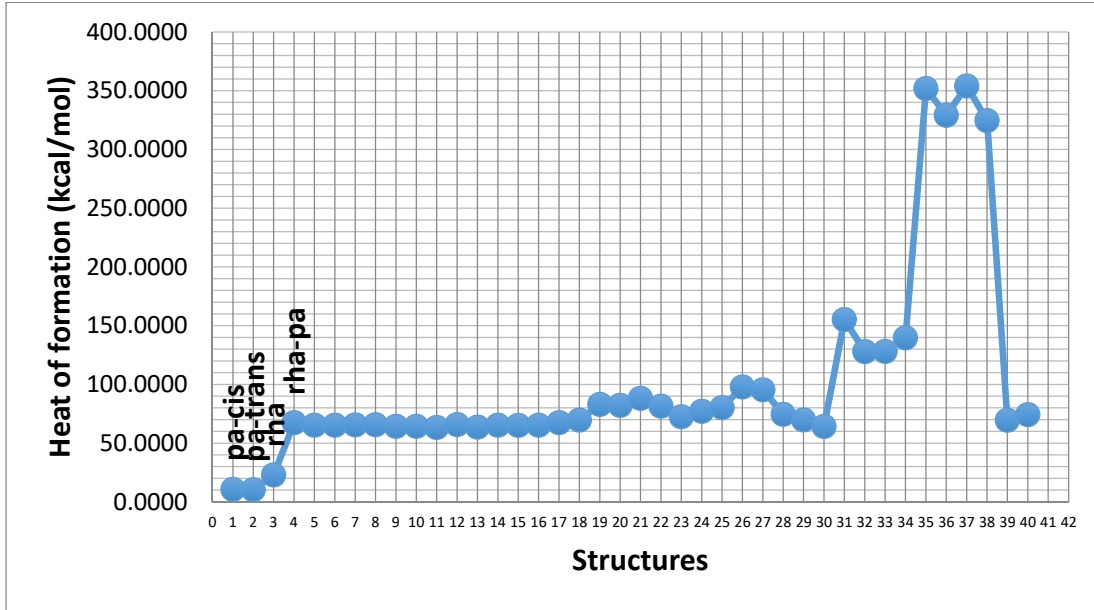


Figure 4. Adsorbent, polyacrylamide, rice husk ash, and all potential Cd-bound molecules.

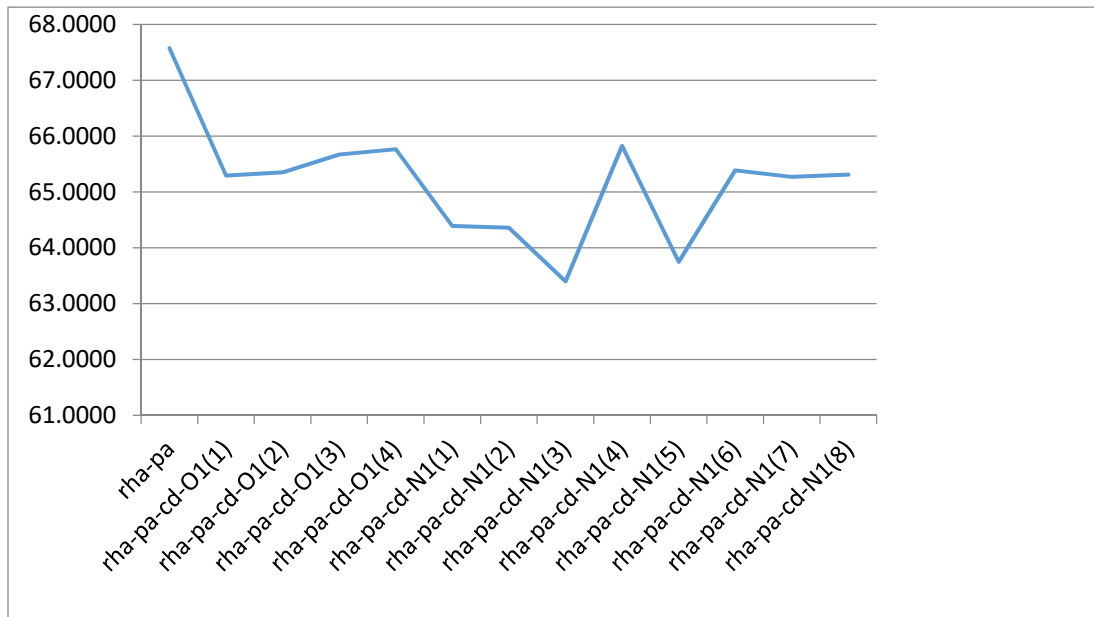


Figure 5. Structure-specific optimization energies for single-bonding Cd ion configurations.

5.2. Results of the Adsorption Simulation

According to research by Sharma and colleagues [35], polymer-coated rice husk is a powerful and affordable adsorbent for removing Cd^{2+} ions from aqueous solutions. In 3 hours at a pH of 9, in the concentration range of 30–300 mg/L, 85% of Cd^{2+} ions can be absorbed. According to recent studies, rice husk has an adsorption capacity of 21.36 mg/g, according to a study by Roy et al. [38], 0.16 mg/g by Munaf and Zein [39], and 7 mg/g when modified with NaOH solution by Tarley et al. [40].

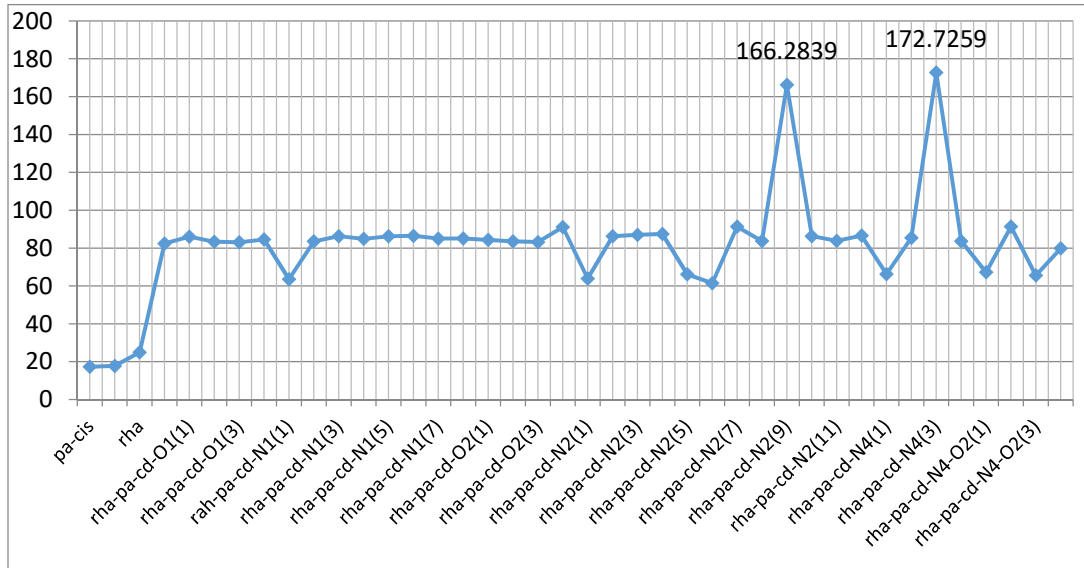


Figure 6. Energy levels of all potential configurations for adsorption

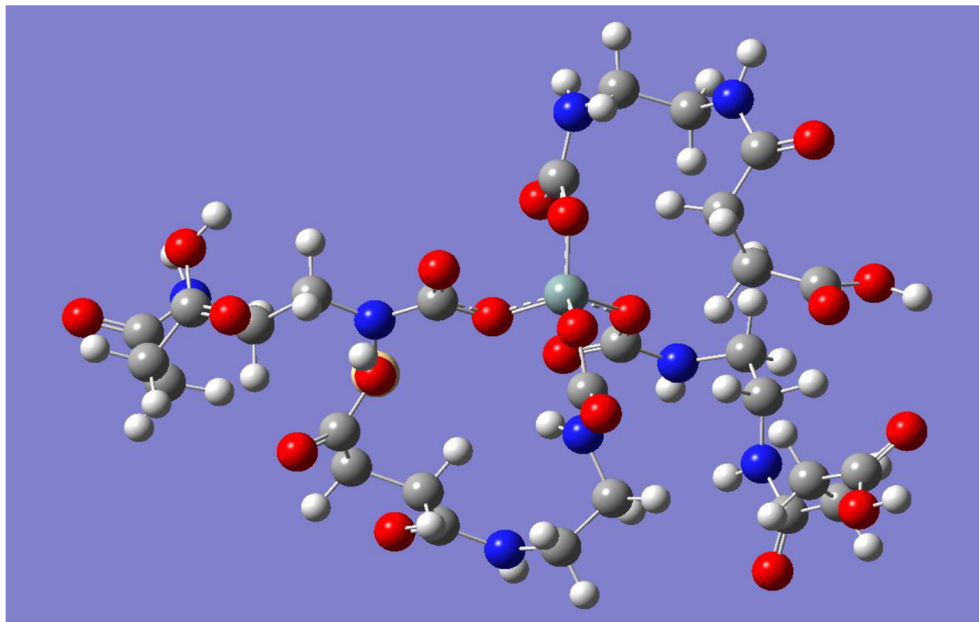


Figure 7. Molecular visualization of the optimized rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(3) structure.

In this study, we demonstrated the adsorptive property of rice husks using computer programming. The adsorption energies of configurations bound to Cd have been computed. The adsorption energy of potential geometrically optimized structures after Cd ion bonding is displayed in Figure 6. Results indicate that the “rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N4(3)” structure has the maximum adsorption capacity when all of the structures are taken into consideration. Additionally, we can infer from Figure 6 that the adsorption energy of rice husk is 44.9287 before polymer treatment and 82.4124 after polymer treatment. This finding suggests that polymer treatment increases the rice husk's adsorption capacity. Figure 7 demonstrates the molecular visualization of the optimized rice husk ash-polyacrylamide-Cd-N1(3) structure.

5. Conclusions

Due to high production rates, rice husk storage is a problem that can be solved by using them for adsorption. Additionally, using rice husks for adsorption is a more affordable way to remove heavy metals from industrial effluent. In our research, we looked at the rice husk's capacity for adsorptive action. Our study is the first in the literature to provide a computer-based strategy for optimizing the binding mechanism of rice husk through the use of geometry optimization and absorption simulation techniques. Additionally, the mechanism of Cd²⁺ adsorption from industrial effluent by rice husk was investigated.

Initially, the molecular visualizations of the polyacrylamide, rice husk, their composite structure, and the expected structures that will arise once Cd has been adsorbed in the medium were sketched and optimized. The region of the structure where Cd binds was identified. Evaluating and contrasting the structures' optimization energies reveals that those in which the Cd ion forms single bonds have fewer optimization energies. Throughout this situation, it may be argued that the structures with the highest degree of stability are those in which the Cd ion accepts the H ions rather than the O and N ions. For these geometry optimizations, we employed the software from the Gaussian® 0.9 package.

The Material Studio® 6.1 software was then used to demonstrate the adsorptive characteristics of rice husk. The adsorption energies of Cd-bounded structures have been computed and contrasted. In this instance, the structure with the highest energy value was chosen. As a result, the ability of the rice husk to behave as an adsorptive substance was investigated using geometry optimization and absorption simulation approaches.

An important finding of our study is that expensive materials like active carbon may be replaced with rice husks as adsorbents. And the use of inexpensive and abundant adsorbent rice husk ash for removing cadmium ions is a promising alternative for application in wastewater treatment, which is a difficult task. Moreover, this finding proves that polymer treatment increases the rice husk's adsorption capacity. All these findings are compatible with the results of studies in the literature.

Furthermore, all of the research in the literature concentrated on experimentally assessing the RHA-based adsorbents' ability to remove heavy metals based on a number of factors, including adsorbent dosage, pH, pollutant concentration, and interaction time. They also carried out experimental research on the adsorption kinetics of this procedure. In our study, we used computer programming to show the adsorptive feature of rice husks. This is the first study in the literature to provide a computer-based strategy for optimizing the binding mechanism of rice husk through the use of geometry optimization and using absorption simulation techniques for modeling Cd²⁺

adsorption from industrial effluent by rice husk. Comparing the proposed procedure to experimental ones, it is demonstrated that the proposed method is quicker and less expensive in many aspects (such as workload, used materials, and labor skills).

As we mentioned above, there are several advantages to using a computer program in adsorption calculation studies rather than an experimental study, including cost and time savings, the ability to develop new materials more quickly than through experimentation, a decrease in researcher workload, an increase in productivity, etc. The computational method used in adsorption calculations is crucial in terms of providing a basis for extensive experimental studies. These studies make it easier to determine the starting points of experimental studies and direct the study. Despite this, more research is still required to determine whether using the method in substantial wastewater treatment plants is both technically and economically feasible, which is in the scope of our future research plan.

References

- [1] <https://arastirma.tarimorman.gov.tr/tepge/Belgeler/> (Last Access Date: 19.11.2022).
- [2] Jittin, V, Bahurudeen, A, Ajinkya, SD. Utilization of rice husk ash for cleaner production of different construction products. *J. Cleaner Prod.* 2020; 263, 121578.
- [3] Siddika, A, Al Mamun, MA, Alyousef, R, Mohammadhosseini, H. State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 2021; 33(5):294-307.
- [4] Zhu, H, Liang, G, Zhang, Z, Wu, Q, Du, J. Partial replacement of metakaolin with thermally treated rice husk ash in metakaolin-based geopolymer. *Constr. Build. Mater.* 2019; 221:527–538.
- [5] Katalay, S, Parlak, H. The Effects of Cadmium on Erythrocyte Structure of Black Goby. *E.Ü. Su Ürünleri Dergisi* 2004; 21 (1-2):99-102.
- [6] Satoh, M, Koyama, H, Kaji, T, Kito, H, Tohyama, C. Perspectives on Cadmium Toxicity Research. *Tohoku J. Exp. Med.* 2002; 196: 23-32.
- [7] El-Sokkary, GH, Abdel-Rahman, GH, Kamel, ES. Melatonin Protects Against Lead-Induced Hepatic and Renal Toxicity in Male Rats. *Toxicology* 2005; 213 (1 2): 25-33.
- [8] Öztekin, TB. *Deri Sanayi Atık Sularından Krom (VI) İyonunun Adsorpsiyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Manisa: Celal Bayar Üniversitesi; 2009.
- [9] Şirin, Y. *Yüksek Lisans Tezi. A Computer-Based Approach for Modeling of Removal of Cd²⁺ Ion from Industrial Wastewater with Polyacrylamide Coated Rice Husk Ash*. Gaziantep: Gaziantep Üniversitesi; 2010.
- [10] Mahmud, HNME, Huq, AO, binti Yahya, R. The removal of heavy metal ions from wastewater/aqueous solution using polypyrrole-based adsorbents: a review. *RSC advances* 2016; 6(18): 14778-14791.
- [11] Pourshakiba, M. *Pirinç kabuğu külünden, nano gözenekli kalsiyum silikat üretimi, karakterizasyonu ve ağır metal adsorpsiyonunda kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi; 2012.
- [12] Moayedi, H, Aghel, B, Nguyen, H, Rashid, ASA. Applications of rice husk ash as green and sustainable biomass. *Journal of Cleaner Production* 2019; 237: 117851.

- [13] Priya, AK, Yogeshwaran, V, Rajendran, S, Hoang, TK, Soto-Moscoco, M, Ghfar, AA, Bathula, C. Investigation of mechanism of heavy metals (Cr⁶⁺, Pb²⁺ & Zn²⁺) adsorption from aqueous medium using rice husk ash: kinetic and thermodynamic approach. *Chemosphere* 2022; 286: 131796.
- [14] Javed, K, Mahmood, S, Ammar, M, Abbas, N, Shah, MY, Ahmed, T, Mustafa, G. Rice husk ash adsorbent modified by iron oxide with excellent adsorption capacity for arsenic removal from water. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2022; 1-10.
- [15] Chanda, R, Hosain, M, Sumi, SA, Sultana, M, Islam, S, & Biswas, BK. Removal of chromium (VI) and lead (II) from aqueous solution using domestic rice husk ash-(RHA-) based zeolite faujasite. *Adsorption Science & Technology* 2022.
- [16] Bahrami, M, Amiri, MJ. Nitrate removal from contaminated waters using modified rice husk ash by Hexadecyltrimethylammonium bromide surfactant. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis* 2022; 135(1): 459-478.
- [17] Montalvo-Andía, J, Reátegui-Romero, W, Peña-Contreras, AD, Zaldivar Alvarez, WF, King-Santos, ME, Fernández-Guzmán, V, ... & Puris-Naupay, JE. Adsorption of Cd (II) using chemically modified rice husk: characterization, equilibrium, and kinetic studies. *Adsorption Science & Technology* 2022.
- [18] Gamboa, VS, Benvenuti, EV, Kinast, ÉJ, Pires, M, Gasparin, FP, & Ries, LADS. Efficient removal of chromium (VI) from dilute aqueous solutions using agro-industrial residue based parboiled rice husk ash. *Chemical Engineering Communications* 2022; 209(8): 1096-1110.
- [19] Hossain, N, Nizamuddin, S, & Shah, K. Thermal-chemical modified rice husk-based porous adsorbents for Cu (II), Pb (II), Zn (II), Mn (II) and Fe (III) adsorption. *Journal of Water Process Engineering* 2022; 46: 102620.
- [20] Nurandini, D. Investigation of the influence of particle size of rice husk ash as adsorbent for mercury in column adsorption system 2022.
- [21] Gun, M, Arslan, H, Saleh, M, Yalvac, M, Dizge, N. Optimization of silica extraction from rice husk using response surface methodology and adsorption of safranin dye. *International Journal of Environmental Research* 2022; 16(2): 1-13.
- [22] Welagedara, MC, Karunarathne, DGGP, Manipura, A. Synthesis of Zeolites from Rice Husk Ash for Removal of Dyes in Wastewater 2022; 573-585.
- [23] Metropolis, N, Rosenbluth, AW, Rosenbluth, MN, Teller, AH, Teller, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *J. Chem. Phys.* 1953; 21: 1087.
- [24] Newman, MEJ, Barkema, GT. Monte Carlo Methods in Statistical Physics. Oxford: Clarendon Press; 1999.
- [25] Frenkel, D, Smit, B. Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications. 2nd Edition, Academic Press: San Diego; 2002.
- [26] Kirkpatrick, S, Gelatt, CD, Vecchi, MP. Optimization by Simulated Annealing. *Science* 1983; 220(4598): 671-680.
- [27] Eryılmaz, E. Hidrojen İçerikli Bazı Moleküllerin Kimyasal Reaksiyon Süreçlerinin Ab Initio Çalışması. Doktora tezi, Konya; Selçuk Üniversitesi: 2007.

- [28] Fletcher, R. Practical Methods of Optimization. New York: John Wiley & Sons; 1980.
- [29] Natali, M, Attene, M, Ottonello, G. Steepest descent paths on simplicial meshes of arbitrary dimensions. Computers & Graphics 2013; 37:687–696.
- [30] Hestenes, MR, Stiefel, E. Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear System. Journal of Research of the National Bureau of Standards 1952; 49(6): 409-436.
- [31] Eade, RHA, Robb, MA. Direct minimization in MC SCF theory - the Quasi-Newton method. Chem. Phys. Lett. 1981; 83:362-68.
- [32] Sharma, N, Kaur, K, Kaur, S. Kinetic and equilibrium studies on the removal of Cd²⁺ ions from water using polyacrylamide grafted rice (*Oryza sativa*) husk and (*Tectona grandis*) saw dust. Journal of Hazardous Materials 2009; 163: 1338-1344.
- [33] Sharma, N, Singh, J, Goyal, M. Studies on an Economically Viable Treatment Process for Removal of Zn²⁺ ions from Water using Chemically Modified Rice (*Oryza sativa*) Husk. In: International Conference on Agricultural, Environment and Biological Sciences (ICAEBS'2012), Phuket, Thailand; 2012.
- [34] Taty-Costodes, VC, Fauduet, H, Porte, C, Delacroix, A. Removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto sawdust of *Pinus sylvestris*. J. Hazard. Mater. 2003; 105:121–142.
- [35] Sharma, N, Kareer, B, Sharma, A. Adsorption study for removal of Zn²⁺ and Ni²⁺ ions from aqueous solution using rice (*Oryza sativa*) husk. J. Environ. Agric. Food Chem. 2007; 6 (8).
- [36] Çelekli, A, Bozkurt, H. Bio-sorption of cadmium and nickel ions using *Spirulina platensis*: Kinetic and equilibrium studies. Desalination 2011; 275: 141-147.
- [37] Rappi , AK, Casewit, CJ, Colwell, KS, Goddard III, WA, Skid, WM. UFF, a Full Periodic Table Force Field for Molecular Mechanics and Molecular Dynamics Simulations. J. Am. Chem. SOC. 1992; 114: 10024-10039.
- [38] Roy, D, Greenlaw, PN, Shane, BS. Adsorption of heavy metals by green algae and ground rice hulls. Journal of Environmental Science & Health Part A 1993; 28(1): 37-50.
- [39] Munaf, E, Zein, R. The use of rice husk for removal of toxic metals from wastewater. Environmental Technology 1997; 18(3): 359-362.
- [40] Tarley, CRT, Ferreira, SLC, Arruda, MAZ. Use of modified rice husks as a natural solid adsorbent of trace metals: characterization and development of an online preconcentration system for cadmium and lead determination by FAAS. Microchemical Journal 2004; 77(2): 163-175.

BİR ISI BORULU NÜKLEER REAKTÖRDE ISI LİMİTASYONLARININ ANALİZİ

Gizem BAKIR*

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Sivas, 58140,
Türkiye. Geliş Tarihi/Received Date: 30.11.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.01.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1212192

ÖZ

Son zamanlarda, daha güvenli ısı çekilmesini sağlayan pasif güvenlik sistemi olan ısı borulu nükleer reaktörlere olan ilgi artmıştır. Isı boruları kullanılırken en önemli konulardan biri ısı limitasyonlarının belirlenmesidir. Bu makalede 900 K'de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları hesaplanmıştır. Isı borusunun çalışma sıvıları olarak potasyum, sodyum ve lityum ayrı ayrı ele alınmıştır. Isı borusu limitasyonlarının hesaplamalarında en uygun korelasyonlar kullanılmıştır. Üç farklı çalışma sıvısının ısı limitasyonları birbirleriyle kıyaslanmıştır. 900 K için potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılı ısı boruları için en yüksek ısı çekimleri sırasıyla 35, 110 ve 24 kW olarak bulunmuştur. Isı limitasyonları kıyaslandığında 900 K için en yüksek ısı çekilimi sodyum soğutuculu ısı borusu olarak saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isı borulu nükleer reaktör, ısı borusu, ısı borusu limitleri

ANALYSIS OF HEAT LIMITATIONS IN A HEAT PIPE NUCLEAR REACTOR

ABSTRACT

Recently, interest in heat pipe reactors which have passive safety systems that provide safer heat extraction, has increased in the World. One of the most important issues when using heat pipes is the determination of heat limitations. In this article, heat limitations are calculated for a heat pipe reactor operating at 900 K. Potassium, sodium and lithium are examined separately as the working fluids of the heat pipe. Optimum correlations were used to calculate heat pipe limitations. The heat limitations of three different working fluids were compared with each other. The highest heat extractions were found as 35, 110 and 24 kW for the potassium, sodium, and lithium working fluid heat pipes, respectively. When the heat limitations were compared, the highest heat extraction for 900 K was found as the sodium coolant heat pipe.

Keywords: Heat pipe reactors, heat pipe, heat pipe limitations

1. Giriş

Güvenilir bir elektrik şebekesinden uzaktaki uzak konumlarda güç ihtiyacı için, nükleer enerji önemli bir kaynaktır. Isı borulu reaktörler, yapıları gereği mobil uygulamalar için mükemmel şekilde uygundur. Bir ısı borusu reaktörü, doğası gereği geleneksel reaktörlerden daha basit, daha küçük ve daha güvenilirdir. Isı borulu reaktörlerin kilit kısmı, reaktör korunu soğutmak için kullanılan ısı borularıdır. Isı borusu, çalışma akışkanının faz değişiminden yararlanır ve çok küçük sıcaklık düşüşleriyle evaporatörden yoğunlaşma ucuna büyük miktarda ısı taşır. Bu özellik, ısı borusunu bir nükleer reaktörden termal güç elde etmek için ideal bir araç haline getirir. Termal gücü çıkarmak için pompalı döngüden yararlanan geleneksel nükleer reaktör sisteminin aksine, ısı borulu reaktörler, termal gücü pasif olarak çıkarmak için yüzlerce ısı borusunu kullanır [1]. Bu sayede, reaktör sisteminin güvenilirliği ve güvenliği önemli ölçüde iyileştirilebilir. Isı boruları ısıyı çok küçük bir ısı kaybıyla ileten, termal verimliliği yüksek küçük cihazlardır [2]. Isı borusu kullanılırken ısı çekilmesinde en çok dikkat edilmesi gereken

*e-posta: gbakir@cumhuriyet.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2406-6376> (Sorumlu Yazar)

konulardan biri ısı borusu limitasyonlarıdır. Nükleer reaktörlerde ısı borularının ısı limitasyonlarını aşması sonucunda ısı borusu ısıyı çekemeyebilir ve bu durumda kazaya sebep olabilir.

Taşınabilir güç sistemi, modern enerji kullanımının gelişmesiyle birlikte basit yapılı, daha uzun ömürlü ve daha yüksek güç kapasitesi gerektirir. Geleneksel kimyasal veya güneş enerjisinin yerini almak için, ısı borusu soğutmalı nükleer reaktör en iyi seçeneklerden biridir. Isı borusunun nükleer reaktörde kullanımı ısı kayıplarının azalmasını sağlamakla birlikte pasif ısı transferini de sağlar. Birçok araştırmacı ısı borulu nükleer reaktör sistemi üzerine çalışmaktadır. Panda ve ark. [3] yüksek sıcaklıklı reaktörde sodyum soğutuculu ısı borusu üzerine çalışmışlardır. Isı borusunun üç boyutlu sayısal ağ modelini geliştirmişlerdir ve kullanıcı tanımlamalı hesaplamalı akışkanlar analiz kodu kullanmışlardır. Simülasyon sonuçları ile deneysel verileri karşılaştırmışlardır ve aralarındaki maksimum farkı %1,25 olarak bulmuşlardır. Ayrıca deneysel sonuçlarda, minimum sıcaklık düşüşü elde etmişlerdir. Zhang ve ark. [4] yüksek sıcaklıklı sodyum-potasyumlu ısı borulu reaktöründe başlangıç karakteristiği üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Başlangıç şartlarını analiz ve simüle etmek için nümerik bir kod geliştirmişlerdir. Hernandez ve ark. [5] ısı borulu mikroreaktör olan eVinci reaktörünün yakıt ve nötronik analizleri üzerine çalışmışlardır. Tasarlanan reaktörün 10 yıl yakıt yenilemesi olmadan çalışabileceğini ve reaktörde az miktarda nükleer atığın üretildiğini görmüşlerdir. Laubsher ve Dobson [6] yüksek sıcaklıklı ısı borulu ısı eşanjörlü nükleer reaktörde teorik ve deneysel modelleme yapmışlardır. Isı borulu ısı eşanjörünün teorik modelini ve tasarımını doğrulamak için çalışma akışkanı olarak Dowtherm-A kullanarak 2 kW'lık bir deneysel model oluşturmuşlardır. Uygun kaynama ve yoğunlaşma ısı transfer katsayılarının kullanılması koşuluyla, daha yüksek sıcaklıktaki sodyum soğutuculu ısı borulu ısı eşanjörünün performansını tahmin etmek için teorik modelin kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Jeong ve ark. [7] ileri nükleer reaktörlerde soğutma sistemi için hibrit ısı borusu kullanmışlardır. Analizler için HAD (Hesaplamalı Akış Dinamiği) kullanmışlardır. Sonuç olarak, hibrit ısı borusu konseptinin çubuk başına 18,20 kW ısıyı çıkardığını bulmuşlardır. Guo ve ark. [8] ısı borulu soğutmalı reaktörler üzerine gelişmiş bir model olan ağ modeli uygulamıştır. Çalışma sonucunda ağ yöntemine dayalı olarak, geliştirilmiş bir model önerilmişlerdir. Bu sayede daha gerçekçi sıcaklık dağılımlarını hesaplayabilmişlerdir. Ayrıca sistemde basınç dağılımı sonuçlarını alabilmişlerdir.

Isı borularında ısı limitasyonlarının çalışılması ısı borularının kullanımında en önemli konulardan biridir. Nemec ve ark. [9] -30 °C ile 140 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışan çeşitli çalışma sıvılarıyla fitilli ısı boruları için ısı limitasyonlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, ısı borusunun ısı taşınımı sınırlamalarını hesaplamak için bir matematiksel model önermişlerdir. Sınırlama değerlerinin, ısı borusu parametrelerine, fitil yapı parametrelerine ve çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerine bağlı olduğunu bulmuşlardır. Sonuçlarda, bu limitlerin ısı borusunun soğutma gücüne etkisini değerlendirmişlerdir. Tian ve ark. [10] ısı borulu nükleer reaktöründe ısı borusu limitlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı doldurma oranlarına sahip ısı boruları için çeşitli ısı transfer limitlerini test etmişlerdir. Yang ve ark. [11] 1 mm ve 2 mm iç çapa sahip toplam 40 adet bakır borudan oluşan kapalı döngü titreşimli ısı borularının operasyonel sınırlaması üzerine deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Çalışma akışkanı olarak R123 akışkanını, %30, %50 ve %70 dolun oranları ile kullanmışlardır. Dikey alttan ısıtmalı, yatay ısıtmalı ve dikey üstten ısıtmalı yönler olmak üzere üç operasyonel yönelim araştırmışlardır. 2 mm çaplı ısı borusunun için en iyi performansın alttan ısıtmalı dikey yönlendirmede olduğunu, 1 mm ısı borusu için ise yönlendirmenin neredeyse hiçbir rol oynamadığını bulmuşlardır. Melnyk ve ark. [12] LED soğutma için kullanılan ısı boruları için limitasyon hesaplamaları yapmışlardır. Çalışmalarında, 60°C sıcaklık değeri için maksimum ısı akısı olduğunu görmüşlerdir. Oluklu ısı borusu için ana ısı limitasyonunun, amonyak soğutma sıvısı için kaynama sınırı ve R141b için sürüklenme sınırı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, metal fiber kılcal yapıya sahip ısı borularında ise su, etanol ve R141b soğutucuları için ana ısı transferi sınırlamasının kılcal sınır olduğunu görmüşlerdir. Mansour, [13] farklı buhar sıcaklıklarında bir bakır-aseton ısısı için ısı taşınımı sınırlamalarını ve toplam ısı aktarım katsayısını araştırmışlardır. Genel ısı transfer katsayısı için yeni bir korelasyon elde etmişlerdir. Tüm ısı transferi limitleri üzerine gizli ısı buharlaşması, boru çapı ve Reynolds sayısının etkili olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca buhar sıcaklığının artmasıyla sonik, kılcal ve sürüklenme sınırları artarken, kaynama sınırının azaldığını gözlemlemişlerdir.

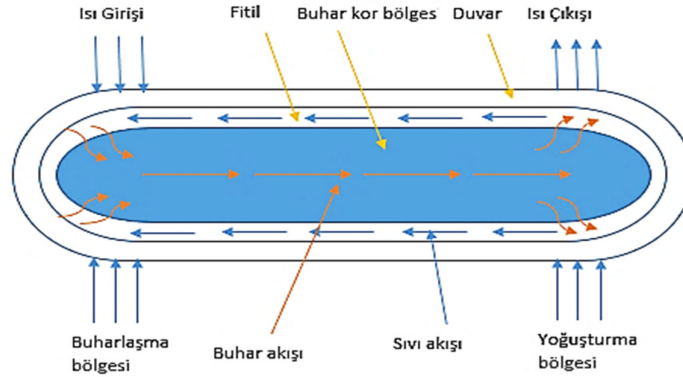
Bu çalışmanın amacı, pasif güvenlik sistemlerini arttırmak amacıyla kullanılan ısı borulu reaktörlerde ısı limitasyonlarını belirlemektir. 900 K'de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları

hesaplanmıştır. Nükleer ısı borusu için potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılarının kullanılma sebebi hem 900 K'de çalışabiliyor olmaları hem de nötron soğurma oranları küçük olması sebebiyle nükleer reaktör için kullanıma uygun olmalarıdır. Literatürden farklı olarak nükleer reaktörde ısı borusu için üç farklı çalışma sıvısı değerlendirilmiş ve bu çalışma sıvıları için ayrı ayrı ısı borusu limitasyon değerleri ve toplam ısı çekilim miktarları hesaplanmıştır.

2. Isı Borusu ve Isı Borulu Reaktörler

2.1. Isı Borusunun Yapısı

Isı borusu ısıyı iletme kapasitesi çok yüksek olan bir cihazdır. Şekil 1'de ısı borusunun yapısı görülmektedir. Geleneksel bir ısı borusu, buharlaşma, adyabatik (taşıma) ve yoğunlaştırma kısımlarına sahiptir. İlk olarak ısı, ısı borusu duvarı ve fitil tarafından ısı iletim yoluyla buharlaşma bölgesine aktarılır ve çalışma sıvısını buharlaştırır. Daha sonra buhar adyabatik bölge boyunca buhar basıncı etkisiyle yoğunlaştırma bölgesine doğru hareket eder. Kondenserde, buhar yoğunlaşır ve gizli buharlaşma ısını soğutucuya bırakır. Fitil yapısının oluşturduğu kılcal basınç etkisiyle yoğunlaşan sıvı evaporatöre geri döner. Böylece ısı borusu buharlaşmanın gizli ısını evaporatörden kondansatöre sürekli olarak taşıyabilir.



Şekil 1. Isı borusunun genel yapısı

2.2 Isı Borulu Reaktörler

Isı borulu reaktör, koru soğutmak için ısı borusu elemanlarını kullanan yeni tip bir reaktördür. Geleneksel reaktöre kıyasla kor yapısı, soğutma sıvısı ve malzeme açısından büyük farklılıklara sahiptir. Sistemin yapısı, ana boru hattı, sirkülasyon pompası ve yardımcı ekipmanların çıkarılmasıyla büyük ölçüde basitleştirilmiştir. Böylece düşük maliyetli bir sistem elde edilmiştir [14]. Filyon ısı, yapısal malzeme aracılığıyla ısı borularına aktarılır ve daha sonra ısı boruları, ısıyı enerji dönüşüm sistemine taşır.

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, kullanılan ısı borusunun ölçüleri ve malzemeleri [15] çalışmasından alınmış ve ısı borusu ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir.

Bu ısı borulu nükleer reaktörün çalışma ısı yaklaşık olarak 900 K alınarak; çalışma sıvılarının nihai sonuçları 900 K'e göre değerlendirilmiştir. Bu sıcaklıkta çalışmaya uygun olarak potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvıları ele alınmıştır [16, 17]. Ayrıca, nükleer reaktörde bir malzeme

seçilirken önemli etkenlerden biri de nötron soğurma değerleridir. Sodyum, potasyum ve lityum için nötron soğurma değeri yüksek olmadığından dolayı bu malzemeler nükleer reaktörde kullanılabilirler.

Tablo 1. Isı borusunun ölçüleri [15].

Buharlaşma bölgesi uzunluğu	1,0 m
Adyabatik bölge uzunluğu	0,5 m
Yoğuşturucu bölge uzunluğu	0,3 m
Buhar bölgesi çapı	0,06 m
Duvar kalınlığı	0,07 m
Fitil kalınlığı	0,065 m

Bir ısı borulu nükleer reaktörde ısı çekilim değerinin doğru hesaplanabilmesi için en uygun ısı limitasyon korelasyonları literatürden alınmıştır. Bu denklemler viskoz, sonik, kılcal, sürüklenme ve kaynama limitleri olup aşağıda verilmiştir. Bu denklemlerde kullanılan ısı borusu parametreleri Tablo 1’de belirtilen değerlerden alınmıştır. Ayrıca potasyum, sodyum ve lityumun termofiziksel özellikleri Ref [18-21]’den faydalanılarak hesaplanmıştır.

Viskoz limiti [22]

$$Q_v = \frac{\pi \cdot r_v^4 \cdot L_v \cdot \rho_v \cdot P_v}{12 \cdot \mu_v \cdot l_{eff}} \quad (1)$$

Burada r_v , buhar kor bölgesinin (m) kesit yarıçapıdır, L_v buharlaşma gizli ısısıdır (J/kg), μ_v buharlaşma bölgesindeki viskozitesi ($N \cdot s/m^2$), P_v buhar basıncı (Pa) ve ρ_v buhar yoğunluğudur (kg/m^3). l_{eff} ısı borusunun etkin uzunluğudur (m) ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$L_{eff} = \frac{L_{buharlaştıcı}}{2} + L_{adyabatik} + \frac{L_{yoğuşturucu}}{2}$$

Burada $L_{buharlaştıcı}$ buharlaşma bölgesi uzunluğu (m), $L_{adyabatik}$ adyabatik bölge uzunluğu (m) ve $L_{yoğuşturucu}$ yoğunlaşma bölgesi uzunluğudur (m).

Sonik limitasyon [22]

$$Q_s = 0,474 \cdot L_v \cdot \sqrt{\rho_v \cdot P_v} \quad (2)$$

Kılcal sınırlama [22]

$$Q_k = \frac{\sigma \cdot L_v \cdot \rho_l}{12 \cdot \mu_l} \cdot \frac{K \cdot A_w}{l_{eff}} \cdot \left(\frac{2}{r_{eff}} - \frac{\rho_l \cdot g \cdot \cos \psi \cdot l_t}{\sigma} \right) \quad (3)$$

Bu denklemde, K fitil geçirgenliği (m^2), A_w fitil kesit alanı (m^2), ρ_l sıvı yoğunluğu (kg/m^3), μ_l sıvı viskozitesi ($N \cdot s/m^2$), r_{eff} evaporatördeki fitil kılcal yarıçapı (m), g yerçekimi kuvveti ($9,8 m/s^2$) ve l_t borunun toplam uzunluğudur (m). Burada, ψ sıvı-fitil arasındaki temas açısıdır. Temas açısı, sıvının fitil yapısı üzerindeki ıslanabilirlik derecesinin bir ölçüsüdür. Burada bu açı 90° olarak alınmıştır. r_{eff} yüzey gözeneginin hidrolik yarıçapıdır (m) ve bu değer literatüre uygun olarak [23] alınmıştır. Ayrıca fitil geçirgenliği değerleri de literatüre uygun olarak alınmıştır [23].

Sürüklenme sınırlaması [23]

$$Q_{sr} = A_v \cdot L_v \cdot \sqrt{\frac{\rho_v \cdot \sigma}{2 \cdot r_c}} \quad (4)$$

Burada r_c yüzey gözeneginin hidrolik yarıçapıdır (m) ve bu değer literatüre uygun olarak [23] alınmıştır.

Kaynama limiti [23]

$$Q_k = \frac{4\pi\sigma\lambda_{eff}T_v l_{eff}}{L_v \rho_l \ln \frac{r_i}{r_e}} \cdot \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_c} \right) \quad (5)$$

burada, λ_{eff} kompozit fitilin ve çalışma sıvısının etkin termal iletkenliği (W/m K), T_v buhar doyma sıcaklığı (K), r_i iç kap yarıçapı (m), r_n kabarcık yarıçapıdır. r_i ve r_n değerleri literatüre uygun olarak [23] alınmıştır.

4. Sayısal Sonuçlar

4.1. Isı Borusu Limitasyonları

Isı borusunun çalışması ve performansı, borunun boyutuna ve şekline, fitil yapısına, çalışma sıvısına, doldurma oranına, eğim açısına ve çalışma sıcaklığına bağlıdır [24, 25].

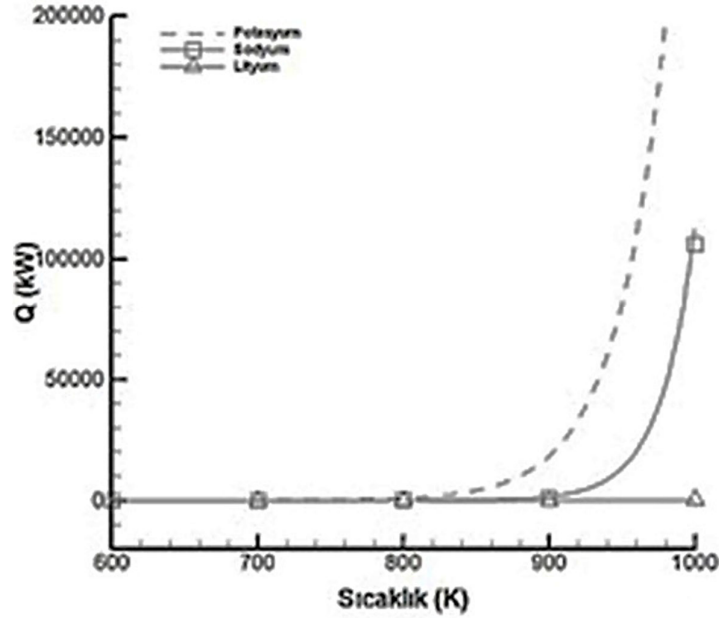
Isı borusundaki ısı aktarımı bazı koşullarla sınırlıdır. Bu nedenle, ısı borusu uygulamasına bağlı olarak bu parametrelerin doğru şekilde kullanılmaması, verimliliğini sınırlayan ve azaltan kısıtlamalara neden olabilir [24, 25].

Isı borularında ısı aktarımı sınırları şu şekilde sınıflandırılır; viskoz, sonik, kılcak, sürüklenme ve kaynama [25]. Bu çalışmada viskoz, sonik, kılcak, sürüklenme ve kaynama limitleri üç ayrı soğutucu için ele alınmıştır.

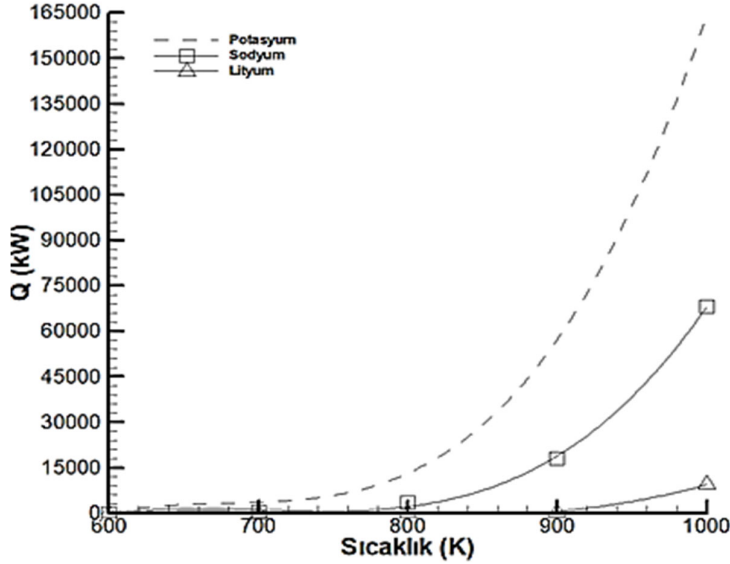
4.1.1. Viskoz Limiti

Isı borusunun performansını belirleyen değişkenlerden biri, çalışma akışkanının termofiziksel özellikleridir. Bu nedenle termal potansiyelinin artırılması, ısı transfer yüzeyini genişletmeden (eklenen kanatlar) ısı transferinin artmasına neden olur, bu da ısı borusu düşük sıcaklıklarda çalışırken maliyeti artırır. Doyma basıncı, buharın buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya ilerlemesi için gereken basınç gradyanı ile aynı büyüklükte olabilir. Bu durumda toplam buhar basıncı, buhar kanalındaki zıt viskoz kuvvetler tarafından dengelenecektir. Bu nedenle, buhar bölgesindeki toplam buhar basıncı, artan bir akışı sürdürmek için yetersiz kalabilir. Buhar bölgesindeki bu düşük akış durumu viskoz limiti olarak adlandırılır.

Viskoz limiti hesapları için Denklem 1 [22] kullanılmıştır. Şekil 2’de potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla viskoz limitlerinin değişimi görülmektedir. Her üç değer içinde viskoz limitinde 800 K’e kadar değerler çok düşük olurken, 800 K’den sonra viskoz limit değerleri artmaktadır. Bu artış 900 K’den sonra daha fazladır. 900 K sıcaklık değerinde, her üç çalışma sıvısı için viskoz limiti kıyaslandığı zaman en düşük viskoz değeri lityumda en yüksek viskoz değeri ise potasyumda gözlenmiştir.



Şekil 2. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla viskoz limitlerinin değişimi



Şekil 3. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sonik limitlerinin değişimi

4.1.2. Sonik Limiti

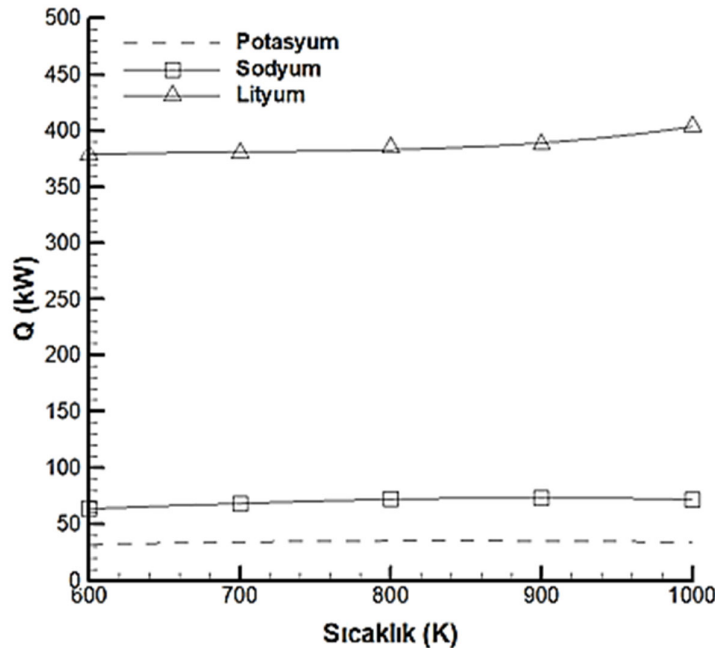
Sonik sınır, sıvı metal ısı borularında çok düşük buhar yoğunlukları olması halinde başlangıç durumunda veya düşük sıcaklıktaki çalışma şartlarında meydana gelir. Buhar hızı buharlaşma bölgesi boyunca artar ve bu bölgenin son kısmında maksimuma ulaşır. Bu şekilde olan bir akış düzeninin sınırlandırılması, sabit bir kütle akış hızına sahip yakınsayan-uzaklaşan bir nozulunkine benzerdir. Bu sınırlandırma buharlaştırıcı çıkışının boğazına tekabül ettiği yerdir. Bu sebeple, bu noktadaki buhar

hızının lokal ses hızını aşmaması beklenir. Bu akış koşuluna sonik sınırlama denir. Sonik limit genellikle ya ısı borusunun başlatılması sırasında ya da kararlı durum çalışması sırasında yoğunlaştırıcıdaki ısı transfer katsayısı yüksek olduğu durumda ortaya çıkar. Sonik limit, genel olarak yüksek buhar hızları ve düşük yoğunluklara sahip olmaları sebebiyle sıvı metal ısı borularıyla ilişkilendirilir. Kılcal sınırın aksine, sonik sınır aşıldığında önemli bir sorun oluşturmaz. Sonik sınırlama, belirli bir buharlaşma bölgesinin sonundaki sıcaklığına karşılık gelir. Buharlaşma bölgesinin uç kısmında sıcaklığının artırılması, bu limiti yeni bir yüksek sonik limite yükseltecektir. Sınırlama durumunda, yoğunlaştırıcı bölgesinde sıcaklık düşecek ve ısı transfer hızı artmayacaktır. Bu nedenle, sonik sınıra ulaşıldığında, ısı transfer oranındaki daha fazla artış ancak buharlaşma bölgesindeki sıcaklık arttığında gerçekleştirilebilir. Isı borularının sonik sınıra yakın veya sonik sınırda ısı oranı ile çalıştırılması, ısı borusu boyunca önemli bir aksel sıcaklık düşüşüne neden olur.

Şekil 3’de potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sonik limitlerinin değişimi verilmiştir. Sonik limit değerleri Denklem 2 [22] kullanılarak hesaplanmıştır. Her üç çalışma sıvısı sonik limitleri de sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Her üç değer için de 900 K’ den sonra artış diğer sıcaklık değerlerine göre çok fazladır. Bütün sıcaklık durumlarında sonik sınırlamanın en yüksek olduğu durum potasyumdur.

4.1.3. Kılcal Limit

Belirli bir kılcal yapının, belirli bir çalışma sıvısı için dolaşımı sağlama yeteneği sınırlıdır [26, 27]. Bu sınıra genel olarak kılcal veya hidrodinamik sınırlama denir. Kılcal sınır, düşük sıcaklıklı ısı borularında en sık karşılaşılan limitasyondur. Bu durum pompalama hızı, buharlaşma kısmına yeterli sıvı sağlamak için yeterli olmadığına ortaya çıkar. Bunun sebebi, sıvı ve buhar basıncı düşüşlerinin toplamının, fitilin direnebileceği maksimum kılcal basıncı geçmesidir. Isı transferini kılcal sınırın üstüne çıkarmaya yönelik herhangi bir durum, buharlaşma bölümünde kurumaya neden olacaktır ve buharlaşma bölgesinden yoğunlaştırıcı bölgesine ısı transferini durdurur.



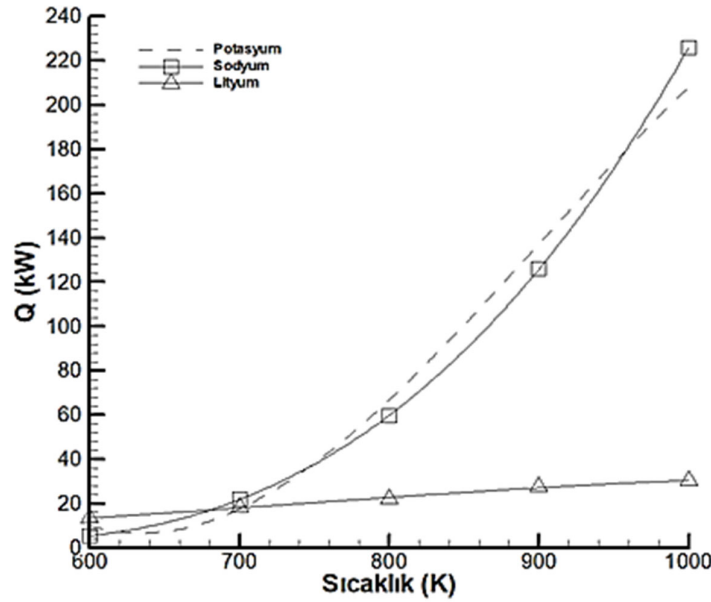
Şekil 4. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kılcal limitlerinin değişimi

Şekil 4’te potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kılcal limitlerinin değişimi görülmektedir ve bu değerler Denklem 3 [22] kullanılarak hesaplanmıştır. Kılcal limit tüm çalışma

sıvıları için sıcaklıkla belli belirsiz bir değişim göstermektedir. Tüm sıcaklık değerleri için kılcal limitin en düşük olduğu değerler potasyum olurken en yüksek olduğu değerler lityum olarak bulunmuştur.

4.1.4. Sürüklenme Limit

Buhar ve sıvı zıt yönlerde hareket ettiğinden dolayı sıvı-buhar ara yüzeyinde bir kesme kuvveti vardır. Yüksek bağıl hızlarda, sıvı damlacıkları fitil yüzeyinden kopabilir ve yoğunlaştırıcı bölümüne doğru akan buharın içine girebilir. Sürüklenme çok büyük olursa, buharlaşma bölgesi kuruyacaktır. Bunun meydana geldiği ısı transfer hızı, sürüklenme sınırı olarak adlandırılır. Sürüklenme, ısı borusunun yoğunlaştırıcı ucuna çarpan damlacıkların sesleriyle saptanılır. Sürüklenme sınırı, genel olarak düşük veya orta sıcaklıktaki küçük çaplı ısı boruları veya buharlaştırıcı bölgesinde ısı girişi yüksek olduğunda yüksek sıcaklıklı ısı boruları ile ilişkilendirilir.



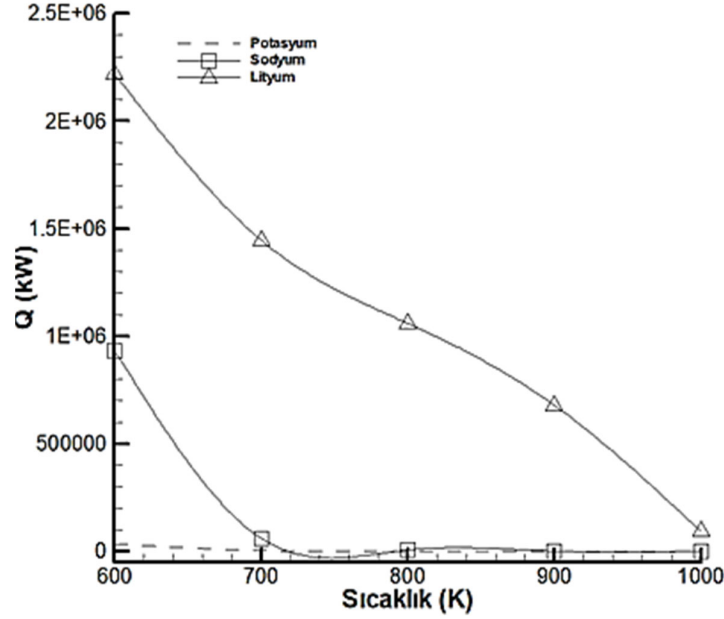
Şekil 5. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sürüklenme limitlerinin değişimi

Şekil 5'te potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla sürüklenme limitlerinin değişimi gösterilmiştir. Sürüklenme limitleri hesaplamaları için Denklem 4 [23] kullanılmıştır. 800 K üzerindeki sıcaklıklarda potasyum ve sodyum için sürüklenme değerlerinde artış diğer sıcaklıklara karşılık gelen değerlere göre daha fazladır. Aynı sıcaklık değerlerinde sürüklenme limiti değerleri potasyum ve sodyum için birbirine yakındır ve en düşük sürüklenme limiti değerleri lityumdadır.

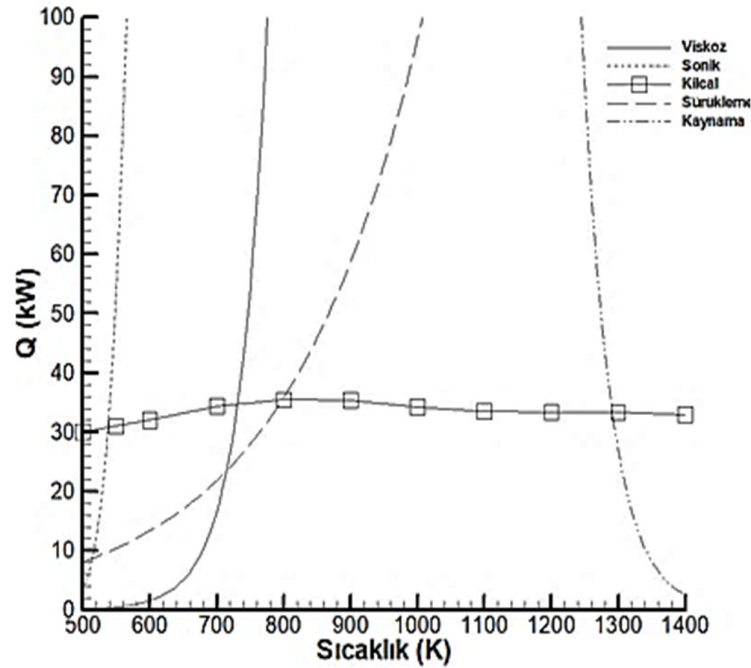
4.1.5. Kaynama Limit

Buharlaşma bölümündeki radyal ısı akışı çok yükselirse, buharlaşma bölgesi fitili içindeki sıvı kaynar ve duvar sıcaklığı aşırı yükselir. Fitilde meydana gelen buhar kabarcıkları, sıvının boru duvarını ıslatmasını engeller ve sıcaklık artışına sebep olur. Bu kaynama şiddetli ise kaynama sınırı olarak tanımlanır ve buharlaşma bölgesindeki fitili kurutur. Fakat, düşük veya orta seviyeli bir radyal ısı akışında, kurumaya neden olmadan düşük yoğunluklu kararlı kaynama mümkün olmaktadır. Kaynama sınırlamasının, diğer ısı borusu sınırları için bir eksenel ısı akışı sınırlamasına kıyasla bir radyal ısı akışı sınırlaması olduğuna dikkat edilmelidir. Ancak, buharlaşma bölgesi yüzey alanı ile ilgili olduklarından, maksimum radyal ısı akışı sınırlaması, maksimum eksenel ısı aktarımını da belirtir. Kaynama sınırı genellikle metalik olmayan çalışma sıvılarının ısı boruları ile ilişkilidir. Sıvı metal ısı boruları için kaynama sınırı nadiren görülür.

Şekil 6'da potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kaynama limitlerinin değişimi görülmektedir ve bu değerler Denklem 5 [23] kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm çalışma sıvılarında sıcaklığın artışıyla kaynama limitinin azalmıştır. Tüm sıcaklık değerleri için kaynama limitinin en düşük olduğu değerler potasyum olurken en yüksek olduğu değerler lityum olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Potasyum, sodyum ve lityum soğutucularının sıcaklıkla kaynama limitlerinin değişimi

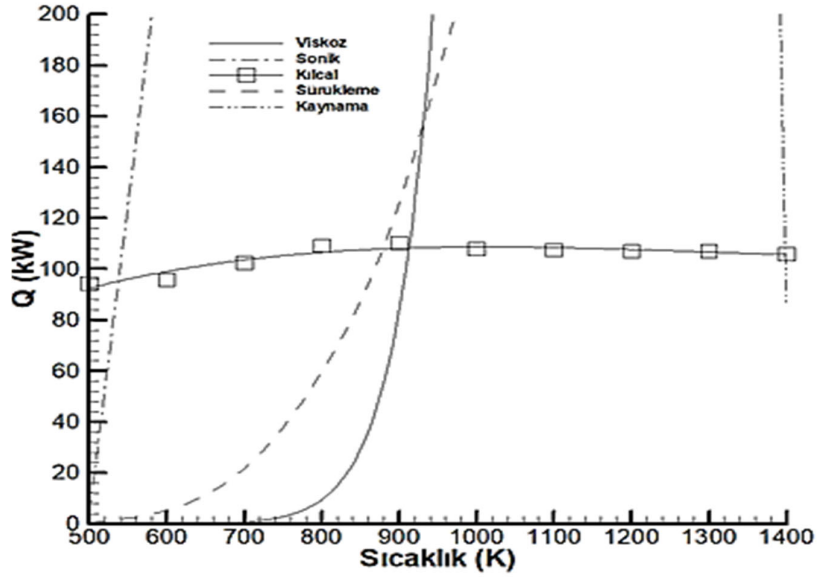


Şekil 7. Potasyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi

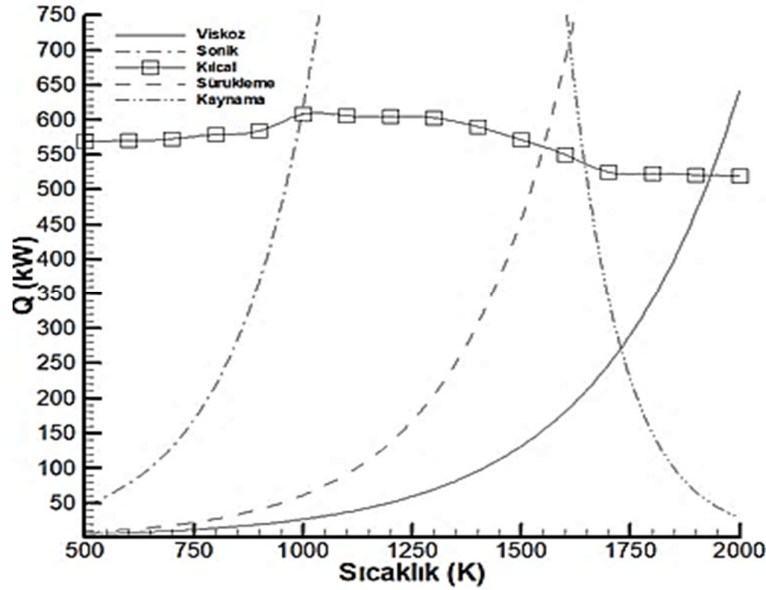
4.1.6. Tüm Limitasyonların Değerlendirilmesi

Çalışma sıvılarının tüm limitasyon değerlerine bakılarak, çalışma sıcaklığında ne kadar ısı çekilebileceği karar verilmektedir. Şekil 7’de potasyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Şekil 7’den görüldüğü gibi 900 K’de en düşük limitasyon değeri kılcal limitasyon değeridir. Buna göre potasyum soğutuculu ısı borusunun maksimum ısı çekme değeri yaklaşık 35 kW olarak bulunmuştur.

Şekil 8’de sodyum çalışma sıvılı ısı borusunun bütün limitasyon değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. 900 K’de sodyum ısı borusu için en düşük limitasyon değeri de kılcal limitasyon değeridir. Sodyum soğutuculu ısı borusunun maksimum ısı çekme değeri yaklaşık 110 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 8. Sodyum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi



Şekil 9. Lityum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi

Şekil 9'da lityum çalışma sıvılı ısı borusu için tüm limitasyonların sıcaklığa göre değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi en düşük ısı limitasyonu viskoz limitindedir ve maksimum ısı değeri yaklaşık 24 kW'tır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 900 K'de çalışan ısı borulu reaktörde ısı limitasyonları hesaplanmıştır. Isı borusunun çalışma sıvıları olarak, potasyum, sodyum ve lityum ayrı ayrı ele alınmıştır. Literatüre uygun olarak seçilen korelasyonlar, ısı borusu limitasyonlarının hesaplamalarında kullanılmıştır. Üç farklı çalışma sıvısının ısı limitasyonları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- 900 K sıcaklık değeri için viskoz değeri incelendiğinde lityumun basınç ve buhar yoğunluğu diğer çalışma sıvılarına göre daha küçük olduğu için en düşük viskoz değeri lityumdur. 900 K'de potasyumun basınç ve buhar yoğunluğu diğer çalışma sıvılarına göre daha büyük olduğu için ise en yüksek viskoz değeri ise potasyumda elde edilmiştir.
- Üç çalışma sıvısının 900 K'de sonik sınırlama değerleri kıyaslandığında viskoz limitte olduğu gibi lityumun basınç ve buhar yoğunluğu değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha küçük olduğu için en düşük limit değeri lityumdur. Potasyumun 900 K'de basınç ve buhar yoğunluğu değeri diğer çalışma sıvılarına göre daha büyük olduğu için ise en yüksek sonik limit değerine sahip olduğu görülmüştür.
- Kılcal limiti değerleri 900 K sıcaklık için üç çalışma sıvısı kıyaslandığında gizli ısı ve yüzey gerilme değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha düşük olduğu için en düşük değerler potasyumdur. Gizli ısı ve yüzey gerilme değerleri diğer çalışma sıvılarına göre daha yüksek olduğu için en yüksek kılcal limiti lityumda bulunmuştur.
- 900 K sıcaklık için üç çalışma sıvısının sürüklenme limiti kıyaslandığında potasyum ve sodyum değerleri birbirine yakındır. 900 K'de lityumun buhar yoğunluğu diğer çalışma sodyum ve potasyuma göre düşük olduğu için en düşük sürüklenme limiti değeri lityumdur.
- Tüm sıcaklık değerleri için 900 K'de üç çalışma sıvısının kaynama limiti kıyaslandığında, yüzey gerilmesi sodyum ve potasyumdan daha düşük olduğu için en düşük değerler potasyum çalışma sıvısında bulunmuştur. Lityumun yüzey gerilme değeri diğer çalışma sıvılarından daha büyük olduğu için en büyük kaynama limiti ise lityum olduğu görülmüştür.
- 900 K sıcaklık için, potasyum, sodyum ve lityum çalışma sıvılı ısı boruları için en yüksek ısı çekimleri sırasıyla 35, 110 ve 24 kW olarak bulunmuştur.
- Sonuç olarak; en yüksek ısının sodyum çalışma sıvılı nükleer reaktörde olacağı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Ray MP, Poston DI, Dasari VR, Reid RS. Design of megawatt power level heat pipe reactors: Los Alamos National Lab. (LANL). Los Alamos, NM, United States; 2015.
- [2] Alizadehdakhel A, Rahimi M, Alsairafil AA. CFD modelling of flow and heat transfer in a thermosyphon. International Communications in Heat Mass Transfer 2010; 37: 312–318.
- [3] Panda KK, Dulera IV, Basak A. Numerical simulation of high temperature sodium heat pipe for passive heat removal in nuclear reactors. Nuclear Engineering and Design 2017; 323: 376–385.

- [4] Zhang Z, Chai X, Wang C, Sun H, Zhang D, Tian W, Qiu S, Su GH. Numerical investigation on startup characteristics of high temperature heat pipe for nuclear reactor. *Nuclear Engineering and Design* 2021; 378: 1–16.
- [5] Hernandez R, Todosow M, Brown NR. Micro heat pipe nuclear reactor concepts: Analysis of fuel cycle performance and environmental impacts. *Annals of Nuclear Energy* 2019; 126: 419–426.
- [6] Laubsher R, Dobson RT. Theoretical and experimental modelling of a heat pipe heat exchanger for high temperature nuclear reactor technology. *Applied Thermal Engineering* 2013; 61: 259–267.
- [7] Jeong YS, Kim KM, Kim IG, Bang IC. Hybrid heat pipe based passive in-core cooling system for advanced nuclear power plant. *Applied Thermal Engineering* 2015; 90: 609–618.
- [8] Guo Y, Su Z, Li Z, Wang K, Liu X. An improved model of the heat pipe based on the network method applied on a heat pipe cooled reactor. *Frontiers in Energy Research* 2022; 10: 1–16.
- [9] Nemeč P, Čaja A, Malcho M. Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe. *Mathematical and Computer Modelling* 2013; 57: 126–136.
- [10] Tian Z, Zhang J, Wang C, Guo K, Liu Y, Zhang D, Tian W, Qiu S, Sua GH. Experimental evaluation on heat transfer limits of sodium heat pipe with screen mesh for nuclear reactor system. *Applied Thermal Engineering* 2022; 209: 1–12.
- [11] Yang H, Handekar S, Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes. *Applied Thermal Engineering* 2008; 28: 49–59.
- [12] Melnyk RS. Heat transfer limitations of heat pipes for a cooling systems of electronic components, In: *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, Ukraine; 2017.
- [13] Mansour M. Heat transport limitations and overall heat transfer coefficient for a heat pipe. *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 2016; 5: 119-123.
- [14] Levinsky A, Wyk JJ, Arafat Y ve ark. Westinghouse eVinci reactor for off-grid markets transactions of the American nuclear society, Orlando, Florida, November 11-15, 2018.
- [15] Hu G, Hu R, Zou L. Development of heat pipe reactor modeling SAM. Nuclear Science and Engineering Division. Argonne National Laboratory; 2019.
- [16] Peterson G. An overview of micro heat pipe research and development. *Journal Applied Mechanics Review* 1992; 45: 175–189.
- [17] Karabulut K, Alnak DE. Investigation of heat transfer and flow properties in separated flow and reattachment regions for liquid sodium flow at fast reactors. *Nuclear Engineering and Design* 2021; 379: 1–5.
- [18] Faghri A, Zhang Y. *Transport phenomena in multiphase systems*, Elsevier, Burlington, MA, 2006.
- [19] Faghri A, Zhang Y, Howell J, *Advanced heat and mass transfer*, 1st ed., Global Digital Press, Columbia, MO, 2010.
- [20] Ivanovskii MN, Sorokin VP, Yagodkin IV. *The physical principles of heat pipes*, Clarendon Press, Oxford, United Kingdom, 1982.
- [21] Vargaftik NB. *Handbook of physical properties of liquids and gases*, Hemisphere, New York, NY, 1975.
- [22] Busse CA. Theory of the ultimate transfer of cylindrical heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 1973; 16: 169–186.
- [23] Chi W. *Heat pipe theory and practice*. Hemisphere Publishing Corporation, New York; 1976.
- [24] Kumaresan G, Venkatachalapathy S. A review on heat transfer enhancement studies of heat pipes using nanofluids. *Frontiers in Heat Pipes (FHP)* 2012; 3: 1–8.
- [25] Mahdavia M, Tiaria S, Schamphelreieb SD, Qiu S. Experimental study of the thermal characteristics of a heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2018; 93: 292–304.
- [26] Faghri A. *Heat pipe science and technology*. 1st ed. Taylor & Francis. Washington, D.C; 1995.
- [27] Faghri A, Thomas S. Performance characteristics of a concentric annular heat pipe: Part I-experimental prediction and analysis of the capillary limit. *Journal of Heat Transfer* 1989; 111: 844–850.

PAMUK İPLİKHANESİNDEKİ TELEFLERİN ANALİZİ

Tuba BEDEZ ÜTE^{1*}, Pınar ÇELİK²

¹ Tekstil Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir/Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 05.12.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 06.04.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1214876

ÖZET

Doğal kaynakların etkin kullanımı ile geri kazanılabilir teleflerin tekrar kullanımı, ekonomik ve çevresel boyutlar göz önünde bulundurulduğunda her geçen gün önem kazanmaktadır. İplik üretim maliyetleri içinde en önemli kalemi oluşturan hammadde maliyetini düşürmek avantaj sağlamaktadır. Tekstil endüstrisinde birçok üretim adımında teleflerin oluştuğu ve tekrar kullanılabilmesi görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, pamuk iplikhanesinde oluşan başlıca teleflerin içindeki yabancı madde (safsızlık) ve temiz lif oranlarının farklı cihazlarla incelenmesi ve elde edilen sonuçların arasındaki ilişkilerin incelenmesidir. Harman-hallaçta oluşan telefin içindeki yabancı madde miktarı yüksek olmasına rağmen, kirli telefler içinde iplik eğrilebilirlik indeksinin (SCI) en yüksek olduğu gözlenmiştir. Penye döküntüsünden yüksek oranda temiz lif elde edilmesine rağmen SCI değeri çok daha düşük çıkmıştır ve ortalama lif boyunun da diğer teleflerdeki temiz lif boylarına göre çok daha kısa olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: telef, geri dönüşüm, yabancı madde, iplikhane, pamuk.

ANALYSES OF COTTON FIBER WASTES FROM A SPINNING MILL

ABSTRACT

Considering the economic and environmental aspects, the effective use of natural resources and the reuse of recyclable waste is gaining importance day by day.. It is advantageous to reduce the raw material cost, which is the most important item in yarn production costs. It is seen that wastes are formed in many production steps in the textile industry and can be reused. The aim of this study is to examine the ratio of impurity and clean fiber in the main wastes formed in a cotton spinning mill with different devices and to examine the relationships between the as-obtained results. Although the amount of impurity in the waste generated in the blow room is high, it was observed that the spinnability index was the highest among dirty wastes. Although a high rate of clean fiber is obtained from combed cotton waste, the SCI (yarn spinnability index) is much lower, and the fiber length is seen to be much shorter than the clean fiber lengths in other wastes.

Keywords: waste, recycle, impurity, spinning mill, cotton.

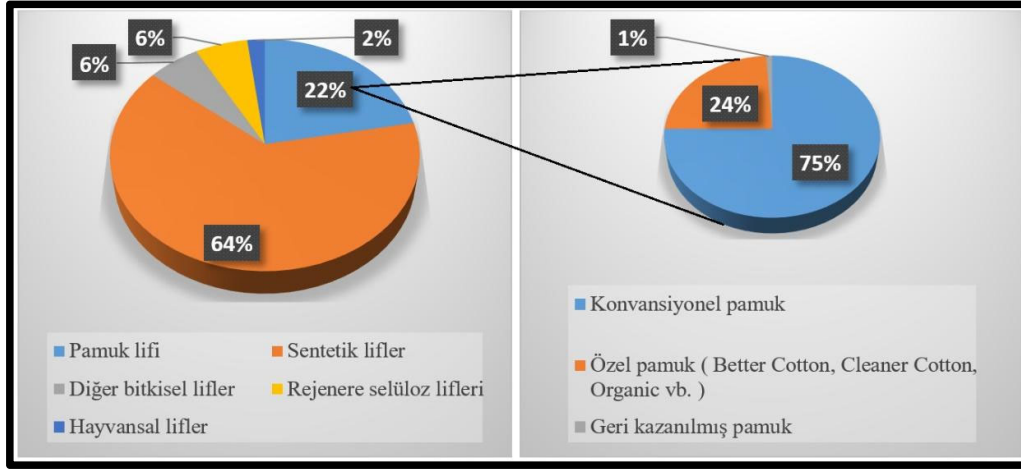
1. Giriş

Son yılların moda kavramı olan “sürdürülebilirlik” artık bir tercih değil, zorunluluk haline gelmiştir. Büyük markalar için, tekstilde geri dönüşüme katkı sağlamak onlara prestij sağlarken, aslında bu konu genel anlamda hayati bir önem de taşır. Dünyadaki doğal ya da insan yapımı her ürünün bir son kullanım tarihi bulunur. Hızla kirlenen dünyamızda, üretim ve tüketim miktarlarının artması bu durumu daha da kritik hale getirir. Dünya genelinde oluşan 40 milyon ton/yıl’lık tekstil ve konfeksiyon atığının işlenmesi, 250 milyar \$’lık bir ekonomik değer vadetmektedir. Ülkemizde ise yıllık tekstil ürünlerinin yaklaşık 1/3’ü çöpe ayrılmakta ve bu ürünlerin geri kazanımı ile 2,5 milyar \$’lık bir katma değer elde etme imkanı bulunmaktadır [1].

¹e-posta: tuba.bedeze@ege.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0574-2874> (Sorumlu Yazar)

²e-posta: pınar.celik@ege.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3558-4213>

Dünya lif üretimi, 2020 yılındaki COVID-19 pandemisi sürecinde yaşanan hafif bir düşüşün ardından 2021 yılında 113 milyon tona ulaşmıştır. Son 20 yılda küresel lif üretimi 58 milyon tondan neredeyse ikiye katlanmış olup, 2030'da ise 149 milyon tona çıkması beklenmektedir. Geri dönüştürülmüş liflerin de pazar payı artarak 2021 yılında %8,9'a ulaşmış olup, bu artış daha çok PET şişeden geri kazanılmış liflere dayanmaktadır. Halen küresel lif pazarının %1'inden daha azını tüketici öncesi ve sonrası geri dönüştürülmüş tekstiller oluşturmaktadır. 2020'de 60 milyon ton olan fosil bazlı sentetik liflerin üretimi ise 2021'de 63 milyon tona yükselmiştir (Şekil 1) [2].



Şekil 1. 2021 yılına ilişkin dünya lif üretim verileri [2].

Atıklar, farklı kategoriler altında incelenmekte olup, Avustralya Atık Raporuna (2016) göre, bu kategoriler; duvarcılık malzemeleri (asfalt, tuğla, moloz vb.), metaller (çelik, alüminyum vb.), organik atıklar (gıda, bahçe organikleri vb.), kâğıt ve karton (mukavva, dergiler vb.), plastikler (PET, HDPE, PP vb.), cam, tehlikeli-atıklar, uçucu kül ve diğer atıklardan (tekstil ve deri dahil) oluşur [3]. Bu atıkların bir kısmı geri kazanılarak aynı kategoride hammadde olarak veya farklı ürünler için değerlendirilebilir. Tekstil atıkları ise, üretim atıkları ve üretim sonrası atıklar olarak iki ana gruba ayrılır. Üretim atıkları, temel olarak, üretimin her adımında oluşan ve çeşitli nedenlerle nihai ürün haline getirilemeyen atıklar olup, bunlar iplikhanede, liflerin temizlenmesi veya taranması sırasında oluşabilir. Elyaf halinde olan veya olmayan bu temiz veya kirli atıklar yeniden kullanılabilir. İplikhaneden sonra da iplik ve kumaş formunda oluşan atıkların tekrar üretime kazandırılması için geri dönüşüme ihtiyaç duyulur.

Tekstil atıkları, tekstil veya diğer ürünlerin üretimi için geri dönüştürülerek, yeniden kullanılabilir. Benzer şekilde, başka ürün atıkları da tekstil üretiminde kullanılmak üzere değerlendirilebilir. Bu tip ürünlerin en bilinen örneklerinden biri polietilen tereftalat (PET) şişeler olup, bu şişeler toplanıp, geri dönüştürüldükten sonra tekstil ürünlerinde %100 olarak veya karışımlar halinde "r-PET elyafı" olarak kullanılır ki bu konuyla ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir kısmı; elyafın özellikleri ve eğrilebilirliği ile iplik ve kumaş özelliklerini kapsar [4, 5, 6, 7]. Araştırmaların diğer bir kısmı ise tekstil atıklarının farklı ürünlerde kullanılmasına odaklanmıştır. Mishra ve ark. tekstil atıklarını kompozit üretiminde [6], Briga-Sa, Binici ve El Wazna ise yalıtım malzemesi olarak kullanarak, polistirene (XPS) ve mineral yününe benzer sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir [8-11]. Shukla ise, PET elyaf atıkları ile farklı alanlarda kullanılacak yeni kimyasallar sentezlemiştir [12].

Tekstil üretimi sırasında sıvı ve katı atıklar oluşur. Özellikle bu çalışmaya konu olan ve pamuk lifi tarımı ile iplik eğirme sırasında oluşan katı atıkların değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik ve çevre açılarından önemlidir. Artan dünya nüfusu ve azalan tarım alanları dikkate alındığında, bu konu gelecek için de oldukça önemlidir. Dünyada pamuk tarımı esnasında yıllık 300 milyar m³ su tüketilmekte ve ayrıca, pestisitler ve sentetik gübreler de kullanılmaktadır. Tüketicilerin çevre ve insan sağlığı

konularında her geçen gün daha bilinçli hale gelmesinin sonucunda çevre dostu “yeşil ürünleri” tercih etmeleri, üreticileri de bu konuda daha dikkatli olmaya yönlendirmektedir [13].

Tarlardan elde edilen kütlü pamuk, öncelikle lif ve tohumlarının birbirinden ayrılması için çırçır işletmelerine iletilir ki bu, pamuk telefinin olduğu ilk aşamadır. Pamuk çırçır telefleri sap, yaprak, toprak partikülleri, linter ve diğer bitkisel materyallerden oluşur [14]. Bu atıklar kimya sanayi (örn. sabun), hayvancılık endüstrisi (örn. yem, küspe) veya gıda endüstrisi (örn. pamuk yağı) gibi farklı alanlarda kullanılabilir. Boykin ve ark. (2008), farklı çırçır işletmelerinden tedarik edilen pamuk numunelerinde telefin ana bileşenlerini MDTA 3 cihazı ile incelemişler ve tüm bileşenlerin %81’ini; yaprak, tohum kabuğu neps ve sapların oluşturduğunu tespit etmişlerdir [15]. Çırçırdan sonra preslenip, balyalar haline getirilen pamuk lifleri, iplikhanede açma ve temizleme işlemleri ile üretim prosesine başlar. Açma ve temizlik işlemlerinden, harman-hallaç hattındaki makineler ile tarak makineleri sorumlu olduğundan en fazla telef bu aşamalarda oluşur. Telefin en yoğun olduğu bir başka proses ise, daha ince ve kaliteli iplik üretimi için kullanılan penye makinesidir [16].

Klein, kısa lif iplikhanesinde kullanılan pamuk liflerini; çırçırdan gelen lifler, temiz telef, penye telefi, kirli teleflerden geri kazanılmış lifler ve sert teleflerden (fitil, üstüğü ve bükümlü iplikler) elde edilmiş lifler olarak sınıflandırmıştır [17]. Kopmuş şerit, vatka ve tülbent parçaları ile cer, fitil, ring veya rotor iplik makinelerinin filtrelerinden gelen lifler %95’ten fazla kullanılabilir lif içeren “temiz telef” olarak bilinir. Penye ve fitil teleflerinde temiz lif oranı %95-97 civarında olup, harman-hallaç ve tarak makinelerinden gelen kirli teleflerde ise bu oran %35-55 arasındadır. Bir diğer kirli telef olan şapka teleflerinde ise %65-80 arasında kullanılabilir lif bulunur. Telef lifleri birçok makinede işlem görüp zorlandığı için, işlem görmemiş pamuk liflerine göre kullanılabilir oranları daha düşüktür. Bu nedenle iplikçiler, normal iplik üretiminde telefleri belli oranlarda ve kontrollü bir şekilde kullanır. Karde ipliklerinde ve ince rotor ipliklerinde %5, penye ipliklerinde ise %2,5’in altında telef kullanılırken, daha yüksek telef kullanım oranları (%10-20) orta ve kalın rotor ipliklerinde tercih edilir [18].

HVI (High Volume Instrument) ve AFIS (Advanced Fiber Information System) cihazlarıyla, iplik işletmesinden elde edilen söz konusu teleflerin analizleri yapılabilir. HVI cihazından, çepel ile ilgili olarak; çepel sayısı, çepel alanı ve çepel derecesi verileri elde edilirken, çepel sayısı (Tr Cnt) renk ölçümünün yapılması esnasında belirlenir. Ölçümü yapılan numune, bölmenin altından aydınlatılırken, siyah ve beyaz bir CCD kamerası da piksellerdeki değişiklikleri analiz eder. Bölme kaplayan tüm parçalar tek tek sayıldıktan sonra bulunan sonuçlar birim yüzey alanındaki çepel parçaları sayısı olarak ifade edilir. Çepel alanı (Tr Area); çepel parçalarının kapladığı kaplı alanın, tüm ölçüm alanına oranı olarak % ile ifade edilir ve çepel sayısı ölçümü esnasında belirlenir. Çepel derecesi, Trash (Leaf Grade-Tr ID) pamuk örneğinin çepel miktarını ifade eder ve USDA (United States Department of Agriculture)’ya göre 1 ile 8 arasında çepel sınıflandırması yapılır [19].

Çizelge 1. AFIS cihazının N modülündeki ölçüm açıklamaları.

Weight (gr)	Numune ağırlığı
Nep (μm)	Ortalama neps boyutu
Nep (Cnt/gr)	1 g’daki neps sayısı
SCN (μm)	Ortalama tohum kabuğu neps boyutu
SCN (Cnt/gr)	1 g’daki tohum kabuğu neps sayısı

AFIS’in N modülü de neps ve tohum kabuğu parçacıklarının ölçümünü yapar. Lif neps, liflerin birbirine dolanması olarak tanımlanır ve pamuğun toplanması, çırçırılması ve iplik işletmesinde açılıp, temizlenmesi esnasında maruz kaldığı mekanik işlemler nedeniyle oluşur. Tohum kabuğu neps ise, üzerinde elyaf bulunan pamuk tohumu parçaları olup, genellikle, liflerin tohumlarından ayrıldığı çırçırılama işlemi sırasında oluşur. Frydrych ve Matusiak (2002), nepsleri, büyüklükleri 800 μm ’nin altında ve 800 μm , 850 μm ve 850 μm ’nin üstünde olacak şekilde dört grupta değerlendirebilir. Tarak makinesi çıkışında büyüklüğü 850 μm ’nin üstünde olan büyük nepslerin oranı %30’dan %20’ye düşmekte iken, büyüklüğü 800 μm ’nin altında olan küçük nepslerin oranı %40’tan %50’ye

yükselmektedir [20, 21]. AFIS cihazının N modülünde ölçülen ayrıntılı neps verileri Çizelge 1’de açıklanmıştır.

Hammadde, iplik üretim maliyetindeki en önemli kalemi oluşturduğu için, birçok araştırmacı pamuk telefleri üzerinde çalışmalar yapmıştır. Wulforst, kabul edilebilir bir iplik kalitesi için telef kullanım oranının %20’yi geçmemesi gerektiğini belirtmiştir [22]. Duru ve Babaarslan 60/40 PET/telef karışımı rotor iplikleri için optimum açıcı silindir tipi ve hızı üzerinde çalışmışlardır [23]. Hasani ve ark. da rotor çapı, rotor hızı, düze tipi, açıcı silindir hızı ve iplik numarası gibi üretim parametrelerinin etkisini incelemişlerdir [24, 25]. Yine rotor ipliklerinde telef kullanımı üzerinde çalışan Khan ve Rahman, %5-25 arasında pnömofil telef kullanımının; ipliklerin mukavemet, uzama, düzgünsüzlük ve kopuş sayıları üzerinde olumlu etkisi olduğunu tespit etmişlerdir [26]. Khan ve ark., karışım oranı, karışım tekniği, tambur hızı ve rotor devri parametrelerini tahminleyici olarak kullanıp, işlenmemiş ve telef pamuk karışımı ipliklerin özelliklerini incelemişlerdir [27]. Halimi ve ark., telef oranının Yunan pamuğundan üretilen rotor ipliklerinin özelliklerine etkisini incelemişler ve telef oranının %25’e kadar çıkılabileceğini belirtmişlerdir [28, 29]. Celep ve ark. ise işlenmemiş ve telef pamuk karışımı ipliklerden elde edilen süprem kumaşların ısı konfor özelliklerini incelemiş ve telef pamuğun; daha yüksek ısı direnç, düşük soğurganlık, hava geçirgenliği ve sıcaklık hissi verdiğini ortaya koymuşlardır [30]. Geri kazanılmış pamuk ve PET liflerinin denim kumaşlardaki kullanımı incelendiğinde; iplik hatalarının arttığı, ancak bu durumun kumaşların fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilemediği ve aşınma dayanımını da iyileştirdiği görülmüştür [31]. Yılmaz ve ark., farklı kaynaklardan elde edilen teleflerden ring ve rotor ipliği eğrilebilirliğini incelemiş ve bu ipliklerle örülen kumaşların performanslarını da kıyaslamışlardır [32]. Bechir ve ark. da telef lif oranı ve geri kazanım pasaj sayısının iplik özelliklerine olan etkilerini matematiksel bir yaklaşım ile tahminlemeye çalışmışlardır [33]. Gün ve ark., PET teleflerinden üretilmiş çorapların boyutsal ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir [34]. Yüksekaya ve ark. ise Yunus ve Rahman’ın tanımladığı iplik kalite indeksi (İplik kalite indeksi = $(\text{Mukavemet} \times \text{Uzama}) / \text{Düzensüzlük}$) aracılığıyla geri kazanılmış lifler kullanıldığında iplik kalite indeksinin daha yüksek olduğunu ve iplik mukavemeti ile kumaşların patlama mukavemetinin diğerlerine kıyasla daha düşük olduğunu bulmuşlardır [35, 36]. Uyanık ve ark., iplik atıklarından kapalı döngü geri dönüşüm iplik üretimi ve iplik fiziksel özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, telefin iplik özelliklerini beklendiği kadar olumsuz etkilemediğini belirtmişlerdir [37].

Yapılan çalışmaların genelinde, farklı telef tipleri kullanılarak elde edilen ürünlerin performansları değerlendirilmiştir. Kullanılan teleflerin içindeki iyi lif ve yabancı madde oranının bilinmesinin, iplikçiler açısından oldukça önemli olduğu da bilinmektedir. Her iplikhanenin elinde bulunan laboratuvar cihazları ve test imkânları farklı olduğu için, bu çalışmada teleflerin farklı analiz yöntemlerinden elde edilen bulgular arasındaki ilişkiler ortaya konularak, iplikhaneler için fayda sağlaması amaçlanmıştır.

2. Materyal-Metot

İplik işletmesinde, üretim esnasında ortaya çıkan telefler içinde tekrar iplik üretiminde kullanılabilecek iyi lifler de bulunur ki bu çalışmada; pamuk iplikhanesinde harman-hallaç hattı, tarak makinesi, cer makinesi ve penye makinesinde oluşan teleflerin içindeki yabancı madde (çepel, kaba toz ve ince toz) ile iyi lif miktarları iki farklı yöntem ile analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kullanılan telef materyalleri Şekil 2’de verilmiştir.

İplik işletmelerinde oluşan teleflerin yabancı madde analizi için Shirley Trash Analyser cihazı ile Microdust and Trash Analyser cihazları kullanılmıştır. Bununla beraber, HVI ve AFIS cihazları ile de teleflerin farklı lif özellikleri incelenmiştir.

AFIS ve HVI cihazları esasen iki yöntemle ölçüm yapmaktadır ki bunlardan, HVI cihazı demet haldeki liflerden, AFIS cihazı ise bireysel lifler üzerinden ölçüm yapar. HVI sistemi ile, uzunluk, uzunluk üniformitesi, mukavemet, uzama, incelik, parlaklık, sarılık ve yabancı madde gibi temel lif parametreleri belirlenmekte ve bu parametreler ile; pamuğun eğirme performansında bilinen varyasyonların %86’sını kapsayan veriler elde edilmektedir. HVI cihazında renk ölçümü yapılırken, çepel sayısı, çepel alanı ve çepel derecesi gibi çeşitli yabancı madde verileri incelenebilmektedir. Ölçüm

bölmesini kaplayan tüm parçalar tek tek sayılmakta ve sonuçlar birim yüzey alanındaki çepel parçaları sayısı (Tr Cnt) olarak ifade edilmektedir. Çepel alanı (Tr Area); çepel parçalarının kapladığı alanın tüm ölçüm alanına oranı olarak (%) ifade edilmektedir. Çepel derecesi (Trash Grade) ise USDA'ya göre çepel sınıflandırmasını ifade etmektedir. Tek lif ölçüm prensibine göre çalışan AFIS cihazında ise farklı modüller üzerinden tek lif uzunluk, incelik, olgunluk ölçümleri ile yabancı madde ve toz ölçümleri ve çeşitli istatistikî değerlendirmeleri yapılmaktadır. AFIS-T modülü ile pamuk liflerinin içerdiği toz ve çepel (adet ve büyüklük bakımından) miktarı, AFIS-N modülü ile de neps verileri (ortalama neps boyutu, neps sayısı, ortalama tophum kabuğu neps boyutu ve sayısı) belirlenmektedir [19].



Şekil 2. Çalışmada kullanılan iplik işletmesi telefleri.

TS 1104-Pamukta ve telefte yabancı madde miktarının tayini (Shirley Ayırıcı) metodu ile yapılan analizler 100 g'lık test numunelerine uygulanmıştır [38]. Test yapılacak laboratuvar denemeleri TS 240'a göre standart atmosfer koşullarında dört saat kondisyonlanmıştır. Shirley ayırıcı test cihazının kesit görünümü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Shirley Trash Analyser cihazının görünümü.

Deney yapılırken numune dört kez makineden geçirilir. Birinci geçişte, bütün numune tamamen makineden geçirilir ve temiz lif haznesinden pamuk alınarak L1 olarak kaydedilir. Çepel haznesindekiler (T1) tepside bırakılır. L1 lifleri ikinci defa makineden geçirilir ve temiz lifler L2 olarak ayrılır. İkinci geçişte ayrılan T2 çepel vb. yabancı maddeler T1'in üzerine eklenerek birikir. Üçüncü geçişte yabancı madde tepsinde birikmiş yabancı maddelerin (T1+T2) içindeki iyi liflerin ayrılması amaçlanır. Temiz lif haznesinde biriken bu lifler L3, yabancı madde haznesinde ayrılanlar ise T3 olarak kaydedilir. Dördüncü ve son geçişte L3 lifleri tekrar analiz edilir ve bu analizde elde edilen temiz lifler (L4), L2 lifleri ile birleştirilerek tartım için hazırlanır. Yabancı madde haznesinde biriken tozlar ve makinenin filtre kısmında bulunan kaba ve ince tozlar fırça ile toplanarak tartım için hazırlanır. TS 1104 standardına göre; sonuçların değerlendirilmesi için Şekil 5'te gösterilen diyagram kullanılır.

Toplam temiz lif miktarı (L) = L₂+L₄

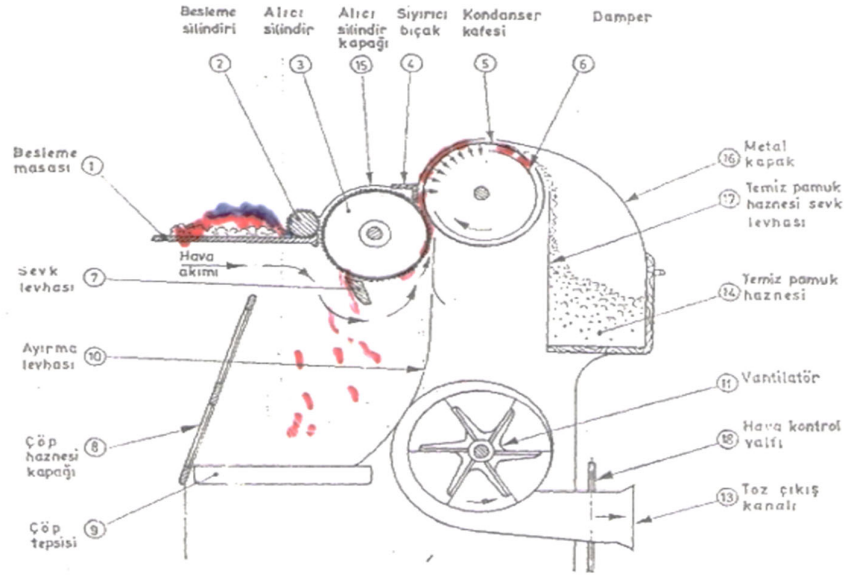
Çepel miktarı (T) = T₃+T₄

Yabancı madde miktarı (Y) (%) = $\left(\frac{T}{M}\right) \times 100$

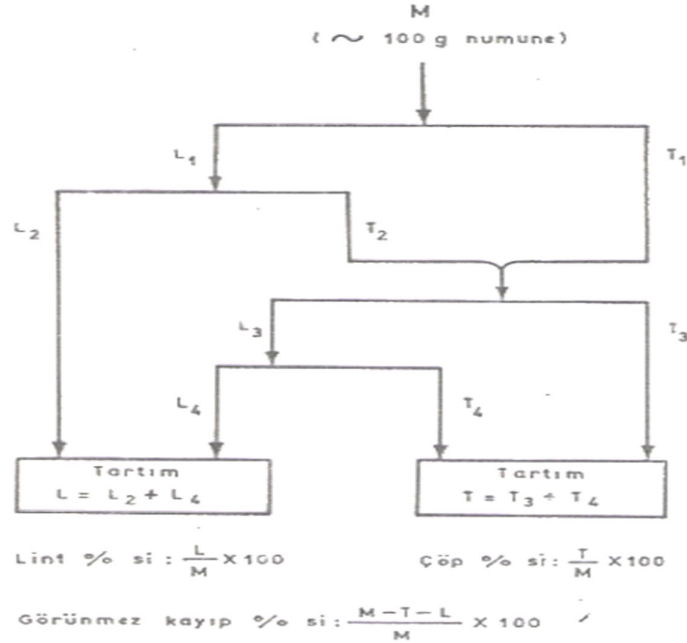
Lif miktarı (E) (%) = $\left(\frac{L}{M}\right) \times 100$

Görünmez kayıp (uçan lif, toz) miktarı (K) (%) = $\left(\frac{M-(T+L)}{M}\right) \times 100$

Bu hesaplamada; M, numunenin başlangıç ağırlığını (g), T de yabancı madde miktarını (g) ifade eder.

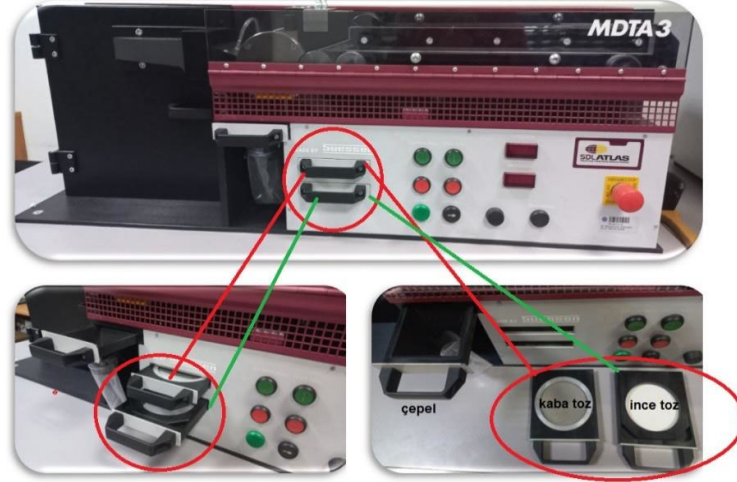


Şekil 4. Shirley Trash Analyser test cihazının kesit görünümü



Şekil 5. Shirley ayırıcı yöntemiyle telef miktarının hesaplanması

Elyafın içinde bulunan yabancı maddelerin analiz edilebildiği bir diğer cihaz ise Microdust and Trash Analyser (MDTA 3) cihazıdır (Şekil 6).



Şekil 6. MDTA 3-Microdust and Trash Analyser

Bu cihaza açık elyaf formunda beslenen ~5 g ağırlığındaki elyaf, açma ve temizleme işlemlerine tabi tutularak 1 m uzunluğunda ve inceliği 2-10 Ktex arasında ayarlanabilen şeritler haline getirilir. Elde edilen şerit, rotor iplik makinesine beslenerek numune iplik üretimi tamamlanabilir. Makinedeki temizleme işlemi esnasında yabancı maddeler; çepel, kaba toz ve ince toz olmak üzere üç farklı kategoriye ayrılır. Doğal liflerde kirlilik oranının tespit edilebildiği bu cihaz ile doğal ve/veya yapay liflerle karışım denemeleri, elyafı boyalı ipliklerle renk harmanı çalışmaları ve iplik üretim denemeleri için şerit hazırlığı yapılabilir [39].

3. Bulgular ve Değerlendirme

Bu çalışmada, iplikhanede oluşan üretim teleflerinden olan harman-hallaç, tarak, cer ve penye telefleri dört farklı cihaz ile analiz edilmiştir. Teleflerin AFIS ve HVI cihazlarında yapılan analiz sonuçları ise sırasıyla Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir.

Cer şeridi telefi olarak isimlendirilen telef türü aslında, üretim sırasında kopan cer şeritlerinden oluşur. HVI ve AFIS sonuçlarından da görüldüğü gibi bu telefin içindeki yabancı madde miktarı çok azdır ve lif uzunluğu değerleri (UHML 28,52 mm) de oldukça iyidir. İplik eğrilebilirlik indeksi (SCI) değeri (SCI = 149) de diğerlerine göre çok yüksektir. Bu verilere dayanarak, cer şeridi teleflerinin aslında orijinal harmanı temsil ettiği söylenebilir.

Çizelge 2. Teleflerin AFIS ölçüm sonuçları.

	Harman-hallaç	Tarak	Cer	Penye
Top. neps cnt (cN/g)	652	814	30	412
Top. neps ort. boyutu (µm)	775	715	619	652
Lif nepsi cnt (cN/g)	562	669	30	391
Lif nepsi ort. boyutu (µm)	780	733	619	653
SCNep sayısı	90	145	0	21
SCNep boyutu	752	629	0	649

L (w) mm	18,3	13,1	24,7	11,2
L (w) %Cv	51,6	65,2	34,1	53,2
SFC (w)	29,9	55,5	4,8	64,8
UQL (w)	25,2	18,3	31	14
L (n)	12,4	8,4	22,2	8,6
L (n) %Cv	68,9	75,2	39,6	55,7
SFC (n)% < 12,7 mm	58,1	80,4	12,3	81,6
%5 L (n) mm	29,3	22,3	36,1	17,9
İncelik mtex	165	164	187	160
Olgunluk	0,86	0,79	0,97	0,79
IFC (%)	4,7	4,6	4	4,8

Çizelge 2. Devamı

Çizelge 3. Teleflerin Uster HVI 1000 ölçüm sonuçları.

	Harman-hallaç	Tarak	Cer	Penye
SCI	68	54	149	5
Mst(5%)	7	7	6,6	7
Mic.	5,21	4,01	4,45	3,18
Olgunluk	0,88	0,85	0,87	0,82
UHML mm	25,86	23,74	28,51	18,69
UI%	74,8	70,7	84,1	61,9
SF (%)	20,8	29	7,1	49,3
Mukavemet (g/tex)	25,8	25,4	32,6	22,8
Elastikiyet %	6,6	7,3	6,3	7,7
Rd	75	74,9	81	7,9
(+) b	9	9	11,2	11,5
CGrd upland	31-4	31-4	12 (-) 1	12 (-) 1
TrCnt	65	65	5	12
TrAr (%)	0,81	0,82	0,07	0,11
TrID LeafGrd	4	4	1	2
Amt	442	396	665	484

Çizelge 4'te Shirley ayırıcı ile, Çizelge 5'te ise MDTA cihazı ile yapılan analiz sonuçları görülmektedir.

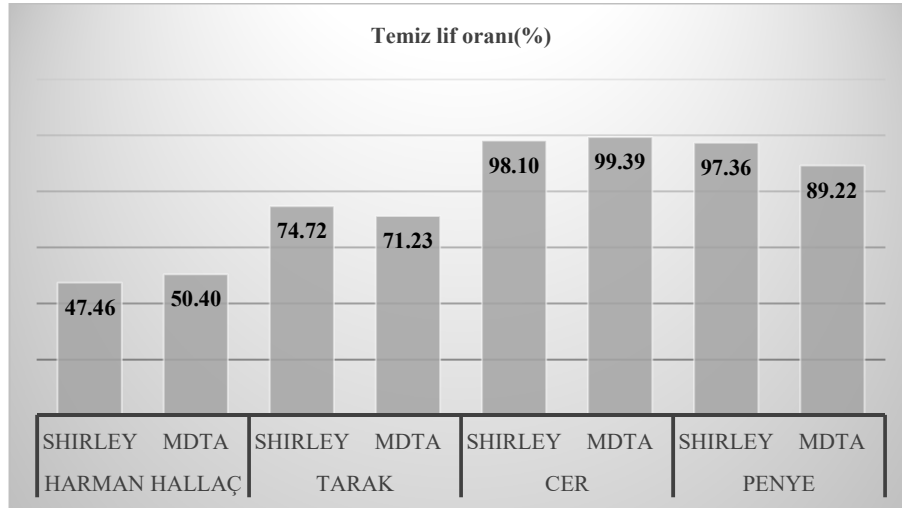
Çizelge 4. Shirley ayırıcı cihazı ile yapılan analiz sonuçları.

	Harman-hallaç	Tarak	Cer	Penye
Temiz lif miktarı (g)	47, 46	74,72	98,1	97,36
Çepel miktarı (g)	50,11	25,72	0,81	2,022
Kaba Toz Miktarı (g)	0,047	0,045	0,036	0,075
İnce Toz Miktarı (g)	0,377	0,326	0,145	0,026
Temiz lif (%)	47,46	74,72	98,1	97,36
Toplam Yabancı madde miktarı (%)	50,534	26,091	0,991	2,123
Görünmez kayıp (%)	2,006	-0,811	0,909	0,517

Çizelge 5. MDTA cihazı ile yapılan analiz sonuçları.

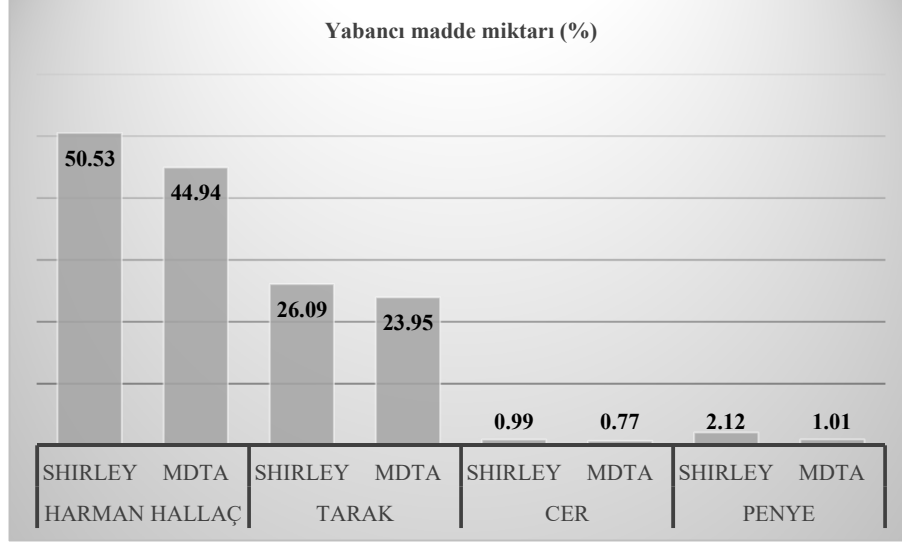
	Harman-hallaç	Tarak	Cer	Penye
Numune miktarı (g)	5,02	5,04	5,057	5,032
Temiz lif miktarı (g)	2,53	3,59	5,026	4,49
Çepel miktarı (g)	2,109	1,19	0,035	0,044
Kaba Toz Miktarı (g)	0,074	0,011	0,001	0,004
İnce Toz Miktarı (g)	0,073	0,003	0,003	0,003
Temiz lif (%)	50,39	71,23	99,39	89,22
Toplam yabancı madde miktarı (%)	44,940	23,948	0,771	1,014
Görünmez kayıp (%)	4,661	4,821	0,158	9,767

Shirley ayırıcı ve MDTA cihazlarında yapılan analizlerden elde edilen temiz lif oranları karşılaştırmalı olarak Şekil 7’de görülmekte olup, elde edilen sonuçların korelasyon katsayısı $r = 0,98$ olarak hesaplanmıştır. MDTA yöntemi de çok daha az test numunesi ile benzer sonuçları sağlamıştır.



Şekil 7. Shirley ayırıcı ve MDTA cihazlarında elde edilen temiz lif oranlarının karşılaştırmalı olarak incelemesi.

Shirley ayırıcı ve MDTA cihazları ile yapılan analizlerden elde edilen toplam yabancı madde oranları karşılaştırmalı olarak Şekil 8’de görülmektedir ki burada, elde edilen sonuçların korelasyon katsayısı $r = 0,99$ olarak hesaplanmıştır. MDTA yöntemi de çok daha az test numunesi ile benzer sonuçları sağlamıştır.



Şekil 8. Shirley ayırıcı ve MDTA cihazlarında elde edilen toplam yabancı madde oranlarının karşılaştırmalı incelemesi.

İplik işletmesinde oluşan teleflerin farklı cihazlarla incelenmesi sonucunda neps ve yabancı madde miktarı ile ilgili farklı değerler elde edilmiştir. Bu değerler arasındaki ikili ilişkiler korelasyon analizi ile incelenmiştir. Korelasyonun yön ve derecesi, korelasyon katsayısıyla belirlenir. Korelasyon katsayısının değeri -1 ile $+1$ arasında değişir. Korelasyon katsayısı 0 olduğunda değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olmadığı, korelasyon katsayısı $+1$ ise pozitif tam doğrusal ilişki, $r = -1$ ise negatif tam doğrusal ilişki olduğu ifade edilir. r değeri $0.30-0.70$ arasında orta düzeyde, $0.71-0.99$ arasında ise yüksek düzeyde ilişki olduğu bilinmektedir (Çizelge 6).

Çizelge 6. Korelasyon katsayıları (r).

	Shirley	MDTA	HVI			AFIS		
	Y.M.M.*	Y.M.M.*	Tr Cnt	Tr Ar	TrID Leaf Grd	SC Nep sayısı	SC Nep boyutu	
Shirley	Y.M.M.*	1	0,99	0,90	0,90	0,88	0,70	0,64
MDTA	Y.M.M.*	0,99	1	0,91	0,91	0,88	0,72	0,63
HVI	TrCnt	0,90	0,91	1	0,99	0,98	0,94	0,68
	TrAr	0,90	0,91	0,99	1	0,97	0,94	0,65
	TrID LeafGrd	0,87	0,88	0,98	0,97	1	0,93	0,80
AFIS	SCNep sayısı	0,70	0,72	0,94	0,94	0,93	1	0,62
	SCNep boyutu	0,63	0,63	0,68	0,64	0,80	0,63	1

* Y.M.M. yabancı madde miktarını ifade etmektedir.

Yapılan korelasyon analizinden elde edilen r değerleri incelendiğinde; Shirley ayırıcı ve MDTA cihazlarıyla elde edilen yabancı madde miktarı verilerinin, HVI'dan elde edilen yabancı madde sayısı, yabancı maddelerin kapladığı alan (TrAr) ve pamuk örneğinin çepel miktarı (TrID Leafgrd) ile yüksek

korelasyona sahip olduğu ve ayrıca, AFIS'den elde edilen neps verileriyle de orta düzeyde ilişkileri olduğu görülmüş ve tüm ilişkilerin pozitif yönde olduğu tespit edilmiştir.

4. Genel Değerlendirme

Aynı harmandan farklı işlem aşamalarında alınan telef numuneleri Shirley ayırıcı ve MDTA cihazlarında test edilmiştir. Temiz lif oranı (%), yabancı madde oranı (%) ve görünmez kayıp (uçan lif/toz) değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, diğer lif özelliklerini belirlemek için HVI ve AFIS cihazları ile de ölçümler yapılmıştır. Harman-hallaç ve tarak telefleri oldukça kirli telefler olup, içlerinde bol miktarda çepel vb. madde bulunur. Yabancı madde içeriği bakımından çok kirli hammaddelerde Shirley ayırıcı ya da MDTA cihazı ile daha hassas sonuç alınmaktadır [40]. Cer ve penye telefleri ise temiz teleflerdir. Ancak, penye döküntüsünden yüksek oranda temiz lif elde edilmesine rağmen SCI (iplik eğrilebilirlik indeksi) çok daha düşük çıkmıştır ki burada, lif boyunun da diğer teleflerdeki temiz lif boylarına göre çok daha kısa olduğu görülmektedir.

Penye tarama döküntüsü hariç iki cihazdan alınan temiz lif oranı % miktarları birbirine oldukça yakındır ki test sonuçlarına bakıldığında, MDTA cihazında görünmez kayıp oranı %'si, Shirley ayırıcı cihazından elde edilen sonuçlara göre daha yüksek çıkmıştır. Penye tarama döküntüleri için MDTA cihazında, yüksek oranda görünmez kayıp (%9,767) olduğu gözlenirken, diğer cihazda bu oran çok daha düşüktür. Aslında cer ve penye telefleri temiz teleflerdir ancak, penye makinesindeki tarama işlemi sırasında kısa lifler ile tozlar uzaklaştırıldığı ve penye telefleri de toz içerdiği için, cer teleflerine göre görünmez kayıp oranı daha yüksek çıkmıştır. Yapılan incelemelerde harman-hallaçta oluşan telefin içindeki yabancı madde miktarı yüksek olmasına rağmen, kirli telefler içinde eğrilebilirlik indeksinin en yüksek olduğu gözlenmiştir.

Özetle, elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Shirley ayırıcı ve MDTA arasındaki yabancı madde içeriğinin korelasyon katsayısı $r = 0,99$ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, her iki cihazın da teleflerin analizinde kullanılabileceği görülmüştür. MDTA cihazının avantajı ise çok daha düşük miktarlarda numune ile çalışabilmesidir.

Kaynaklar

- [1] <http://www.tekstilveren.org.tr/haberler/tekstilde-geri-doenuesuem-trend-degil-bir-zorunluluk> (Erişim tarihi 01.12.22)
- [2] Textile Exchange, "Preferred Fiber &Material Market Report", October 2022, https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf (Erişim tarihi 01.12.22)
- [3] Pickin J., Randell. P. 2017. Australian National Waste Report 2016. Department of the Environment and Energy & Blue Environment Pty Ltd.
- [4] Gurudatt .K, De P., Rakshit A.K., et al. 2003. Spinning fibers from poly (ethylene terephthalate) bottle-grade waste. *Journal of Applied Polymer Science*. 90:3536-3545. DOI: 10.1002/app.12969
- [5] Telli A, Babaarslan O. 2017. Usage of recycled cotton and polyester fibers for sustainable staple yarn technology. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 27:224-233. WOS: 000419066000003
- [6] Uyanık S. 2021. The Bursting Strength Properties of Knitted Fabrics Containing Recycled Polyester Fiber, *The Journal of The Textile Institute*. 112(12), 1998-2003.
- [7] Uyanık S. A. 2019. Study on The Suitability of Which Yarn Number to Use for Recycle Polyester Fiber, *The Journal of The Textile Institute*. 110(7), 1012-1031.
- [8] Mishra R., Behera B.K., Militky J. 2014. 3D woven green composites from textile waste: Mechanical performance. *Journal of the Textile Institute*. 105:460-466. DOI: 10.1080/00405000.2013.820865

- [9] Briga-Sá A., Nascimento D., Teixeira N., et al. 2013. Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*. 38:155-160. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037
- [10] Binici H., Eken M., Dolaz M., et al. 2014. An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres. *Construction and Building Materials*. 51:24-33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.038
- [11] El Wazna M., El Fatihi M., El Bouari A., et al. 2017. Thermo physical characterization of sustainable insulation materials made from textile waste. *Journal of Building Engineering*. 12:196-201. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.06.008
- [12] Shukla S.R., Harad A.M., Jawale L.S. 2008. Recycling of waste PET into useful textile auxiliaries. *Waste Management*. 28:51-56. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.11.002
- [13] Karthik T., Gopalakrishnan D. 2014. Environmental analysis of textile value chain: An overview. In: Muthu SS, editor. *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing*. Singapore: Springer pp. 153-188. DOI: 10.1007/978-981-287-110-7_6
- [14] Agblevor F.A., Cundiff J.S, Mingle C., et al. 2006. Storage and characterization of cotton gin waste for ethanol production. *Resources, Conservation and Recycling*. 46:198-216. DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.07.002
- [15] Boykin J. C., Derek P., Whitelock, et al. 2008, "Manual Fractionation of MDTA-3 Trash Samples from Cotton Lint", Rhode Island, June 29 – July 2, 084182. (doi:10.13031/2013.25207) Published by the American Society of Agricultural and Biological Engineers, www.asabe.org.
- [16] Lawrence C.A. 2003. *Fundamentals of Spun Yarn Tehnology*. Vol. 509. CRC Press.
- [17] Klein W., Stalder H. 1987. *A Practical Guide to Opening and Carding*. Textile Institute. 60 p.
- [18] Klein W. 2014. *Blowroom and Carding, The Rieter Manual of Spinning*. Vol. 2. Rieter Machine Works Ltd; 87 p.
- [19] Bedez Ute, T. 2012. Sirospun pamuk ipliklerinde iplik özellikleri ile lif özellikleri arasındaki ilişkinin fonksiyonel olarak tahminlenmesi üzerine bir araştırma (Doktora Tezi, Ege Üniversitesi).
- [20] Frydrych I. and Matusak M., 2002, Predicting the Nep Number in Cotton Yarn—Determining the Critical Nep Size, *Textile Research Journal*, 72: 917-923.
- [21] Frydrych, I., & Matusiak, M. 2002. Trends of AFIS application in research and industry. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 10(3), 35-39.
- [22] Wulfhorst B. 1984. Technological and Economic-Aspects for The Waste Processing in Modern Cotton Spinning Plants. *Melliand Textilberichte International Textile Reports*. 65:730. WOS: A1984TR92800013
- [23] Duru P.N., Babaarslan O. 2003. Determining an optimum opening roller speed for spinning polyester/waste blend rotor yarns. *Textile Research Journal*. 73:907-911. DOI: 10.1177/004051750307301010
- [24] Hasani H., Semnani D., Tabatabaei S. 2010. Determining the optimum spinning conditions to produce the rotor yarns from cotton wastes. *Industria Textilă*. 61(6):259-264
- [25] Hasani H., Tabatabaei S.A. 2011. Optimizing spinning variables to reduce the hairiness of rotor yarns produced from waste fibres collected from the ginning process. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 86:21-25
- [26] Khan M.K.R., Rahman H. 2015. Study of effect of rotor speed, combing-roll speed and type of recycled waste on rotor yarn quality using response surface methodology. *IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering*. 2:2348-2181
- [27] Khan K.R., Hossain M.M., Sarker R.C. 2015. Statistical analyses and predicting the properties of cotton / waste blended open-end rotor yarn using Taguchi OA design. *International Journal of Textile Research*. 4:27-35. DOI: 10.5923/j.textile.20150402.01
- [28] Halimi M.T., Ben H.M., Azzouz B., et al. 2007. Effect of cotton waste and spinning parameters on rotor yarn quality. *Journal of the Textile Institute*. 98:437-442. DOI: 10.1080/00405000701547649
- [29] Halimi M.T., Azzouz B., Ben Hassen M., et al. 2009. Influence of spinning parameters and recovered fibers from cotton waste on the uniformity and hairiness of rotor spun yarn. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 4:36-44. DOI: 10.1177/155892500900400304

- [30] Celep G., Doğan G., Yüksekaya M.E., et al. 2006. Geri Dönüşümlü Lifler İçeren Süprem Kumaşların Isıl Konfor Özelliklerinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 4:104-112
- [31] Telli A., Babaarslan O. 2016. Commercialized denim fabric production with post-industrial and post-consumer wastes. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 26:213-220. WOS:000386121800013
- [32] Yılmaz D., Yelkovan S., Tirak Y. 2017. Comparison of the effects of different cotton fibre wastes on different yarn types. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 25:19-30. DOI: 10.5604/01.3001.0010.2340
- [33] Béchir W., Béchir A., Mohamed B.H. 2018. Industrial cotton waste: Recycling, Reclaimed fiber behavior and quality prediction of its blend. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 28: 14–20.
- [34] Gun A.D., Akturk H.N., Macit A.S., et al. 2014 Dimensional and physical properties of socks made from reclaimed fibre. *Journal of Textile Institute*. 2 105: 1108–1117.
- [35] Yüksekaya M.E., Celep G., Dogan G., et al. 2016. A comparative study of physical properties of yarns and fabrics produced from virgin and recycled fibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 68:68-76
- [36] Yunus M., Rahman F. 1990. Micronaire effects. *Textile Asia*. 13:58-61
- [37] Uyanık S., Parlakyiğit P., Ovalı S. 2022. Closed-Loop Recycled Yarn Production from Yarn Wastes and Investigation of Their Physical Properties Within the Scope of Sustainability, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 37(4): 1087-1101.
- [38] TS 1104-Pamukta ve telefte yabancı madde miktarının tayini (Shirley Ayırıcı) metodu
- [39] Babaarslan, O., Duru, P. N., & Erbil, Y. 2003. Elyaf Analiz, Şerit Hazırlık ve OE-Rotor İplik Eğirme Sistemi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(özel), 113-120.
- [40] Yurtaslan Ö., 2018. “Bir Tekstil İşletmesinde Üretilen Tekstil Teleflerinin Çevreci Bir Yaklaşımla Geri Kazanımı”, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lif ve Polimer Mühendisliği Anabilim Dalı.

TÜRKİYE'DE LI-ION PİL ÜRETİMİ YATIRIMLARI

Ahmet Turan ÖZDEMİR^{1,2*}

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38039, Türkiye

²Aspilsan Enerji A.Ş., Kayseri, 38350, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 25.04.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 01.05.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1287578

ÖZET

Dünyada ve ülkemizde küresel ısınmayı önlemek adına pek çok faaliyet sürdürülmektedir. Bu faaliyetlerden en önemlisi ise şüphesiz fosil yakıtların kullanımının sınırlandırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımınıdır. Bu alanda sürdürülen faaliyetlerin başında ise araçların neden olduğu karbon emisyonunun düşürülmesi gelmektedir. Yeni nesil araçların elektrikli olarak üretilmesi ve içten yanmalı motorların üretimini kısıtlanması enerji depolama sistemlerine olan ilgiyi arttırmıştır. Verimli enerji depolama sistemleri için li-ion pil kimyası oldukça rağbet gören bir teknolojidir. Ülkemiz de bu dönüşüme yabancı kalmayarak bir dizi yatırımı devreye sokmuştur. Kayseri’de 2022 yılında 18650 li-ion şarj edilebilir pil ile seri üretime geçmiş olan Aspilsan Enerji bu yatırımlarda öncü olmuştur. Ülkemizin bölgesinde bir batarya üreticisi olma misyonunu destekleyen yatırımlar zaman içerisinde devreye alınmaktadır. Batarya teknolojisinin tam anlamıyla ülkemize kazandırılması için kıymetli madenlerin çıkarılması, madenlerin pil isterlerine uygun şekilde işlenmesi, hücre tasarımı ve üretimi, paketleme, fabrika tasarımı, makine imalatı ve geri dönüşümü kapsayan sürecin bütünüyle yönetiliyor olması gerekir. Bu kabiliyetin ülke olarak kazanımının mümkün olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Li-Ion, Batarya, Pil, Yenilenebilir Enerji, Enerji Depolama Sistemleri

LI-ION CELL MANUFACTURING INVESTMENTS IN TÜRKİYE

ABSTRACT

Many activities have been carried out in the World and in our country in order to prevent global warming. The most important of these activities is undoubtedly the limitation of the use of fossil fuels and support the use of renewable energy sources. The first step of these activities is the reduction of carbon emissions caused by vehicles. New generation electrical vehicles and the restriction of the production of internal combustion engines have increased the demand on energy storage systems. Li-Ion battery chemistry is a popular technology for efficient energy storage systems. Turkey has interested in this transformation and has put in place a series of investments. Among these investments, Aspilsan Energy, which started mass production with 18650 Li-Ion rechargeable batteries in 2022 in Kayseri, has been the pioneer. Investments that support the mission of being a battery manufacturer as Turkey in our region are put into use over time. In order for battery technology to be fully adopted to Turkey, the process covering the minning of valuable materials, processing of mines in accordance with battery requirements, cell design and production, packaging and recycling must be managed completely. Turkey can gain the capability of managing whole battery production process from beginning to the end.

Keywords: Li-Ion, Battery, Cell, Renewable Energy, Energy Storage Systems

1. Giriş

Hızla tükenen Dünya enerji kaynakları ve küresel ısınma, fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı sorgulamamıza neden olmaktadır. Bu anlamda daha yaşanabilir bir çevre için sera gazı salınımını azaltmaya yönelik eylemler yürürlüğe sokulmaktadır. Bugün bazı büyük araç üreticileri dizel araç

¹e-posta: aturan@erciyes.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2796-1384> (Sorumlu Yazar)

modellerinin üretimlerini durdurdu. Bunun yanında bazı ülkeler içten yanmalı motorlu araçların bazı şehirlerde kullanımını yasakladı. Bu yasakların kapsamı 2030 yılından sonra daha da genişleyecektir. Ülkemizde karbon salınımını azaltmaya yönelik faaliyetlerin özendirilmesi ve planlanması amacıyla pek çok çalışma yapılmaktadır. 2022 yılında Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Konya’da düzenlenen İklim Şurası bu faaliyetlerden biridir [1]. Bu ve benzeri çalışmaların neticesinde fosil yakıtların kullanımı azaltılarak, alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla kullanımı noktasında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Ülkemizde güneş ve rüzgâr yolu ile üretilen elektriğin miktarı her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisinin çeşitlenmesi ile farklı kaynaklardan üretilen elektriğin yönetilmesi gündeme gelmiş ve bu ihtiyacı karşılamak noktasında depolama çözümleri zaruri olmuştur. Gerek elektrikli araçların yaygınlaşması gerekse güneş ve rüzgâr gibi alternatif kaynaklar ile elektrik üretimi, enerji depolama sistemlerine olan ihtiyacı her geçen gün arttırmaktadır [2]. Örneğin Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından 19 Kasım 2022’de Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe sokulan Rüzgâr ve Güneş Sahaları İçin Depolamalı Santral modeline toplam 164 GW kapasitede 2753 adet önlisans başvurusu yapılmıştır [3].

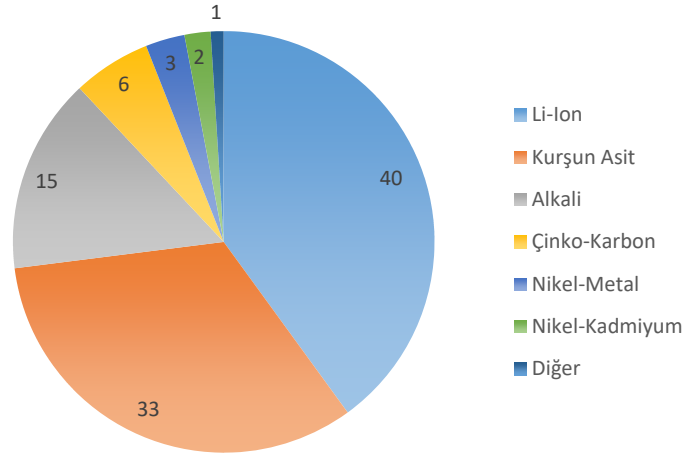
Depolama sistemleri sadece enerji santrallerinde kullanım ile sınırlı olmayıp ev tipi depolama sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, insansız hava/deniz araçları, telekomünikasyon, medikal cihaz, iş makineleri, yeni nesil jeneratörler, raylı sistemler, deniz araçları gibi pek çok alanı da direk olarak ilgilendirmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yayınlanan “Mobilite Araç ve Teknolojileri Yol Haritası” strateji belgesinde [4] “Batarya ve Yenilikçi Enerji Teknolojileri” kritik projeler arasında ifade edilmiştir.

Enerji depolama sistemlerinin ilerleyen zamanda gündemimizi daha çok meşgul edeceği yadsınamaz bir gerçektir. Bugün Dünya dengelerinin önemli bir bileşeni enerjidir. Enerjiye olan bağımlılık ülkelerin güvenlik endişelerini tetiklemektedir. Nükleer enerji ve hidrojen teknolojileri enerjide bağımsızlık için birer çıkış gibi görünmesine rağmen bu teknolojiler halen li-ion pil teknolojisinin sunduğu avantajların gerisindedir. Örneğin nükleer enerji taşınabilir uygulamalar için uygun olmadığı gibi pek çok güvenlik problemini de beraberinde getirmektedir. Bunun yanında hidrojen teknolojileri henüz maliyet etkin enerji arzını mümkün kılamamakla birlikte depolama ve lojistiği önemli birer sorun olarak devam etmektedir. Bu bakımdan li-ion pil teknolojisinin önümüzdeki beş yıl için özellikle de mobil enerji depolama sistemlerinin en çok tercih edilen çözümü olacağı görülmektedir.

2. Materyal ve Metod

Enerji depolama teknolojileri mekanik, elektrokimyasal, elektriksel, ısı, termokimyasal ve kimyasal yöntemler şeklinde sınıflandırılabilir. Mekanik depolama için en çok bilinen uygulamalar pompaj sistemleri ve sıkıştırılmış hava olarak verilebilir. Kapasitörler elektriksel yöntemlere, güneş enerjisi sistemleri ısı yöntemlere, pil ve aküler ise elektrokimyasal yöntemlere örnek olarak verilebilir. Termokimyasal ve kimyasal yöntemler için depolamaya doğrudan bir örnek vermek mümkün değildir. Ancak depolanmış hidrojen ile geliştirilmiş uygulamaların bütünü, dönüşüm başlığı altında tanımlanabilir [5].

Elektriksel depolama için elektrokimyasal yöntemler en yaygın uygulamaları kapsar; süper kapasitörler, akış bataryaları, farklı kimyalarda pil ve aküler bu grubun önemli uygulamaları arasında sıralanabilir. Enerji yoğunluğu, maliyet ve boyut avantajları nedeni ile özellikle taşınabilir uygulamalarda elektrokimyasal yöntemler sıklıkla tercih edilmektedir. Bu marketin şüphesiz en çok tercih edilen teknolojisi ise li-ion hücrelerdir. Taşınabilir ve elektronik araç endüstrisi marketinde satılan elektrokimyasal bataryalar incelendiğinde, pazarı li-ion bataryalarının domine ettiği görülmektedir [6]. Şekil 1’de 2019 yılı verileri kullanılarak hazırlanmış olan batarya marketinin elektrokimyasal paylaşımı grafiksel olarak verilmiştir. Kurşun-asit akülerin mevcut elektrikli araçlar üzerindeki kullanım gün geçtikçe azalmaktadır. Özellikle iş makineleri sınıfında forklift uygulamaları özelinde, hızlı şarj, hafiflik ve uzun ömür açısından li-ion bataryaların daha fazla tercih edildiği görülmektedir. Bu bakımdan li-ion bataryaların gelecekte daha büyük bir pazara hitap etmesi beklenmektedir.



Şekil 1: Taşınabilir ve Elektrikli Araç Pazarı Batarya Market Paylaşımı 2019 [6].

Küresel batarya kullanımı incelendiğinde 2019 yılında tek kullanımlık yani birincil pillerin marketin %27'sini, şarjlı yani ikincil pillerin ise marketin %73'ünü oluşturduğu görülmektedir [7]. Aspilsan Enerji tarafından üretilen şarj edilebilir li-ion bataryalar ev tipi uygulamalar, tüketici elektroniği, medikal cihazlar, iş makineleri, askeri uygulamalar, lojistik, telekomünikasyon, elektrikli araçlar, hava araçları, giyilebilir uygulamalar, deniz ve raylı sistemler gibi pek çok alanda kullanılmaktadır bkz. Şekil 2.

Şarj edilebilir elektrokimyasal bataryaların gelişimi hatırlanacak olursa kurşun-asit ile başlayan 30 Wh/kg seviyelerindeki enerji yoğunluğu Ni-Cd bataryalar ile 70 Wh/kg seviyelerine çıkarılmış, bugün ise li-ion bataryalar ile 200 Wh/kg seviyelerinde ticari olarak üretilmektedir. Günümüz li-ion pillerinde negatif elektrota silikon yerleştirmek sureti ile kapasite 300 Wh/kg seviyelerine kadar çıkarılabilmektedir. Son zamanlarda Li-S bataryalar ile kapasitenin 500-600 Wh/kg seviyelerine çıkarılabileceği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Li-hava bataryalarda ise enerji yoğunluğu için 3,5 kWh/kg teorik limit bulunmakla birlikte pratik uygulamaları halen geliştirme aşamasındadır [8].

Li-ion pillerin enerji yoğunluğu kurşun-asit ve Ni-Cd pillerden çok daha yüksek olduğu için önemli bir avantaja sahiptir. Bununla birlikte lityum elementinin özgül ağırlığı 0,534 g/cm³ iken kurşun için bu değer 11,34 g/cm³ seviyelerindedir [9]. Ayrıca Ni-Cd ve Ni-Md piller 1,2 V hücre voltajına sahipken lityum pillerde hücre voltajı 3,7 V civarındadır. Bütün bu avantajları sebebiyle lityum mükemmel bir pil malzemesi olarak sektörde hak ettiği ilgiyi görmektedir.

Küresel stratejiler dikkate alındığında, elektrokimyasal depolamanın karbon emisyonunu azaltmak ve artan mobilite ihtiyaçlarını karşılamak için son derece önemli olduğu görülmektedir. Ancak elektrokimyasal pillerin imalatında belli kıymetli madenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tıpkı bütün diğer kaynaklar gibi bu madenler de dünyada sınırlı olduğundan, öncelikle madenlerin keşfi ve çıkarılması, hücre isterlerine uygun şekilde işlenmesi, hammadde çeşitliğinin artırılması için farklı kimyalarda pil reçetelerinin tasarımı, pil üretimi, ikincil kullanımlar, sonrasında geri dönüşüm ve geri kazanım süreçlerinin her biri son derece kritiktir.

2.1. Fabrika Tasarımı ve Makine Parkuru

Pil üretimi için ihtiyaç duyulan tesislerin belli standartlara sahip olması gerekmektedir. Fabrika tasarımı önemli bazı teknik yetkinlikler gerektirmektedir. Fabrika alanının büyüklüğü ve fiziksel özellikleri, bu fabrikada yapılacak olan üretimin niteliğine ve ölçeğine göre

değişmektedir. Kullanılacak makinelerin teknik özellikleri, tavan yükseklikleri, zemin özellikleri, kapı ve koridor genişlikleri, üretim hattının uzunluğu, ihtiyaç duyulan istasyonların sayısı ve nitelikleri, kuru ve temiz odalar, yangın başta olmak üzere güvenlik tedbirlerinin alınması farklı uzmanlık ve tecrübeleri gerektirmektedir. Bu anlamda ülkemiz için pil ve batarya üretim fabrikalarının tasarım ve inşası süreci önemli mühendislik fırsatları barındırmaktadır.

Fabrikada hammadde depoya alımı, testi ve kabulü devamında ise bu malzemelerin karıştırma makinelerine transfer edildiği birimden itibaren başlayarak, elektrot kaplama, fırınlama, haddeleme, kesme, sarma/desteleme (montaj) ve formasyon sürecine kadar pek çok makine ve elektronik kontrol sistemi ülkemizde tasarlanıp üretilecek niteliktedir. Örneğin iklimlendirme sistemleri, kuru ve temiz odalar için yerli çözümler başarılı bir şekilde Aspilsan Enerji Mimarsinan OSB tesislerinde devreye alınmıştır [10]. Ayrıca pil üretiminde kullanılan test makinelerinin pek çoğu yine yerli imkanlar ile üretilecek özelliktedir. Bu test makinelerinden bazıları düşme testi, yanma testi, ezme testi gibi fiziksel hareketleri icra eden basit düzeneklerden oluşmaktadır. Ülkemizde pil üretiminde kullanılan bazı test cihazlarının yerli olarak imalatı yapılmaktadır [11].

2.2. Pil Tasarımı ve Üretimi

Ülkemizde Aspilsan Enerji tarafından 1993-96 yılları arasında Varta lisansı ile Ni-Cd ikincil pil üretimi yapılmıştır. Aspilsan Enerji 2022 yılında devreye almış olduğu yeni tesisi ile NMC kimyasında li-ion silindirik ikincil pil üretimine geçmiştir [12]. Bunun yanında ülkemizde bir dizi yatırım daha hayata geçme aşamasındadır. 2023 yılı içerisinde Kontrolmatik Ankara Polatlı'da Pomega isimli yatırımı ile LFP prizmatik ikincil pil üretim tesisini devreye almayı planlamaktadır. Bunun yanında TOGG Bursa Gemlik'te yabancı bir ortak ile birlikte NMC kimyasında li-ion kese tipi ikincil pil üretim tesisini SIRO isimli yatırımı ile devreye almaya çalışmaktadır. Önemli otomobil üreticileri olan FORD ve Toyota firmalarının da ülkemizde batarya üretim tesisleri kurmak yönünde gayretleri bulunmaktadır. Bunun yanında akü üreticilerinin de yurtiçi ve yurtdışı yatırımlar ile kurşun asitten lityuma dönüşüm için yatırım faaliyetlerinde buldukları bilinmektedir. Ayrıca prototip olarak pilot tesislerde reçete ve hücre geliştirme faaliyetleri sürdüren bazı araştırma merkezlerimiz bulunmaktadır. Bu merkezlerden en önemlisi elektrot üretme kabiliyeti de bulunan Tübitak RUTE'dir. Üniversitelerimizde bazı gruplar reçete tasarımları, yeni anot ve katot tasarımları üzerine çalışmalar sürdürmektedir. Bu alanda yapılan akademik çalışmalar zaman içerisinde özel sektör yatırımları ile birlikte üniversite-sanayi iş birliğine dönüşmektedir.



Şekil 2: Bataryaların Kullanım Alanları [11]

2.3. *Batarya Paketleme*

Batarya paketleme, pil ekosistemi içerisinde katma değeri en yüksek olan alanı oluşturmaktadır. Batarya paketi oluşturmak önemli bir bilgi birikimi gerektirmektedir. Pil kimyasına uygun bir şekilde şarj ve deşarjın sağlanması için gerekli elektronik kontrolün ve yazılımın oluşturulması şarttır. Batarya paketinin sağlığı, kalan kapasitenin belirlenmesi, pil ömrü ve yaşlanmaya bağlı olarak batarya paketinin karakteristiğinin kestirilmesi için yazılımlar geliştirilmektedir. Batarya şarj durumu tahminleme yapay zekâ, deneysel ölçümler ve matematiksel hesaplama gibi pek çok yöntem ile yapılmaktadır. Batarya çok sayıda değişkeni barındıran karmaşık ve lineer olmayan bir yapıdır. Bu bakımdan batarya durumlarının doğru bir şekilde belirlenmesi için model tabanlı veya tahminleme esaslı teknikler sıklıkla kullanılmaktadır. Batarya yönetim yazılımlarının en önemli görevlerinden biri ise son derece ciddi sonuçlar doğuracak olan kısa devre, aşırı akım çekme, ısınma gibi tehlikeli durumların tespiti ve gerekli önlemlerinin alınmasıdır. Batarya paketlemede önemli bir husus da termal kontroldür. Batarya paketinden akım çekildikçe ortaya çıkan ısı pilin performansını olumsuz yönde etkilemekte ve verimliliğini düşürmektedir. Bu bakımdan batarya paketi üzerindeki ısının uygun yöntemler ile toplanması ve kontrol altında alınması önemli bir mühendislik problemidir.

Ülkemizde pek çok paket üreticisi bulunmakla birlikte bunların en bilinenleri Aspişan Enerji, Altınay Elektromobilité, AVL, FEV, Ottomotive, Batkon, Go Battery, Imecar, Batron gibi firmalardır. Bunun yanında TOGG, FORD, BMC gibi kendi araçları için batarya üretimi yapan firmalar da bulunmaktadır.

2.4. *Hammadde ve Pil Bileşenleri Üretimi*

Pil hammadde konusunda ülkemizde ilgi çeken girişimlerden birisi Eti Maden'in bor atıklarından lityum eldesi projesi olmuştur. Ancak atıktan üretilen lityum, miktar olarak ihtiyacı karşılamaktan uzaktır. Ülkemizde lityum pil üretimi için gerekli maden ve hücre bileşenleri konusunda yapılan bazı çalışmalar olumlu sonuçlar vermiştir. Eti Bakır Mazıdağı işletmesinde kobalt karbonat üretmeye başlamıştır. Hücre bileşenleri alanında Asaş Alüminyum ve Assan Alüminyum firmaları üretmiş oldukları alüminyum plakaları katot elektrot içerisinde kullanılacak kaliteye çıkarmak için önemli faaliyetler sürdürmüş ve başarılı sonuçlar alınmıştır [13,14]. Bunun yanında bakır üreticileri anot elektrot için folyo üretimi konusunda çalışmalar sürdürmektedir. Ülkemizde üretim kapasitesi arttıkça seperatör gibi pil bileşenlerinin üretiminin de yerli üreticiler tarafından yapılabileceği değerlendirilmektedir. Aktif madde alanında NiCAT firması geliştirdiği katotların hücre üretiminde kullanılması için ciddi faaliyetler sürdürmektedir [15]. Elektrot bileşenleri alanında Nanografi firması grafen bazlı anotlar ile yeni nesil lityum piller üzerine çalışmalar sürdürmektedir.

2.5. *İkincil Kullanımlar*

Bataryalar için çevrim ömrü olarak ifade edilen bir kullanım ömrü parametresi bulunmaktadır. Bu parametre bir pilin sağlık durumunun tahminlenmesi hakkında en önemli veriyi oluşturmaktadır. Bu değer bir bataryanın başlangıç kapasite değerini %80 oranında koruyarak kaç defa şarj edilebileceğini tanımlar [16]. Lityum bataryalarda, bataryadan birim zamanda çekilen gücün miktarı, şarj hızı, yüksek sıcaklık altında çalışma süresi arttıkça bataryanın yapısı bozulmakta ve ömrü azalmaktadır. Sahada müşteri bulabilmek için bataryanın kwh başına birim üretim maliyeti ile batarya ömrü arasında anlamlı bir ilişki kurmak gerekmektedir. Örneğin kurşun asit aküler için kwh başına maliyet 100 \$ seviyesinde iken

çevrim ömrü 500 civarındadır. Bununla birlikte LFP bataryalar için kwh başına maliyet 300 \$ seviyelerinde iken çevrim ömrü 4400 gibi yüksek değerlerdedir [17].

Bataryaların geri dönüşüme girmeden önce %80 kapasitenin altında çalışsa dahi iş yapabileceği farklı alanlar bulunmaktadır. Örneğin araç bataryaları için enerji depolama sistemleri mükemmel bir ikincil kullanım alanı olmaktadır. Özellikle bina tipi depolama, depolamalı güneş ve rüzgâr enerji sahaları oldukça yüksek kapasitelerde depolamaya ihtiyaç duymaktadır. İkincil kullanımlar için bir bataryanın performansının ve ekonomik değerinin belirlenmesi hususu da çözülmesi gereken önemli bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

2.6. Geri Dönüşüm ve Geri Kazanım

Pil üretiminde kullanılan madenlerin sınırlı, işlenmesinin maliyetli ve kalitesinin çok yüksek olması nedenleri ile ikincil ömürlerini de tamamlamış olan bataryaların çöpe gitmesi yerine sahip oldukları kıymetli madenlerin tekrar kazanılması icap etmektedir. Bununla birlikte geri dönüşüm sadece ekonomik ömrünü tamamlamış bataryalar için değil aynı zamanda üretim esnasında çıkan artık, hurda ve atıklara da rahatlıkla uygulanabilmektedir [18]. Ülkemizde bu alanda faaliyet gösteren bazı firmalar için Exitcom, Ekovar ve Niocycle örnek gösterilebilir. Bu alanda daha fazla girişimin hayat bulması ve farklı madenlerin kazanımı konusunda uzmanlaşılması için yeterince fırsat bulunmaktadır.

3. Sonuçlar

2020 yılında Cumhurbaşkanlığı Yatırım Ofisi ve Tübitak Tüside koordinasyonunda hazırlanan, ülkemiz batarya pil ekosistemi yeteneklerini özetleyen “Batarya ve Yenilikçi Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu Raporu” önemli bilgiler sunmaktadır [19]. 2021 ve 2022 yılları arasındaki gelişmeleri kapsayan yeni bir rapor Cumhurbaşkanlığı Bilim Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu ve Tübitak işbirliği ile hazırlanmış ancak sonuç raporu henüz kamuoyu ile paylaşılmamıştır.

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Proje Bazlı Devlet Teşviği ile TOGG, Aspilsan Enerji ve Toyota firmalarını pil ve batarya üretimi konusunda desteklemiştir. Yine Bakanlığımız Mobilite Araç ve Teknolojileri Yol Haritası kapsamında Hamle programı ile Emobilite çağrısında 31 firmaya teşvik vermiştir. Bu proje teşvikleri otonom sürüş, elektronik görü, araç yapıları, batarya yönetim sistemleri gibi pek çok farklı alanda verilmiştir. Bakanlığın bu yöndeki gayretleri ülkemizde bir pil ekosistemi oluşmasına katkı sağlamaktadır.

Aspilsan Enerji'nin 2022 yılında 7.sini düzenlemiş olduğu geleneksel pil çalıştayları her yıl farklı bir tema ile ülkemizdeki ekosistemi yılda bir defa buluşturmaktadır. Bu çalıştaylar ekosistemin bütün paydaşlarını bir araya getirmekte ve önemli bir sinerji oluşturmaktadır. Özel ve resmi kurum/kuruluş yetkilileri, sektör temsilcileri, mühendisler, iş geliştiriciler, girişimciler, imalatçılar, müşteriler ve araştırmacıları bir araya getiren bu etkinliklerde pek çok iş birliği hayata geçirilmektedir.

Ülkemizin bölgesinde önemli bir batarya üreticisi olması için madencilikten geri dönüşüme, hücre tasarımından anahtar teslim fabrika kurmaya, makine imalatından test cihazlarına kadar uzanan bütün süreci yönetebiliyor olması gerekmektedir. Ülkemizin sahip olduğu sanayi altyapısı ve nitelikli insan kaynağı ile erişmiş olduğu teknik bilgi seviyesi bütün süreci sahiplenecek kapasitededir. Bugün Avrupalı pek çok üretici Uzakdoğu'dan almış oldukları ham madenleri işleyerek pazara yüksek katma değer ile sunmaktadır. Ülkemiz konumu itibarı ile madenciler ve pil üreticileri arasında önemli bir istasyon olma potansiyeline sahiptir.

Pil üretiminde kullanılacak makinelerin ülkemizde imalatı konusunda kabiliyetlerimizi değerlendirmek gerekirse; pil üretimi için depodaki hammaddeleri otomatik ölçekleme ile alarak başka alanlara taşıyan taşıyıcı sistemler ile toplanan hammaddeleri karıştırmaya yarayan karıştırıcı sistemler,

gıda ve ilaç endüstrisinde hali hazırda kullanılan benzer işleri yapan makineler ile oldukça yakın özelliklerdedir. Bu alanda faaliyet yürüten firmalar pil üretim tesislerinde bulunan dozlama ve karıştırıcı sistemleri kolaylıkla tasarlayıp üretebilirler. Elektrot kurutma fırınları, gıda imalatçıların kademeli kurutma fırınları ile oldukça benzer özelliktedir, bu alanda ülkemizde var olan teknik bilgi elektrot kurutma fırınlarının imalatında rahatlıkla kullanılabilir. Elektrot kesme düzenekleri, matbaa makine imalatı yapan firmalar tarafından hızlıca geliştirilebilecek özelliktedir. Montaj hattı, imalatın en karmaşık makinelerinin olduğu bölümü oluşturmakla birlikte, ülkemizdeki tekstil makinesi imalatçıları incelendiğinde ipliğin gerginliği ve işin akışı arasındaki karmaşık ahengi başarılı bir şekilde yönettikleri görülmektedir. Bu bakımdan montaj hattında elektrotun uygun bir gergi ile hızlı bir şekilde akmasını doğru olarak yönetmeyi mümkün kılan imalat makinelerinin ülkemizde üretilebileceği düşünülmektedir. Hat üzerindeki pil yıkama ve kalite kontrol istasyonları yine kolaylıkla yapılacak basit mekanik ve elektronik düzeneklerden oluşmaktadır. Üretilen pillerin performanslarının gözlemlendiği ve kalitelerine göre sınıflandırıldığı formasyon birimi, elektronik yoğun bir tasarıma sahiptir. Bu birim içerisinde imalattan çıkan piller, otomatik depolama sistemleri vasıtası ile şarj/deşarj istasyonlarına ulaştırılırlar. Bu istasyonlarda pillerin üzerine uygun elektriksel rejimler tatbik edilerek hücrelerin elektriksel davranışları incelenir. Güç elektroniği ve otomasyon bilgisi gerektiren bu süreç ülkemiz kabiliyetleri ile başarılı bir şekilde yapılacak özelliktedir.

Aktif materyaller, çözücüler, bağlayıcılar, elektrolitler, folyolar gibi pil bileşenlerinin dışındaki kasa, seperatör, insulator gibi mekanik imalatlar da ülkemiz imkanları ile hızlıca yapılabilecek türden malzemelerdir.

Geri dönüşüm ve geri kazanım konusunda hızlı aksiyonlar alınması durumunda yine coğrafi avantajımız nedeni ile ömür devrini tamamlamış bataryalar için Dünyada önemli bir dönüşüm merkezi olma ihtimalimiz son derece kuvvetlidir.

Sonuç olarak ülkemizin bölgesinde batarya merkezi olması için madencilikten, imalata, geri dönüşümden, test ve belgelendirmeye kadar bütün süreci kapsayıcı faaliyetlerde bulunması gerekir. Batarya üretimi bir ölçek ekonomisidir eğer ülkemizdeki üretim kapasitesi TW seviyesine ulaşırsa bu durumda bütün sürecin imalatçıları için önemli bir market oluşacaktır. Ülkemizdeki mevcut yatırımlar henüz GW seviyesindedir. Ancak girişimciler için halen Avrupa ve Amerika'daki batarya yatırımları önemli fırsatlar oluşturmaktadır. Bu bakımdan pil üretim ve test süreçleri içerisinde sıralanan ihtiyaçları karşılamak adına ülkemizde yapılacak girişimler Çin için uygulanan ambargolar nedeni ile batıda önemli fırsatlar bulacaktır.

Teşekkür

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ülkemizde batarya teknolojileri ve imalatının gelişmesi yönünde vermiş olduğu destekler, açık erişimli olarak kamuoyu ile paylaştığı strateji belgeleri ve çalışma grubu raporları için teşekkür ederim.

Kaynaklar

- [1] İklim Şurası 2022, <https://iklimsurasi.gov.tr/public/images/sonucbildirgesi.pdf> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [2] Castelveccchi, D., Electric cars: the battery challenge. *Nature*, 2021;596(7872):336-339.
- [3] Topbaş, G., Depolamalı rüzgâr ve güneş enerjisine Türkiye'nin her bölgesi için başvuru geliyor <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/depolamali-ruzgar-ve-gunes-enerjisine-turkiyenin-her-bolgesi-icin-basvuru-geliyor/2792448> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [4] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Mobilite ve araç teknolojileri yol haritası <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/strateji-belgeleri/mu0906011618> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)

- [5] Krichen, M., Basheer, Y., Qaisar, S. M., Waqar, A., A Survey on energy storage: Techniques and challenges. *Energies*, 2023;16(5):2271.
- [6] Davies, M., Verde, M.G., Mnyshenko, O., Chen, Y.R., Rajeev, R., Meng, Y.S., Elliott, G., Combined economic and technological evaluation of battery energy storage for grid applications. *Nat. Energy* 2019;4:42–50
- [7] Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A.I., Collis, G.E., Mahon, P.J., Rütther, T., Hollenkamp, A.F., A review on battery market trends, second-life reuse, and recycling. *Sustain. Chem.* 2021;2:167–205.
- [8] Harris, O.C., Lee, S.E., Lees, C., Tang, M., Review: Mechanisms and consequences of Chemical cross-talk in advanced Li-Ion batteries. *J. Phys. Energy* 2020;2:032002.
- [9] Wikipedia, Lityum, <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lityum> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [10] Aspilsan Enerji, Aspilsan Enerji Li-iyon pil üretimi için son imzayı attı, <https://www.aspilsan.com/aspilsan-enerji-li-iyon-pil-uretimi-icin-son-imzayi-atti/> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [11] Aspilsan Enerji, Atmaca Test Cihazı, <https://www.aspilsan.com/cozumler/makine-ve-ekipmanlarimiz/atmaca/> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [12] Aspilsan Enerji, Aspilsan Enerji A.Ş. Hakkında, <https://www.aspilsan.com/kurumsal/hakkimizda/> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [13] Aspilsan Enerji, ASAŞ'ın ürettiği pil hücresinin katot elektrotunda kullanılan alüminyum folyo Aspilsan Enerji kalite laboratuvarlarında test edildi, <https://www.aspilsan.com/asasin-urettigi-pil-hucresinin-katot-elektrotunda-kullanilan-aluminyum-folyo-aspilsan-enerji-kalite-laboratuvarlarinda-test-edildi/> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [14] Aspilsan Enerji, Assan Alüminyum'un ürettiği pil hücresinin katot elektrotunda kullanılan alüminyum folyo Aspilsan Enerji kalite laboratuvarlarında test edildi, <https://www.aspilsan.com/assan-aluminyumun-urettigi-pil-hucresinin-katot-elektrotunda-kullanilan-aluminyum-folyo-aspilsan-enerji-kalite-laboratuvarlarinda-test-edildi/> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [15] Cevrioglu, E. Ş., İzmir merkezli teknoloji firması yerli otomobile katkı sunmayı hedefliyor, <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/izmir-merkezli-teknoloji-firmasi-yerli-otomobile-katki-sunmayi-hedefliyor/1981230> (Erişim Tarihi: 20.04.2023)
- [16] Iqbal, H., Sarwar, S., Kirli, D., Shek, J. K., Kiprakis, A.E., A survey of second-life batteries based on techno-economic perspective and applications-based analysis. *Carbon Neutrality*, 2023;2(1):8.
- [17] Jaiswal, A., Lithium-ion battery based renewable energy solution for off-grid electricity: A techno-economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017;72:922-934.
- [18] Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., Rutz, M., Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of power sources*, 2012;207:173-182.
- [19] Tübitak, Batarya ve Yenilikçi Enerji Teknolojileri Çalışma Grubu Raporu, https://tusside.tubitak.gov.tr/sites/images/Tusside/batarya_ve_yenilikci_enerji_teknolojileri_calisma_grubu_raporu.pdf (Erişim Tarihi: 20.04.2023)