



INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING APPROACHES (IJE A)

2025

CILT / VOLUME: 2

SAYI / NO: 1

e-ISSN: 3062-1240



International Journal of Engineering Approaches



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Amasya Üniveresitesi, Mühendislik Fakültesi, 05100, Merkez/Amasya/TÜRKİYE
Amasya University, Faculty of Engineering, 05100, Amasya/TURKEY

e-posta / e-mail

ijea@amasya.edu.tr

Web

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

Bu dergi hakemli olup yılda 2 kez yayınlanır.

This journal is peer reviewed and published 2 issues per year.



International Journal of Engineering Approaches



Sahibi / Owner

Prof. Dr. Ahmet Hakkı TURABİ
Rector

Baş Editör / Editorial Board Members

Assist. Prof. Dr. Kutay AYDIN
Amasya University
kutay.aydin@amasya.edu.tr

Editör-Yayın Kurulu / Editorial Board Members

Prof. Dr. Levent UĞUR
Amasya University
levent.ugur@amasya.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet Burak BİLGİN
Amasya University
mehmetburak.bilgin@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Salih Berkan AYDEMİR
Amasya University
salih.aydemir@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Barış ÖZLÜ
Aksaray University
barisozlu@aksaray.edu.tr

Prof. Dr. Aytaç YILDIZ
Bursa Technical University
aytac.yildiz@btu.edu.tr

Alan Editörleri / Section Editors

Assist. Prof. Dr. Mustafa Sami ATA
Amasya University
mustafa.ata@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Ayşe AYDIN YURDUSEV
Amasya University
ayse.yurdusev@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Halil BAYRAM
Amasya University
halil.bayram@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Oğuz BAŞ
Amasya University
oguz.bas@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Funda KUTLU ONAY
Amasya University
funda.kutlu@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Korhan ÖKTEN
Amasya University
korhan.okten@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. İsmail ÖZTÜRK
Amasya University
ismail.ozturk@amasya.edu.tr



International Journal of Engineering Approaches



Dil editörleri / Language editors

Assist. Prof. Dr. Mustafa Sami ATA

mustafa.ata@amasya.edu.tr

Yayın Danışma Kurulu / Editorial Advisory Board Members

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Gazi University

useker@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Aytaç YILDIZ

Bursa Technical University

aytac.yildiz@btu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Erhan BERGİL

Amasya University

erhan.bergil@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Şaban ÖZTÜRK

Ankara Hacı Bayram Veli University

saban.ozturk@hbv.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Canan ORAL

Amasya University

canan.oral@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Alişan AYVAZ

Amasya University

alisan.ayvaz@amasya.edu.tr

Prof. Dr. Unal KURT

Amasya University

unal.kurt@amasya.edu.tr

Prof. Dr. Özgen KORKMAZ

Amasya University

ozgen.korkmaz@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Yavuz ÜNAL

Sinop University

yunal@sinop.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Gültekin UZUN

Gazi University

uzun.gultekin@gazi.edu.tr

Dr. Behsat Gökçen DEMİR

Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü

demirbehzatgokcen@gmail.com

Prof. Dr. Arif ÖZKAN

Kocaeli University

arif.ozkan@kocaeli.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Barış ÖZLÜ

Aksaray University

barisozlu@aksaray.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Engin Ufuk ERGÜL

Amasya University

engin.ergul@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Harun YAKA

Amasya University

harun.yaka@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Mehmet EKİCİ

Amasya University

mehmet.ekici@amasya.edu.tr

Assist. Prof. Dr. İbrahim Kürşad TÜRKOĞLU

Amasya University

i.kursad@amasya.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Halil Burak KAYBAL

Kırıkkale University

hburak@kku.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Duygu SİNANÇ TERZİ

Amasya University

duygu.terzi@amasya.edu.tr

Prof. Dr. İhsan KORKUT

Gazi University

ikorkut@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Onuralp ULUER

Gazi University

uluer@gazi.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Onur ÇAVUŞOĞLU

Gazi University

onurcavusoglu@gazi.edu.tr



International Journal of Engineering Approaches



Prof. Dr. İbrahim KELEŞ
Samsun University
ibrahim.keles@samsun.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Harun AKKUŞ
Niğde Ömer Halisdemir University
hakkus@ohu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Fuat KARTAL
Kastamonu University
fkartal@kastamonu.edu.tr

Prof. Dr. Turgay KIVAK
Düzce University
turgaykivak@duzce.edu.tr

Prof. Dr. Halil DEMİR
Karabük University
hdemir@karabuk.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Fikret POLAT
Düzce University
fikretpolat@duzce.edu.tr

Bu sayının hakemleri / Reviewers of the issue

Assoc. Prof. Dr. Koray KARABULUT

Assoc. Prof. Dr. Kerim MARTİN

Lect. Hasan İŞÇİ

Assoc. Prof. Dr. Jinyang XU

Assoc. Prof. Dr. Esreb DZHEMİLOV

Assist. Prof. Dr. Rasim ÇEKİK

Assist. Prof. Dr. Nilüfer KURŞUNOĞLU

Assoc. Prof. Dr. Fikret POLAT

Assist. Prof. Dr. Ahmet YURTÇU

Assoc. Prof. Dr. Harun YAKA

Assist. Prof. Dr. Avinash SOMATKAR

Assist. Prof. Dr. Yavuz ÜNAL

Assist. Prof. Dr. Ertürk ERDAĞI

Assoc. Prof. Dr. Sait KURŞUNOĞLU

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

Faz değişim malzemesi ile çift borulu gizli ısı depolamada kanat yerleşim düzeninin erime performansı üzerine etkisi 1-6

Effect of fin layout on melting performance in double pipe latent heat storage with phase change material

Orçun Altınok, Burak Kurşun

İSG dersinin mühendislik fakültesi öğrencilerinin İSG farkındalığı üzerindeki etkisi: Devlet üniversitesi örneği 7-16

The impact of OHS course on engineering faculty students' OHS awareness: A case study of a public university

Özge Akboğa Kale, Sude Kayahan, Selin Baş, Arda Kuruca, Doğukan Kahraman, Serhad Çakır

Influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on machining performance: an analysis of material removal processes in mild steel 17-24

Yumuşak çelikte malzeme kaldırma süreçlerinin analizi: iş mili hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin işleme performansı üzerindeki etkisi

Dickson David Olodu, Andrew Amagbor Eramah, Osagie Imevbore Ihenyen

Investigation of the effect of various factors on hair loss using machine learning techniques 25-31

Çeşitli faktörlerin saç dökülmesine etkisinin makine öğrenmesi teknikleriyle incelenmesi

Murat Aslan, Berkant Baş, Bekir Parlak

Derleme Makalesi / Review Article

A Review on the applications of fluid mechanics in oil and gas industries in Nigeria 32-42

Nijerya petrol ve gaz endüstrisinde akışkanlar mekaniğinin uygulamalarına ilişkin bir derleme

Dickson David Olodu, Francis Inegbedion, Osagie Imevbore Ihenyen



Araştırma Makalesi / Research Article

Faz değişim malzemesi ile çift borulu gizli ısı depolamada kanat yerleşim düzeninin erime performansı üzerine etkisi

Effect of fin layout on melting performance in double pipe latent heat storage with phase change material

Orçun Altınok¹ , Burak Kurşun^{1*}

¹ Amasya University, Department of Mechanical Engineering, Amasya, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: burak.kursun@amasya.edu.tr

Makale Bilgileri / Article Info

Anahtar Kelimeler

Çift borulu
Gizli ısı
Faz değişim malzemesi
Erime

Keywords

Double pipe
Latent heat
Phase change material
Melting

Makale tarihçesi / Article history

Geliş / Received: 20.01.2025
Düzeltilme / Revised: 03.02.2025
Kabul / Accepted: 14.02.2025

Öz

Enerji depolama teknolojileri, enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilirlik açısından giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, faz değişim malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve sabit sıcaklıklarda enerji depolama kapasiteleriyle öne çıkmaktadır. FDM'lerin düşük ısı iletkenlikleri, bu malzemelerin pratik uygulamalarda ve ticari kullanımlarda karşılaştığı en büyük zorluklardan biridir. Bu nedenle, FDM ile enerji depolama sistemlerinde ısı iletkenliği artırmak amacıyla kanat kullanımı, nano partikül eklenmesi ve metal köpük uygulamaları gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada da kanat kullanımı tercih edilmiş ancak literatür çalışmalarından farklı olarak kanatçıklar FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmış ve bu düzensiz kanat dağılım oranlarının doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri birlikte incelenmiştir. Bu doğrultuda beş farklı kanat yerleşim konfigürasyonu modellenmiştir. Modeller için sayısal analizler iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Erime analizlerinin gerçekleştirilmesinde entalpi-porozite yöntemi kullanılmıştır. Parametrik analizler sonucunda, kanatların tümünün alt bölgeye yoğunlaştırıldığı konfigürasyonun en iyi erime performansı gösterdiği ve şarj süresini temel duruma göre %27,2 oranında kısalttığı belirlenmiştir.

Abstract

Energy storage technologies are becoming increasingly important for the efficient use of energy resources and sustainability. In this context, phase change materials (PCMs) stand out due to their high energy densities and capabilities to store energy at constant temperatures. However, the low thermal conductivity of PCMs presents a significant challenge in practical applications and commercial use. To address this issue, various methods such as fin utilization, the addition of nanoparticles, and the use of metal foams have been developed to enhance the thermal conductivity of PCMs in energy storage systems. In this study, fin utilization was adopted, but unlike previous literature, the fins were concentrated at different ratios in the upper and lower regions of the PCM container, and the effects of these uneven fin distributions on natural convection flow and charging time were simultaneously investigated. Five different fin layout configurations were modeled, and numerical analyses were performed in a two-dimensional and time-dependent manner. The enthalpy-porosity method was used for melting analyses. Parametric analysis results indicated that the configuration with fins concentrated entirely in the lower region exhibited the best melting performance, reducing the charging time by 27.2% compared to the baseline configuration.

1. Giriş

Enerji depolama, enerji talebi ve arzı arasındaki dengesizlikleri gidermek, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu artırmak ve enerji arz güvenliğini sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Faz değişim

malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji depolama yoğunlukları ve sabit sıcaklıkta enerji depolama yetenekleri nedeniyle termal enerji depolama sistemlerinde kullanıma potansiyeli yüksek olan malzemelerdir. FDM'ler, enerji depolama ve geri kazanım süreçlerinde etkin rol oynayarak,



enerji verimliliğini artırmakta ve sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmaktadır.

FDM'lerin düşük ısı iletkenlikleri pratikte uygulanabilirliğinin ve ticarileşmesinin önündeki en önemli engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle FDM ile enerji depolamada kanat kullanımı, nano partikül ve metal köpük ilavesi gibi yöntemler uygulanarak ısı iletkenliğinin artırılması hedeflenmiştir [1,2]. Kanatçık kullanımı pratik olarak uygulanabilirliğinin yüksek olması ve düşük maliyeti nedeniyle ısı iletkenliği artırma yöntemleri arasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Kanat kullanımı ile FDM ve boru arasındaki ısı transfer yüzey alanı artırılmakta ve erime/katılma performansı iyileşme sağlanmaktadır. FDM ile enerji depolamada kanat kullanımına ilişkin birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir [3]. Abdulateef vd. düz ve üçgen geometri kanat kullanımının FDM'nin erime performansına etkilerini incelemişler ve üçgen kanat geometrisi için daha kısa şarj süresi elde etmişlerdir [4]. Sarani vd. ise yaptıkları çalışmada hem iç hem de dış boru yüzeyine kanat yerleşimi yaparak katılma performansında önemli ölçüde artış meydana getirmişlerdir [5]. Mahdi vd. tarafından yapılan benzer bir çalışmada da hem iç hem de dış boru üzerine kanat yerleşimi yapılmış ancak bu çalışmada farklı olarak erime analizi için iç boru üzerinde birbirinden farklı kanat boyları kullanılmıştır [6]. Hajizadeh vd. ise V ve Y şekilli kanat kullanımı ile FDM'nin katılma performansının iyileştirilebildiğini tespit etmişlerdir [7]. Düz kanatlı iç borunun eksantrik yerleşimi neticesinde şarj süresinde %27.63 iyileşme meydana geldiği Patel vd. tarafından aktarılmıştır [8]. Rozenfeld vd. ise helisel kanat kullanımının FDM'nin hem erime hem de katılma performansını iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır [9]. FDM ile eksenel kanatlı çoklu borulu gizli ısı depolama sisteminin geleneksel çoklu borulu enerji depolama sistemi ile kıyaslanması Anish vd. tarafından araştırılmıştır [10]. Çalışmada ısı transferini etkileyen en önemli faktörün boru sayısı ve kanat uzunluğu olduğu ortaya konulmuştur. Huang vd. ise iç boru yüzeyinde ağaç şekilli inovatif bir kanat geometrisi kullanmış ve FDM'nin erime ve katılma performansını incelemişlerdir [11]. Ağaç şekilli kanat geometrisi ile şarj vedeşarj süresi sırasıyla %29.4 ve %22.8 oranında kısalmıştır. Nie vd. taç yaprak şekilli 16 kanat konfigürasyonu yerleşiminin FDM'nin katılma etkisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır [21]. Taç yaprak konfigürasyonları ile %4.1 ile %23.6 arasında katılma süresinde kısalma elde etmişlerdir. Tang vd. ise gövde-boru tipi bir gizli ısı depolama ünitesinde yekpare eksenel kanat kullanımı yerine kesintili kanat kullanımı tercih etmiş ve kanat geometrisinin optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [22]. Optimizasyon neticesinde %100 erime süresinde yekpare kanat tasarımına göre %21 oranında düşüş elde etmişlerdir. Uniform kanat dağılımına sahip bir gövde-boru tipi gizli ısı depolama ünitesinde veri odaklı topoloji tasarımı ile uygun kanat sayılarının ve kanatların birbirine göre boyutlarının ve geometrilerinin erime ve katılma performansına etkileri de Luo vd. tarafından aktarılmıştır [23]. Topoloji tasarımı ile erime ve katılma süresinde sırasıyla %21 ve %9 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Balık kılıcı şekilli biyonomik kanat tasarımlarının erime performansına etkilerinin incelendiği çalışmalarda mevcuttur [24,25]. Bu çalışmalarda biyonomik kanat tasarımları ile geleneksel düz kanat yapısına göre şarj süresinde %47.1 ve %23.08 oranında kısalma sağlanmıştır. Tao ve He'nin yaptığı çalışmada farklı sayıda kanatlar tamamen dış borunun alt bölgesine yoğunlaştırılmış ve bu yoğunlaştırmanın doğal konveksiyon akışını artırdığı

gözlenmiştir [12]. Ayrıca alt bölgedeki optimum kanat sayısının yedi olması gerektiği aktarılmıştır. Bu çalışmalar haricinde kanat boyutları, optimizasyonu ve geometrisi ile ilgili birçok çalışma literatürde mevcuttur.

Literatürde FDM ile gizli ısı depolamada kanat kullanımı ve kanat yerleşim düzenine ilişkin çalışmalar mevcut fakat kanatların FDM haznesinin alt ve üst bölgesinde yoğunlaştırma seviyelerinin erime performansına etkilerinin birlikte incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada kanatçıklar FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmış ve bu düzensiz kanat dağılım oranlarının doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri birlikte incelenmiştir. Böylece fiziksel olgulara dayanarak düzensiz kanat yerleşiminde dikkat edilmesi gereken hususlar konusunda literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda beş farklı kanat dağılım konfigürasyonu için sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular sıvı fraksiyonu ve şarj süresi açısından değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metod

Bu bölümde gizli ısı depolama için tasarlanan fiziksel modeller ve sayısal çözümleme için kullanılan matematiksel ve sayısal modellere yer verilmiştir.

2.1. Fiziksel Model

Bu çalışmada beş farklı kanat yerleşim düzeni için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı kanat yerleşim düzenleri için oluşturulan modeller Şekil 1'de görülmektedir. Şekil 1'de iç ve dış boru çapları sırasıyla 20 mm ve 40 mm'dir. Uniform olmayan kanat yerleşim düzenlerinde kanatların yoğun olduğu bölgelerde kanatlar arasındaki boşluk açıları doğal konveksiyona engel olmaması açısından 45° olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Kanat yerleşim düzenleri

2.2. Matematiksel Model

FDM'nin erime analizinin gerçekleştirilmesinde entalpi-porozite yönteminden faydalanılmış ve aşağıdaki varsayımlar sayısal çözümde uygulanmıştır [13,14]:

- Hesaplama alanı iki boyutlu olarak ele alınmıştır.
- Akış zamana bağlı bir süreç olarak kabul edilmiştir.
- Akışkan sıkıştırılamaz ve Newton tipi bir akışkan olarak varsayılmıştır.
- Doğal konveksiyon akışları için Boussinesq yaklaşımı kullanılmıştır.
- Dış borunun dış yüzeyinden ısı transferinin olmadığı kabul edilmiştir (Adyabatik sınır koşulu).

Matematiksel model için kullanılan kütle ve x ve y yönlerindeki momentumun korunumu denklemleri sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3 ile verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + uA \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + vA + \rho g \beta (T - T_m) \quad (3)$$

Denklemlerde, ρ yoğunluğu, g yer çekimi ivmesini (9.81 m/s^2), μ dinamik viskoziteyi, β termal genleşme katsayısını ve T sıcaklığı temsil etmektedir. Denklemlerde u ve v , sırasıyla x ve y yönlerindeki akışkan hız bileşenlerini ifade eder. Denklem 3'ün sağ tarafında yer alan son terim, Boussinesq yaklaşımı çerçevesinde kaldırma kuvveti etkisini temsil eder. A değeri, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [15]:

$$A = -A_{mush} \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

Denklemlerde λ sıvı fraksiyonudur ve aşağıdaki şekilde belirlenir [11].

$$\lambda = \begin{cases} 0 & ; T < T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) & ; T_s < T < T_l \\ 1 & ; T > T_l \end{cases} \quad (5)$$

Denklemlerde l ve s alt simgeleri, sırasıyla sıvı ve katı fazları temsil eder. A_{mush} , katılaşma sırasında akışkan hızının azaltılması için peltemsi bölgeyi tanımlayan katsayıdır ve bu çalışmada $A_{mush}=10^5$ olarak kabul edilmiştir. ε , sıfıra bölünmeyi engellemek amacıyla kullanılan küçük bir değer olup, bu çalışmada $\varepsilon=0.001$ olarak alınmıştır [15].

Enerji denklemi ise aşağıda verildiği gibidir,

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Denklemlerde k iletim ısı transfer katsayısını ve h entalpiyi göstermektedir. h Denklem 7 ile hesaplanmıştır [16].

$$h = \begin{cases} \int_{T_{ref}}^T c_p dT & ; T < T_s \\ \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda H & ; T_s < T < T_l \\ \int_{T_{ref}}^{T_s} c_p dT + \int_{T_l}^T c_p dT & ; T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

Denklemlerde C_p özgül ısı kapasitesini, H gizli ısıyı ve T_{ref} referans sıcaklığı ifade etmektedir ($T_{ref} = 298.15 \text{ K}$). T , Denklem 8 ile hesaplanabilir [17].

$$T = \lambda(T_l - T_s) + T_s \quad (8)$$

Hem ticari olarak kolay ulaşılabilir olması, hem de düşük sıcaklıklı enerji depolamaya uygun olması sebebiyle FDM olarak N-eikosan tercih edilmiştir. N-eikosan'ın termofiziksel özellikleri için Tablo 1 incelenebilir.

Tablo 1. N-eikosan özellikleri [18]

Özellik ve Birim	Değer
Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)	2460
Sıvı Yoğunluğu (kg/m ³)	770
Isıl İletkenlik (W/mK)	0.1505
Dinamik Viskozite (kg/ms)	0.00385
Gizli Isı (J/kg)	247600
Termal Genleşme Katsayısı (1/K)	0,0009
Katılaşma Sıcaklığı (K)	308.15
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	310.15

İç borudaki konveksiyonel ısı transfer katsayısı (h_{conv}), Dittus-Boelter korelasyonu kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem (9)) [19].

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (9)$$

h_{conv} , Nusselt sayısı (Nu) ve Reynolds sayısının (Re) hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (10)$$

$$D_H = \frac{4A_c}{p} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{h_{konv} D_H}{k} \quad (12)$$

Denklemlerde, ρ ve V sırasıyla yoğunluğu ve ortalama akış hızını göstermektedir. μ ise akışkanın dinamik viskozitesini temsil eder. Denklem 11'de, D_H hidrolik çapı ifade eder. Hidrolik çap hesabında, A_c FDM'nin yüzey alanını (878.34 mm^2), p ise akışkanın temas ettiği ıslak çevre uzunluğunu gösterir.

2.3. Sınır Şartları

Sayısal çözümlemelerde FDM'nin erime sıcaklığı ortalama 309.15 K olarak alınmıştır. Ayrıca, FDM'nin erime periyodu başlangıcındaki ($t=0 \text{ s}$) sıcaklığı erime sıcaklığının 1°C altındadır (Denklem 15). Dış borunun dış yüzeyine adyabatik sınır koşulu uygulanmıştır (Denklem (13)). İç borunun iç yüzeyine ise taşınım ısı transferi sınır koşulu atanmıştır. Ek olarak erime periyodu boyunca iç boru içerisindeki akışkanın ortalama sıcaklığının 329.15 K olduğu varsayılmıştır.

$$|\dot{q}_{iletim}|_{OS} = 0, t(s) = t \quad (13)$$

$$|\dot{q}_{iletim}|_{IS} = h_{konv}(T_{mf} - T_w), t(s) = t \quad (14)$$

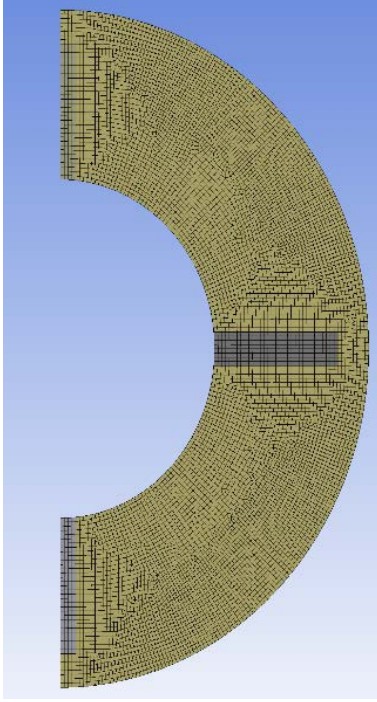
$$[T_{PCM} = 308.15 \text{ K}, t(s) = 0] \quad (15)$$

Denklemlerde, T_w duvarın sıcaklığını, $T_{m,f}$ ise ortalama akışkan sıcaklığını temsil etmektedir. h_{konv} ise konveksiyon yolu ile gerçekleşen ısı transferinin katsayısıdır. IS iç yüzeyi, OS ise dış yüzeyi ifade etmektedir.

2.4. Sayısal Çözümleme

Sayısal analizler, sonlu hacimler yöntemi kullanılarak ANSYS-Fluent 2022 R1 yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Basınç-hız çiftleri arasındaki ilişkiyi çözmek için PISO algoritması uygulanmış, basınç düzeltme işlemleri için PRESTO! yöntemi tercih edilmiştir. Momentum ve enerji denklemlerinin ayrıştırılmasında QUICK şeması kullanılmış, zamana bağlı denklemler için birinci dereceden geçiş formülü uygulanmıştır. Kalıntı değerleri kütle ve momentum korunum denklemleri için 10^{-6} , enerji denklemi için ise 10^{-8} olana kadar analizler

sürdürülmüştür. Şekil 2’de görüldüğü gibi kanat yüzeyleri ve FDM bölgesine hegzahedral hücre yapısı uygulanmıştır.



Şekil 2. Kanat yüzeyi ve FDM bölgesindeki hücre yapısı ve dağılımı

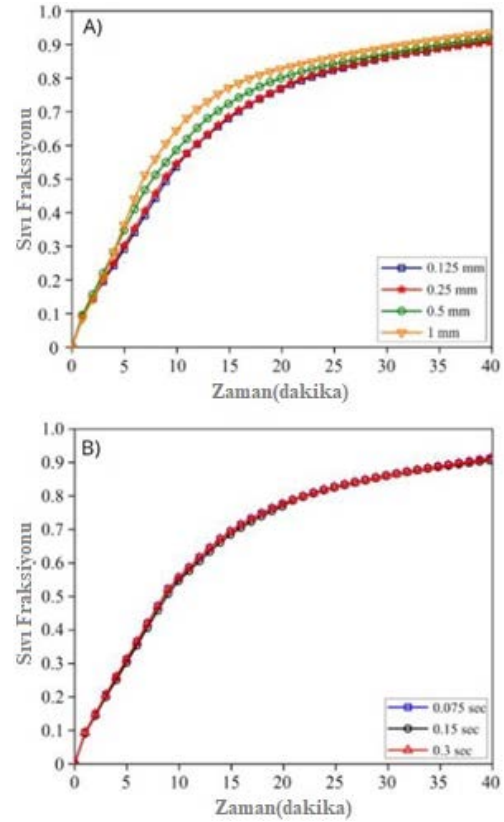
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada uygulanan matematiksel ve sayısal modelin doğruluğunun tespit edilmesi için öncelikle hücre sayısından ve zaman adımından bağımsızlık testleri ve literatürdeki çalışma sonuçları ile karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise parametrik çalışma yapılarak bulgular sıvı fraksiyonu ve şarj süresi açısından değerlendirilmiştir.

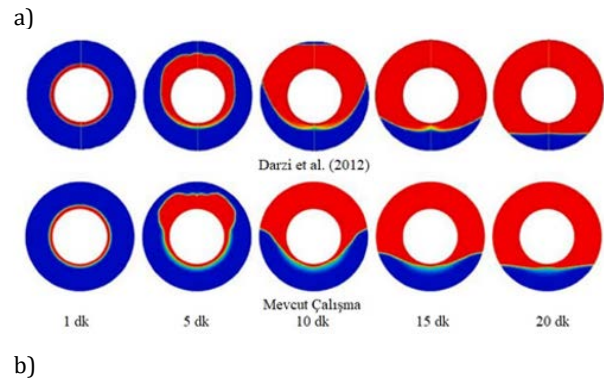
3.1. Doğrulama

Doğrulama işlemleri kapsamında ilk olarak hücre boyutu ve zaman adımından bağımsızlık testleri gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere, 0.25 mm’den küçük ızgara boyutu ve 0.15 saniyeden kısa zaman adımları için sıvı fraksiyonundaki değişim ihmal edilebilir seviyededir. Bu nedenle, parametrik analizler için 0.25 mm’lik ızgara boyutu ve 0.15 saniyelik zaman adımı tercih edilmiştir (Şekil 3).

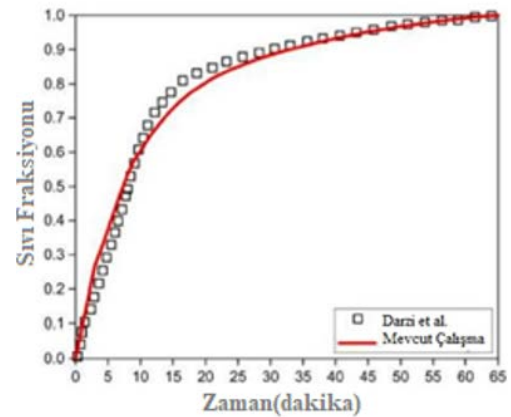
Sıvı fraksiyonunun konturları Şekil 4a’da sunulmuştur. 65 dakikalık erime süresi boyunca sıvı fraksiyon eğrilerinin karşılaştırması ise Şekil 4b’de yer almaktadır. Şekil 4b’de, iki analiz arasındaki en büyük farkın %6.5 olduğu tespit edilmiştir. Bu hata oranı, kullanılan sayısal modelin belirli bir erime periyodu için kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. Bağımsızlık testleri a) Hücre sayısından bağımsızlık, b) Zaman adımından bağımsızlık



b)



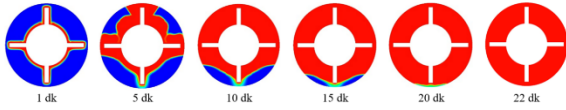
Şekil 4. Literatür çalışması [20] ile karşılaştırma a) Sıvı fraksiyonu konturları, b) Zamana bağlı sıvı fraksiyonu eğrileri

3.2. Parametrik Çalışma Bulguları

Bu bölümde beş farklı kanat yerleşim konfigürasyonu için sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve bulgular sıvı fraksiyonu konturları ve %100 erime süreleri açısından değerlendirilmiştir. Uniform kanat dağılımının olduğu Model 1, temel durum olarak kabul edilmiştir. Şekil 5’de tüm kanat yerleşim konfigürasyonları için zamana bağlı sıvı fraksiyonu konturları verilmiştir.

Tüm modellerde farklı şarj sürelerinin oluşmasındaki temel fiziksel mekanizma erimiş FDM’deki doğal konveksiyon akışı olmuştur. Eriyen sıcak akışkan kaldırma kuvveti etkisi ile FDM haznesinin üst bölgesine doğru hareket ederek o bölgedeki FDM’nin de erimesini sağlamıştır. Doğal konveksiyon akışının en yüksek olduğu modelde en düşük şarj süresi elde edilmiştir. Kanatların FDM haznesinin alt bölgesinde yoğunlaştırılması alt bölgedeki FDM’nin daha hızlı erimesini ve doğal konveksiyonla ısı transferinin de daha etkin olmasını sağlamıştır. Böylece en düşük şarj süresi Model 5 ile elde edilmiştir (16 dk). Model 3’de ise FDM haznesinin alt bölgesindeki FDM’nin daha yavaş erimesi doğal konveksiyon etkisini azaltmış ve en yüksek şarj süresine ulaşılmıştır. Model 2’de de alt bölgede kanatlar yoğunlaştırılmış ancak Model 5’e göre şarj süresi 3 dk daha uzun olmuştur. Uniform kanat dağılımına sahip Model 1 ve Model 4’de ise aynı şarj süreleri elde edilmiştir (22 dk). Sıvı fraksiyonu bulguları kanatların tümünün alt bölgeye konumlandırılmasının şarj süresi açısından daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

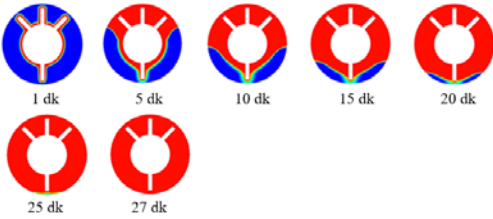
Model 1



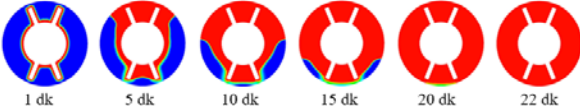
Model 2



Model 3



Model 4



Model 5



Şekil 5. Tüm modeller için sıvı fraksiyonu konturları ve %100 erime süreleri

Tablo 2’de ise tüm modeller için %100 erime süreleri (şarj süresi) ve uygulanan kanat yerleşim konfigürasyonlarıyla temel duruma göre şarj sürelerindeki artış ve azalma sunulmuştur. Kanatların üst bölgede yoğunlaştırıldığı Model 3 ile temel duruma göre şarj süresi %22.7 artarken Model 2 ve 5 ile temel duruma göre şarj sürelerinde düşüş meydana gelmiştir. Şarj süresindeki en yüksek düşüş %27.2 ile Model 5 kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 2. Şarj süreleri ve temel duruma göre şarj sürelerindeki artma ve azalma

Model	Şarj Süresi	Şarj Süresindeki Azalma/Artma (%)
Model 1	22 dk	-
Model 2	19 dk	13.6 ↓
Model 3	27 dk	22.7 ↑
Model 4	22 dk	-
Model 5	16 dk	27.2 ↓

4. Sonuçlar

Bu çalışmada FDM ile çift borulu gizli ısı depolama işleminde ısı iletkenliği artırmada yaygın olarak tercih edilen kanat kullanımının sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kanat yerleşim düzeninin değiştirilerek doğal konveksiyonla olan ısı transferinin artırılması ve şarj süresinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Kanat yerleşim düzeninin doğal konveksiyon akışına ve şarj süresine etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Sayısal analiz bulguları doğal konveksiyon akışındaki artışın şarj süresini düşürdüğünü göstermiştir.
- Kanat dağılımının FDM haznesinin alt bölgesinde yoğunlaşacak şekilde gerçekleştirilmesi alt bölgedeki erimiş FDM miktarını ve doğal konveksiyon akışını artırarak şarj süresini düşürmüştür. Model 2 ve Model 5’deki sıvı fraksiyonları kıyaslandığında kanatların tümünün alt bölgede yoğunlaştırılmasının şarj süresi açısından daha iyi sonuç verdiğini ortaya çıkmıştır.
- Uniform kanat yerleşim düzenine sahip Model 1 ve Model 4’de kanatlar arası açılar farklı olsada aynı şarj süreleri elde edilmiştir. Bu durum uniform kanat dağılımı için kanatlar arası açının şarj süresini etkilemediğini ortaya koymuştur.
- Kanat dağılımının üst bölgede yoğunlaşacak şekilde gerçekleştirilmesi ise FDM haznesinin alt bölgesindeki FDM’nin daha geç erimesine ve doğal konveksiyonun yalnızca haznenin üst bölgesinde etkili olmasına neden olmuştur. Böylece en yüksek şarj süresi Model 3 ile elde edilmiştir.

Sayısal analiz sonuçları kanat yerleşim düzeninin şarj süresinin değişiminde önemli rol oynadığını göstermiş ve uniform olmayan kanat dağılımı ile daha düşük şarj süreleri elde edilmiştir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda düzensiz kanat dağılımı ve kanatlar arası açılar için optimizasyon çalışması yapılarak şarj süresinin daha da düşürülmesi mümkün olabilir.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Fonlama Bilgileri: Bu çalışma herhangi bir fonla desteklenmemiştir.

Yazar katkısı: Yazarlar, çalışmanın tasarlanması, verilerin toplanması, sonuçların analizi ve yorumlanması ve

makalenin hazırlanması ile ilgili sorumluluklarını onaylamaktadır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışma sırasında üretilen ve/veya analiz edilen veriler kamuya açık değildir; ancak veriler makul bir talep üzerine ilgili yazar tarafından sağlanabilir.

Kaynaklar

- [1] Chebli, F., and Mechighel, F. (2025) *Phase change materials: classification, use, phase transitions, and heat transfer enhancement techniques: a comprehensive review*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-59.
- [2] Wu, S., Yan, T., Kuai, Z., and Pan, W. (2020) *Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review*, Energy Storage Materials, 25: 251-295.
- [3] Choure, B. K., Alam, T., and Kumar, R. (2023) *A review on heat transfer enhancement techniques for PCM based thermal energy storage system*, Journal of Energy Storage, 72, 108161.
- [4] Abdulateef, A. M., Mat, S., Sopian, K., Abdulateef, J., and Gitan, A. A. (2017) *Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins*, Solar Energy, 155: 142-153.
- [5] Sarani, I., Payan, S., Nada, S. A., and Payan, A. (2020) *Numerical investigation of an innovative discontinuous distribution of fins for solidification rate enhancement in PCM with and without nanoparticles*, Applied Thermal Engineering, 176: 115017.
- [6] Mahdi, J. M., Lohrasbi, S., Ganji, D. D., and Nsofor, E. C. (2018) *Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 124: 663-676.
- [7] Hajizadeh, M. R., Keshteli, A. N., and Bach, Q. V. (2020) *Solidification of PCM within a tank with longitudinal-Y shape fins and CuO nanoparticle*, Journal of Molecular Liquids, 317: 114188.
- [8] Patel, J. R., Rathod, M. K., and Sheremet, M. (2022) *Heat transfer augmentation of triplex type latent heat thermal energy storage using combined eccentricity and longitudinal fin*, Journal of Energy Storage, 50: 104167.
- [9] Rozenfeld, A., Kozak, Y., Rozenfeld, T., and Ziskind, G. (2017) *Experimental demonstration, modeling and analysis of a novel latent-heat thermal energy storage unit with a helical fin*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 110: 692-709.
- [10] Anish, R., Joybari, M. M., Seddegh, S., Mariappan, V., Haghighat, F., and Yuan, Y. (2021) *Sensitivity analysis of design parameters for erythritol melting in a horizontal shell and multi-finned tube system: Numerical investigation*, Renewable Energy, 163: 423-436.
- [11] Huang, Y., Song, L., Wu, S., and Liu, X. (2022) *Investigation on the thermal performance of a multi-tube finned latent heat thermal storage pool*, Applied Thermal Engineering, 200: 117658.
- [12] Tao, Y. B., and He, Y. L. (2015) *Effects of natural convection on latent heat storage performance of salt in a horizontal concentric tube*. Applied Energy, 143, 38-46.
- [13] Mahdi, M. S., Mahood, H. B., Mahdi, J. M., Khadom, A. A., and Campbell, A. N. (2020) *Improved PCM melting in a thermal energy storage system of double-pipe helical-coil tube*, Energy Conversion and Management, 203: 112238.
- [14] Alnakeeb, M. A., Salam, M. A. A., and Hassab, M. A. (2021) *Eccentricity optimization of an inner flat-tube double-pipe latent-heat thermal energy storage unit*, Case Studies in Thermal Engineering, 25: 100969.
- [15] Kadivar, M. R., Moghimi, M. A., Sapin, P., and Markides, C. N. (2019) *Annulus eccentricity optimisation of a phase-change material (PCM) horizontal double-pipe thermal energy store*, Journal of Energy Storage, 26: 101030.
- [16] Yan, P., Fan, W., Yang, Y., Ding, H., Arshad, A., and Wen, C. (2022) *Performance enhancement of phase change materials in triplex-tube latent heat energy storage system using novel fin configurations*, Applied Energy, 327: 120064.
- [17] Yang, X. H., Tan, S. C., and Liu, J. (2016) *Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 100: 899-907.
- [18] Seddegh, S., Wang, X., and Henderson, A. D. (2015) *Numerical investigation of heat transfer mechanism in a vertical shell and tube latent heat energy storage system*, Applied thermal engineering, 87: 698-706.
- [19] Dittus, F. W., and Boelter, L. M. K. (1985) *Heat transfer in automobile radiators of the tubular type*, International communications in heat and mass transfer, 12(1): 3-22.
- [20] Darzi, A. R., Farhadi, M., and Sedighi, K. (2012) *Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus*, Applied Mathematical Modelling, 36(9): 4080-4086.
- [21] Nie, C., Chen, Z., Li, H., Liu, X., Liu, J., and Rao, Z. (2025) *Petal-shaped fin configurations for enhancing phase change material solidification in a horizontal shell and tube thermal energy storage unit*, Journal of Energy Storage, 113: 115685.
- [22] Tang, S., Song, Y., Liu, P., Wu, X., Xu, Y., Zhou, J., and Li, X. (2025) *Design and optimization of a vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage system via discontinuous fins*, Renewable Energy, 122568.
- [23] Luo, J. W., Yaji, K., Chen, L., and Tao, W. Q. (2025) *Data-driven multi-fidelity topology design of fin structures for latent heat thermal energy storage*, Applied Energy, 377: 124596.
- [24] Fang, Z., and Zhao, C. (2025) *Thermal performance analysis of novel bionic fins in a concentric three-tube latent heat storage system*, Renewable Energy, 122607.
- [25] Wang, C., Yao, S., Chen, X., and Yan, X. (2025) *Thermal performance analysis of new bionic "fishbone" fins in a triplex-tube latent heat storage system with single cycle process*, Applied Thermal Engineering, 259: 124902.



Araştırma Makalesi / Research Article

İSG dersinin mühendislik fakültesi öğrencilerinin İSG farkındalığı üzerindeki etkisi: Devlet üniversitesi örneği

The impact of OHS course on engineering faculty students' OHS awareness: A case study of a public university

Özge Akboğa Kale^{1*}, Sude Kayahan¹, Selin Baş¹, Arda Kuruca¹, Doğukan Kahraman¹, Serhad Çakır¹

¹ İzmir Demokrasi University, Department of Civil Engineering, İzmir, Turkey

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: ozge.akbogakale@idu.edu.tr

Makale Bilgileri / Article Info	Öz
Anahtar Kelimeler <i>İş sağlığı ve güvenliği</i> <i>İş sağlığı ve güvenliği eğitimi</i> <i>İş sağlığı ve güvenliği farkındalık düzeyi</i> <i>İş güvenliği kültürü</i> <i>Mann-Whitney-U testi</i> Keywords <i>Occupational health and safety</i> <i>Occupational health and safety training</i> <i>Occupational health and safety awareness level</i> <i>Safety culture</i> <i>Mann-Whitney U Test</i> Makale tarihçesi / Article history <i>Geliş / Received:</i> 12.03.2025 <i>Düzeltilme / Revised:</i> 14.04.2025 <i>Kabul / Accepted:</i> 05.05.2025	İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında, saha güvenliğinin iyileştirilmesi ve iş güvenliği kültürünün geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda çalışma, İSG derslerinin mühendislik fakültesi öğrencilerinin iş güvenliği farkındalık düzeylerine etkisini incelemektedir. Üniversitelerin mühendislik fakültelerinde zorunlu İSG dersleri verilmekte olup, bu dersler öğrencilere potansiyel tehlikeleri anlama, iş güvenliği bilinci kazanma ve yasal gerekliliklere uyum sağlama becerisi kazandırmaktadır. Araştırma kapsamında, İzmir Demokrasi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde öğrenim gören 221 öğrenciye anket uygulanmış ve veriler SPSS yazılımı ile analiz edilmiştir. Çalışmada, cinsiyet, yaş, sınıf seviyesi ve not ortalaması gibi değişkenlerin iş güvenliği farkındalık düzeyi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma bulguları, İSG eğitimi almış öğrencilerin iş güvenliği farkındalık düzeylerinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Mann-Whitney U testi sonuçları, İSG eğitimi alan ve almayan öğrenciler arasında anlamlı farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, katılımcılar Türkiye'de iş güvenliği kültürünün yeterince gelişmediğini ve işverenlerin bu alana gereken önemi vermediğini ifade etmiştir. Sonuç olarak, İSG eğitiminin öğrenciler üzerindeki olumlu etkisi belirgin olup, iş güvenliği farkındalığının artırılması için eğitim müfredatının güçlendirilmesi gerekmektedir. İş güvenliği bilincinin yaygınlaştırılması ve bu tür eğitimlerin erken yaşlarda başlaması, iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesine katkı sağlayacaktır. Abstract Within the scope of the Occupational Health and Safety (OHS) Law, improving field safety and fostering a safety culture are key objectives. Accordingly, mandatory OHS courses are offered in engineering faculties to help students identify hazards, understand legal requirements, and develop safety awareness. This study investigates the impact of OHS courses on the safety awareness of students at İzmir Demokrasi University Faculty of Engineering. A survey was conducted with 221 students, and the data was analyzed using SPSS. Variables such as gender, age, class level, and GPA were examined for their effects on safety awareness. Findings show that students who received OHS training had significantly higher awareness levels. The Mann-Whitney U test revealed meaningful differences between trained and untrained groups. Despite the positive impact of OHS education, participants emphasized that safety culture in Turkey remains underdeveloped and that employers often neglect its importance. The study concludes that OHS education enhances awareness among engineering students and suggests integrating such training more effectively into the curriculum. Promoting safety consciousness from an early age could help prevent occupational diseases and work-related accidents in the long term.

1. Giriş

İş sağlığı ve güvenliği, işyerinde işin yürütülmesi sırasında ya da iş saatleri içerisinde çeşitli nedenlerden kaynaklanan sağlığa zarar verecek koşullardan korunmak ve mevcut sağlık ve güvenlik şartlarının iyileştirilmesi için yapılan sistemli ve bilimsel çalışmaların adıdır [1]. İş sağlığı ve güvenliği adındaki, sağlık ve güvenlik kelimelerinin tanımı Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından şöyle yapılmıştır; sağlık, fiziksel ve ruhsal açıdan tam bir iyilik halidir. Daha net bir şekilde açıklamak gerekirse sağlık, bireyin sadece fiziksel bir zarar değil ruhsal ve sosyal yönden de tam bir iyilik halinin sağlanmasıdır. Güvenlik kavramı ölüm, meslek hastalığı, ekipman kaybı, yaralanma ve çevre tahribatına neden olabilecek risklerin en aza indirdiği durumlar olarak ifade edilir [2].

Genel olarak Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği değerlendirilecek olursa, henüz iş güvenliği kültürünün sektörlerdeki bütün paydaşlar tarafından içselleştirildiğini söylemek güçtür [3]. Koruyucu ve önleyici hizmetlerin ve donanımın eksikliği, işçinin mesai saatleri kapsamında yeterli bir güvenlik eğitiminin sağlanmaması, işçinin güvenlik kültürünün yetersizliği, işi kaybetme endişesinin işçiye tedbirsiz davranmaya sürüklemesi gibi sebepler iş kazaların yaşanmasına neden olmaktadır [4]. Sosyal Güvenlik Kurumu'nun, istatistik yıllıklarından elde edilen kaza sıklık bilgileri incelendiğinde, gerçek değer yıllara göre değişkenlik gösterse de, her yıl yaklaşık 1400 kişinin iş kazası sebebiyle hayatını kaybettiğini söylemek mümkündür [5]. Yaşanan can kayıplarının yanında iş sağlığı ve güvenliği uygulamalarını ihmal etmenin ekonomik maliyetleri söz konusudur. Söz konusu ihmaller ülkelerin istediği sürdürülebilir ekonomik ve sosyal gelişmenin sağlanmasına zarar vermektedir. Oysa, İSG sağlıklı ve güvenilebilir bir ortam oluşturmak, çalışanları çalışma ortamından kaynaklanan sağlık ve güvenlik riskine karşı korumak, üretimin devamlılığını sağlamak ve verimliliği artırmak için büyük önem taşır [7].

2012 yılında yürürlüğe giren ilk münferit iş güvenliği kanunundan sonra konu ile ilgili gelişmeler gözlenmiştir [7]. Yine de Türkiye, iş kazalarına bağlı can kayıplarında Avrupa ülkeleri arasında ne yazık ki ilk sırada yer almaktadır [8]. Eurostat ve Sosyal Güvenlik Kurumu'nun verilerine göre, bu durum ülkemizin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanında ciddi sorunlarla karşı karşıya olduğunu göstermektedir. Euronews'un 2018 yılı raporuna göre, Türkiye'de iş kazalarından kaynaklanan ölüm sayısı 1500'ü aşarken, bu sayı Avrupa'nın önde gelen ülkelerinde daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Fransa'da bu rakam 600'ün, İtalya'da 500'ün, Almanya'da ise 390'ın üzerindedir. Bu tablo, Türkiye'deki İSG uygulamalarında sistematik iyileştirmelere ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. İş kazalarının yalnızca bireysel düzeyde değil, toplumsal ve ekonomik açıdan da geniş çaplı olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu kazalar, çalışanların ve ailelerinin yaşadığı trajedilerin ötesinde, işletmeler, devlet ve genel ekonomi üzerinde ağır maliyetler yaratmaktadır. Erken emeklilik, nitelikli iş gücü kaybı, devamsızlık oranlarının artışı, çalışanların düşük verimlilikle çalışması, yüksek sağlık giderleri ve sigorta primleri bu olumsuz etkilerden sadece birkaçıdır. Türkiye'nin İSG konusunda gelişmiş ülkeler seviyesine ulaşabilmesi için, mevcut iş koşullarını ve dinamiklerini göz önünde bulundurarak kendine özgü stratejiler geliştirmesi hayati önem taşımaktadır.

Bütün bu kayıplarla karşılaşmamak ve en önemlisi can güvenliğini sağlamak için iş sağlığı ve güvenliği alanında

önemli adımlar atılmakta ve çalışmalar sürmektedir. Anayasanın ikinci maddesinde yer alan sosyal devlet ilkesi, kişilerin sağlıklı ve güvenli bir iş ortamında çalışmasını da öngörür. Devletin bu konuda anayasal kurallar ve diğer alt hukuk kurallarını geliştirmesi iş sağlığı ve güvenliği konusundaki mücadelelerinden birisidir. Bunun yanında iş kazalarının azalması için istatistikler doğrultusunda ülkelerin kültür seviyesinin artması ve bunun olması içinde beyaz ve mavi yaka fark etmeksizin herkesin İSG eğitime tabi tutulması oldukça önemlidir [9,10]. Ayrıca kayıpların önüne geçilmesi için yapılması gerekenlerin başında, iş sağlığı ve güvenliği konusunda toplumsal bilinçlenmenin sağlanması ve iş güvenliği kültürünün geliştirilmesi gelmektedir [11].

Kültür, insan topluluklarının kendilerine özgü yapılarını yansıtan ve oluşturulup aktarılan sembollerle ifade edilen düşünce, duygu ve davranış kalıplarıdır. İş sağlığı ve güvenliği ise, çalışma ortamında çalışanların sağlığını tehdit edebilecek risklere karşı koruma sağlamak, bu riskleri ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla işverene önemli sorumluluklar yükleyen bir kurallar bütünüdür. İş güvenliği kültürü, iş sağlığı ve güvenliğinin öncelikli hedef olarak kabul edildiği bir yaşam tarzı olarak tanımlanabilir. Güvenlik, bilgi temeline dayanır ve bu bilginin bireyler tarafından bir yaşam alışkanlığına dönüştürülmesi gerekir [12]. Güvenlik kültürünün benimsenmediği iş yerlerinde ise kazalar kaçınılmaz hale gelir. Bir kurumun güvenlik kültürü, çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusundaki olaylara yaklaşımını ve sergilediği davranışları belirgin şekilde yansıtır. Bu bağlamda, eğitim süreçleri güvenlik bilincinin oluşmasında kritik bir faktördür.

İş güvenliği eğitimi, iş güvenliği kültürünün oluşturulmasında ve sürdürülmesinde kilit bir rol oynar. Bu eğitimler, çalışanlara işyerindeki riskleri ve tehlikeleri tanıma, önleme ve nasıl tepki vermeleri gerektiği konusunda bilgi verir. Böylece çalışanlar, güvenlik bilincini artırır, risklere karşı daha dikkatli davranır ve işbirliğini teşvik eder. İşverenlerin bu eğitimlere yatırım yapmaları, işyerinde güvenliği ve sağlığı önemseyen bir kültürün oluşturulmasına katkıda bulunur. Aynı zamanda iş kazalarını azaltır, işyeri imajını iyileştirir ve uzun vadeli güvenlik değişikliklerini teşvik eder. Bu nedenle iş güvenliği eğitimi, iş yerlerinde sadece çalışanların sağlığı ve güvenliği için değil, aynı zamanda işverenlerin ve işyerlerinin başarısı ve sürdürülebilirliği için de kritik bir öneme sahiptir. İş sağlığı ve güvenliği eğitimi, işyerlerinde çalışanların ve işverenlerin sağlığını ve güvenliğini korumak için hayati bir öneme sahiptir [13]. Ayrıca, yasal gereksinimlere uyum sağlama, iş verimliliğini artırma, işyeri imajını geliştirme ve maliyetleri azaltma gibi avantajlar sunar. Çalışan memnuniyetini artırır, çevresel etkileri azaltır ve işyerlerini daha güvenli bir ortam haline getirir. İş sağlığı ve güvenliği eğitimi, hem işverenlerin hem de çalışanların uzun vadeli başarısı ve refahı için vazgeçilmez bir unsurdur [14]. Nitekim bu sebeple birçok araştırmacı farklı sektörlerdeki çalışanları örneklemine alarak iş sağlığı ve güvenliği eğitimi ile güvenlik kültürü kavramlarını araştırmıştır [15-20].

Bu açıdan bakıldığında üniversite öğrencilerine benimsetilmiş olan kültür, üniversitelerin güvenli açıdan işleyişine yol açmakla birlikte mezun olan öğrencilerin çalışmış olduğu kurumlardaki öğrenilmiş davranışlarını pozitif yönde etkileyecektir ki çalışma hayatı da bu konuda daha olumlu bir seviyeye kavuşacaktır [21]. Bu durumda da üniversitelere önemli sorumluluklar düşmektedir. Üniversitelerde iş güvenliği dersleri, öğrencilere iş

yaşamlarında karşılaşılabilecekleri potansiyel tehlikeleri ve riskleri anlama, iş sağlığı ve güvenliği konularında bilinç kazanma ve yasal gereksinimlere uyum sağlama konularında temel bilgi ve beceriler sunar [21]. Bu dersler, öğrencilere iş dünyasında daha bilinçli ve güvenli bir yaklaşım geliştirmelerini sağlar, işverenler için değerli bir varlık olmalarını teşvik eder ve işyerlerinde iş kazalarını önleme açısından önemli bir rol oynar. Ayrıca, iş güvenliği eğitimi alan mezunlar, işverenler için çevre dostu uygulamaları teşvik edebilir, iş verimliliğini artırabilir ve çeşitli sektörlerde iş bulma fırsatlarına sahip olabilirler [18]. Bu nedenle iş güvenliği derslerinin üniversite eğitiminde yer alması, öğrencilerin hem kendilerini hem de toplumu daha güvende tutmalarına yardımcı olur. Bunun yanında iş sağlığı ve güvenliği derslerinin iş güvenliği kültürünün geliştirilmesine olan katkısını somutlaştırmak oldukça önemlidir. Yapılacak çalışmanın bu anlamda literatüre katkı sağlayacağı ve eğitimin önemine vurgu yapacağı beklenmektedir.

Mühendislik öğrencileri sahada mavi yakayı ekip arkadaşı olarak benimsemektedir. Ekip arkadaşlarını önemsekte ve daha hassas, farkındalığı yüksek bir biçimde güvenliklerini sağlamaya çalışmaktadır. Dolayısıyla iş sağlığı ve güvenliği açısından süreci iyileştirmeye katkı sağlar. Sonuç olarak, İSG kültürü, bir organizasyonda en üst düzey yöneticilerden başlayarak tüm çalışanlara kadar olan katmanlarda güçlü bir şekilde benimsenirse en etkili olur. Geleceğin mühendislerinin, iş güvenliği konularına inanmaları ve bu konuda bir duyarlılık geliştirmeleri, çalışanlar arasında İSG kültürünün yayılmasına önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

Mühendisler, genellikle iş süreçlerinin tasarımı, uygulanması ve güvenliğin sağlanması konularında önemli bir rol oynarlar. Eğer mühendislik profesyonelleri İSG ilkelerini benimser ve bu ilkeleri iş süreçlerine entegre ederlerse, bu yaklaşım diğer çalışanlara örnek teşkil eder ve güvenlik kültürünün oluşturulmasına liderlik eder. Mühendislerin İSG konularına olan inancı, aynı zamanda çalışanların güvenlik bilincini artırabilir. Mühendislerin güvenliği bir öncelik olarak görmesi ve bu konuda çaba göstermesi, çalışanlara günlük işlerinde daha dikkatli ve bilinçli olma konusunda ilham verebilir.

İSG kültürünün başarılı bir şekilde yerleşmesi için, yönetim kademesinden tüm çalışanlara kadar olan her seviyede bir katılım ve inanç gereklidir. Mühendislerin bu konuda liderlik yapması ve bu değerleri benimsemesi, iş güvenliği kültürünün geniş kapsamlı bir şekilde benimsenmesine yardımcı olabilir. Yapılacak çalışmanın bu anlamda literatüre katkı sağlayacağı ve eğitimin ve işbirliğinin önemine vurgu yapacağı beklenmektedir.

Yapılan çalışmada, mühendislik fakültelerinde lisans düzeyinde verilen İSG derslerinin öğrencilerin iş güvenliği farkındalığını artırmadaki etkisini analiz etmeyi amaçlamakta ve İSG eğitiminin daha verimli hale getirilmesi için öneriler sunmaktadır. Uygulanan anket çalışması kapsamında elde edilen bulgular Mann Whitney-U testi yöntemiyle analiz edilerek iş sağlığı ve güvenliği dersinin öğrencilerin iş güvenliği kültürünü geliştirmedeki rolünün somut bir şekilde ortaya koyulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda; öğrencilerin bilgi düzeyini ölçecek anket hazırlanmış, uygulanan anket formları kategorilere dönüştürülerek SPSS'e aktarılmış, uygulanan anket formlarına tanımlayıcı sıklık analizleri yapılmış, veri setinde farklı grupların karşılaştırılmasının yapılması için Mann Whitney U Testi uygulanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Yapılan çalışmada, mühendislik fakültesi lisans öğrencilerinin, özellikle iş sağlığı ve güvenliği dersi almadan önce ve sonraki bilgi düzeylerinin ölçülerek, iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin iş güvenliği kültürünü geliştirmedeki rolünün belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda ilk olarak anket çalışması geliştirilmiştir. Çalışmada uygulaması yapılan anket 4 bölüm olarak oluşturulmuştur. Birinci bölümde demografik bilgiler, ikinci bölümde iş sağlığı ve güvenliği eğitimi farkındalık tespitine yönelik sorular, üçüncü bölümde çalışma hayatında iş sağlığı ve güvenliği farkındalık tespitine yönelik sorular ve son olarak dördüncü bölümde iş sağlığı ve güvenliği genel değerlendirmesine yönelik sorular yer almıştır. Ölçekte kullanılan ifadeler Likert ölçeğine göre “kesinlikle katılmıyorum, katılmıyorum, kararsızım, katılıyorum ve kesinlikle katılıyorum” olarak ölçeklendirilmiştir. Uygulaması, kodlaması ve ölçmesinin kolay olması, farklı sayıda seçenek kullanımına izin vermesi, seçeneklerin etiketlenmesinde araştırmacılara serbestlik tanınması ve katılımcılar için kolay anlaşılır olması [22-23], tutum ve görüş araştırmalarında Likert-tipi soruların sıklıkla kullanılmasını sağlamıştır. Çalışmada Eraslan'ın [24] “Üniversite Öğrencilerinin Sosyal Güvenlik Algıları” isimli çalışmasındaki ölçek geliştirilmiştir. Anket çalışması kapsamındaki sorular geliştirildikten sonra, beş iş güvenliği uzmanı tarafından uzman görüşü alınarak değerlendirilmiş sonrasında pilot çalışma ile soruların anlaşılabilirliği 20 lisans öğrencisinin görüşü alınarak teğit edilmiştir, sorular netleştirildikten sonra uygulama öncesi etik kurul uygunluk belgesi alınmıştır.

Çalışmanın örneklemini İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Biyomedikal Mühendisliği ve Endüstri Mühendisliği Bölümleri Lisans öğrencileri oluşturmuştur. Örneklem kapsamında anket uygulanacak öğrenciler 1. ve 4. sınıf öğrencileri olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi 1. sınıf öğrencilerinin henüz zorunlu iş sağlığı ve güvenliği dersi almamış olması, 4. sınıf öğrencilerinin ise İş Sağlığı ve Güvenliği 1 - İş Sağlığı ve Güvenliği 2 olmak üzere 2 ders almış olup staj uygulamalarında saha deneyimi elde etmiş olmalarıdır. 5 lisans programının 1. ve 4. sınıf öğrencileri olmak üzere toplam 221 katılımcıya anket soruları yöneltilmiştir. Katılımcıların %58,8'i zorunlu İSG dersi almış, %41,2'si ise bu dersi almamıştır. Örneklem %66,1'i erkek, %33,9'u kadın öğrencilerden oluşurken; yaş dağılımı ağırlıklı olarak 20-23 yaş aralığında yoğunlaşmaktadır. Bu dağılım, İSG eğitiminin etkilerini demografik değişkenler bağlamında değerlendirmeye olanak sağlamaktadır. Anket uygulaması her bir katılımcıyla yaklaşık 15 dakika olmak üzere yüz yüze gerçekleştirilmiştir.

Anket uygulamasından elde edilen veriler IBM SPSS Statistics 25.0 Programı kullanılarak analiz edilmiştir. Öncelikle katılımcıların anket formlarına verdikleri yorumun güvenilirliğini ölçmek için SPSS yazılımı aracılığıyla Cronbach's Alpha testi uygulanmıştır. Güvenilirlik bir test veya ölçeğin ölçmek istediğini tutarlı ve istikrarlı bir şekilde ölçebileceğine derecesini gösterir. Ölçek veya test ne kadar güvenli olursa, elde edilen sonuçlar da o derece güvenli olacaktır [25]. Çalışmada güvenilirlik Cronbach's Alpha katsayısı ile ölçülmüştür. Alpha katsayısının alacağı değerlerin karşılığı aşağıdaki gibidir [26];

- 0-0.4 arası güvenilir değil,
- 0.4-0.6 arasında ise düşük güvenilirlik,
- 0.6-0.8 arasında ise oldukça güvenilir,
- 0.8-1.0 arasında ise çok güvenilir.

Güven testi sonrasında en temel istatistik yöntemlerinden biri olan ve oluşturulan değişken kategorileri arasındaki dağılımı tespit eden tek değişkenli sıklık analizi çalışma kapsamında uygulanan ilk analizdir. Bu analizin önemli kullanım sebeplerinden biri veri tabanının anlaşılmasına ve ileri analiz tekniklerinin kullanılmasına yardımcı olmaktır [27]. Çalışmada her veri kategorisinin sıklık analizleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar sıklık tabloları ile gösterilmiştir.

Parametrik test varsayımları yerine getirilmeden, iki ortalama arasındaki farkın önemlilik testinin uygulanması varılan kararın hatalı olmasına neden olabilir. İkinci aşamada iki grup arasındaki farkın kıyaslanmasında kullanılacak Mann-Whitney U testinin uygulanabilirliğini sınamak için normallik testi uygulanmıştır. Verilerin normal dağılıma uygun olup olmadığını ortaya koymak amacıyla çeşitli normallik testlerinden yararlanmak mümkündür. Bu testler arasında en bilinenleri Ki-Kare, Kolmogorow-Smirnov, Lilliefors ve Shapiro – Wilk normallik testleridir. Söz konusu testlerde hipotezi ile verilerin normal dağılımlı bir anakütleden geldiği ifade edilirken, hipotezi ile anakütlenin dağılımının normale uymadığı ileri

sürülmektedir. Normallik Testi tablosunda sig değeri 0,05'den küçükse veri normal dağılmıyordu.

Veri dağılımı normallik testleriyle incelenmiş ve $p < 0.05$ bulunduğu için parametrik testler yerine iş güvenliği dersini alan ve almayan gruplar arasındaki farklılığı ortaya koyabilmek için Mann-Whitney U testi uygulanmıştır. Mann-Whitney U testi, bağımsız iki grubun karşılaştırılması için kullanılan parametrik olmayan bir testtir [28]. Parametrik test varsayımları yerine gelmediğinde kullanılacak en güçlü test: Mann-Whitney U testidir [29]. Veri setinin normal dağılmadığı görüldüğü için non-parametrik bir yöntem olan Mann-Whitney U testi tercih edilmiştir

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Sıklık Analizi

Anket çalışması kapsamında birinci bölümde katılımcı profilini tanımlamak amacıyla demografik bilgiler sorgulanmıştır. Elde edilen bulgular katılımcıların %33,9'unun kadın %66,1'inin erkek olduğunu göstermiştir. Katılımcıların büyük kısmı 20-21 (%32,1), 22-23(%36,7) yaş aralığındadır. Çoğunluğu 1. ve 4. Sınıf öğrencisi olan katılımcıların neredeyse yarısının (%46,9) genel not ortalaması 2.50-3.00 aralığındadır. Katılımcıların %58,8'i zorunlu iş sağlığı ve güvenliği dersi almış olup, %37,1'i daha önce iş sağlığı ve güvenliği konusunda bilgilendirme toplantısına katıldığını belirtmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Katılımcıların demografik bilgileri

Değişken	Kategori	Sıklık	Yüzde (%)
1- Cinsiyetiniz	Kadın	78	33,9
	Erkek	146	66,1
2- Yaşınız	18-19	54	24,4
	20-21	71	32,1
	22-23	71	36,7
	24-25	9	4,1
	26 ve üzeri	6	2,7
3- Sınıfınız	1	92	41,6
	2	1	0,5
	3	22	10,0
	4	106	48,0
4- Genel not ortalamanız	2.00 ve altı	4	1,8
	2.00-2.50	45	20,4
	2.50-3.00	60	27,1
	3.00-3.50	18	8,1
	3.50 ve üzeri	1	0,5
5- Bölümünüz	İnşaat Mühendisliği	40	18,1
	Makine Mühendisliği	33	14,9
	Biyomedikal Mühendisliği	15	6,8
	Endüstri Mühendisliği	50	22,6
	Elektrik Elektronik Mühendisliği	83	37,6
6- Zorunlu İSG dersi aldınız mı?	Evet	130	58,8
	Hayır	91	41,2
7- Daha önce İSG konusunda bilgilendirme toplantılarına (Seminer, Konferans, Kurs, Panel, Sempozyum vs.) katıldınız mı?	Evet	82	37,1
	Hayır	138	62,4

Anketin ikinci bölümünde katılımcıların iş sağlığı ve güvenliği eğitimi farkındalık tespitine yönelik sorular yöneltilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. İş sağlığı ve güvenliği eğitimi farkındalık tespitine yönelik sorular

1 – Kesinlikle Katılmıyorum					
2 – Katılmıyorum					
3 – Kararsızım	1	2	3	4	5
4 – Katılıyorum					
5 – kesinlikle Katılıyorum					
8- Üniversitelerde iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin zorunlu ders olması gerektiğini düşünüyorum	15	13	21	46	126
9- Derslerimizde iş sağlığı ve güvenliği konularına yeterli derecede yer verildiğini düşünüyorum	17	23	63	62	56
10- Ülkemizde iş sağlığı ve güvenliği kültürünü yerleştirmek için öğretimin her kademesinde iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin olması gerektiğini düşünüyorum	7	7	21	51	135
11- Ülkemizde iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerine yeterli önemin verildiğini düşünüyorum.	46	83	59	22	11
12- Ülkemizde çalışanları bilinçlendirmek adına yeterli iş sağlığı ve güvenliği eğitimi verildiğini düşünüyorum.	55	72	61	20	13
13- Okulda aldığım/alacağım iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin çalışma hayatımda bana katkı sağlayacağını düşünüyorum	7	9	43	76	86
14- Eğitimim süresince risk analizi ve acil durum eylem planı uygulama eğitimi almam gerektiğini düşünüyorum	2	7	28	81	103
15- Okul eğitimim sürecinde yangın ve ilk yardım eğitimi almam gerektiğini düşünüyorum	9	7	31	66	108
16- Ülkemizde yeterli düzeyde iş sağlığı ve güvenliği alanında yetişmiş akademisyen olduğunu ve bilimsel yayın yapıldığını düşünüyorum	27	44	107	21	19
17- Sadece teorik dersler değil iş hayatına uygun pratik derslerinde programda yer alması gerektiğini düşünüyorum.	6	5	20	55	135
18- İSG eğitimlerinin iş kazaları ve meslek hastalıklarının sıklığının azaltılmasında etkili olduğunu düşünüyorum	6	9	27	62	117

Üçüncü bölümde çalışma hayatında iş sağlığı ve güvenliği farkındalık tespitine yönelik sorular yöneltilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. Çalışma hayatında iş sağlığı ve güvenliği farkındalık tespitine yönelik sorular

1 – Kesinlikle Katılmıyorum					
2 – Katılmıyorum					
3 – Kararsızım	1	2	3	4	5
4 – Katılıyorum					
5 – kesinlikle Katılıyorum					
19- 6331 Sayılı iş sağlığı ve güvenliği kanunun getirdiği yasal düzenlemeleri biliyorum.	67	54	50	31	19
20- İş sağlığı ve güvenliği işaretlerinin (uyarı levhaları) anlamlarını biliyorum	15	19	57	85	45
21- Çalışma hayatına başladığımda karşılaşılabileceğim iş kazaları ile ilgili iş sağlığı ve güvenliği kanunundan doğan yasal hak ve sorumluluklarımı biliyorum	20	34	64	74	29
22- Çalışma hayatında karşılaşılabileceğim fiziksel, kimyasal, psikososyal ve biyolojik risk etmenlerini ve korunma yöntemlerini biliyorum	16	33	64	76	32
23- Mesleğime yönelik kullanılması gereken kişisel koruyucu donanımları kullanmayı biliyorum	16	28	60	61	56
24- Çalışma hayatında iş kazası yaşayabileceğimi düşünüyorum	39	49	75	38	20
25- İş Sağlığı ve Güvenliği kurallarına uyulması halinde işin verimliliği ve kalitesinin artacağını düşünüyorum	5	4	18	68	126
26- Çalışma hayatına geçtiğimde kendi mesleğime dönük iş güvenliği ile ilgili yapmam gerekenleri biliyorum	12	22	52	77	58
27- İSG konusunda aldığım eğitimi çalışma hayatımda uygulayacağımı düşünüyorum	6	10	34	84	87
28- İSG'nin ortaöğretim ve lise müfredatında yer alması gerektiğini düşünüyorum	10	21	37	62	91
29- İSG eğitimlerinin meslek hastalıklarının önlenmesinde etkili olduğunu düşünüyorum	5	7	37	70	102
30- İSG eğitimlerinin iş kazalarının önlenmesinde etkili olduğunu düşünüyorum	6	10	23	66	116
31- Teçhizat, makine ve malzemenin doğru ve güvenli kullanıma yöntemlerini öğrenmek ve uygulamak için İSG eğitiminin önemli olduğunu düşünüyorum	6	3	22	67	123

Anketin son bölümünde ise iş sağlığı ve güvenliği genel değerlendirmesine ilişkin sorular yönetilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. İş sağlığı ve güvenliği genel değerlendirme

1 – Kesinlikle Katılmıyorum					
2 – Katılmıyorum					
3 – Kararsızım	1	2	3	4	5
4 – Katılıyorum					
5 – kesinlikle Katılıyorum					
32- Ülkemizde medyanın ve basın yayın organlarının iş sağlığı ve güvenliğine yeterli önemi verdiğini düşünüyorum	56	66	72	16	11
33- Ülkemizde yaşanan iş kazalarının can kayıpları dışında ülke ekonomisine de büyük zararlar verdiğini düşünüyorum	90	76	38	9	8
34- Ülkemizde iş verenlerin iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerine ve korunma önlemlerine yeterli önemi verdiğini düşünüyorum	68	62	61	17	13
35- Ülkemizde iş güvenliği kültürünün tüm çalışma alanlarında var olduğunu düşünüyorum	62	61	45	32	21
36- Ülkemizde iş güvenliği tedbirlerinin tüm çalışma alanlarında yeterince uygulandığını düşünüyorum	68	66	49	27	11
37- Ülkemizde iş güvenliği ihlallerine dönük yaptırımların etkili olduğunu düşünüyorum.	63	42	71	35	10
38- Türkiye’de İSG kültürünün oluştuğunu düşünüyorum.	61	59	72	18	11
39- İş sağlığı ve güvenliğine gösterilen dikkatin iş verimini arttıracaklarını düşünüyorum	6	5	30	71	109
40- İş sağlığı ve güvenliğine gösterilen dikkatin iş kalitesini arttıracaklarını düşünüyorum	6	5	23	68	119

3.2. Güvenilirlik Testi

Çalışmada öncelikle katılımcıların anket formlarına verdikleri yorumun güvenilirliğini ölçmek için SPSS yazılımı aracılığıyla Cronbach’s Alpha testi uygulanmıştır. Anket forumunun 2, 3. ve 4. bölümü için ayrı ayrı uygulanan Cronbach’s Alpha değerleri sırasıyla 0.805, 0.875, 0.784 olarak elde edilmiştir. Bulguların bölüm 2 ve bölüm 3 için çok güvenilir, bölüm 4 için oldukça güvenilir olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).

3.3. Normallik Testi

Güven testi sonrasında anket uygulaması sonucu elde edilen veri setine normallik testi uygulanmıştır. Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8’de görüldüğü üzere her üç bölümde de sig değeri 0,05’den küçük olup veri setinin normal dağılmadığı kanıtlanmıştır.

Tablo 5. Güven testi sonuçları

Bölüm	Cronbach’s Alpha	N of Items
II (Soru 8-18)	0,805	11
III (Soru 19-31)	0,862	13
IV (Soru 32-40)	0,757	9

Tablo 6. Bölüm 2 normallik testi sonuçları

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SORU 8	,326	221	,000	,712	221	,000
SORU 9	,187	221	,000	,888	221	,000
SORU 10	,351	221	,000	,680	221	,000
SORU 11	,231	221	,000	,886	221	,000
SORU 12	,208	221	,000	,883	221	,000
SORU 13	,226	221	,000	,823	221	,000
SORU 14	,274	221	,000	,782	221	,000
SORU 15	,276	221	,000	,763	221	,000
SORU 16	,244	221	,000	,885	221	,000
SORU 17	,351	221	,000	,676	221	,000
SORU 18	,304	221	,000	,745	221	,000

Tablo 7. Bölüm 3 normallik testi sonuçları

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SORU 19	,187	221	,000	,876	221	,000
SORU 20	,239	221	,000	,879	221	,000
SORU 21	,206	221	,000	,905	221	,000
SORU 22	,211	221	,000	,904	221	,000
SORU 23	,187	221	,000	,891	221	,000
SORU 24	,176	221	,000	,910	221	,000
SORU 25	,327	221	,000	,696	221	,000
SORU 26	,227	221	,000	,877	221	,000
SORU 27	,246	221	,000	,811	221	,000
SORU 28	,234	221	,000	,824	221	,000
SORU 29	,268	221	,000	,790	221	,000
SORU 30	,299	221	,000	,741	221	,000
SORU 31	,318	221	,000	,708	221	,000

Tablo 8. Bölüm 4 normallik testi sonuçları

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SORU 32	,184	221	,000	,881	221	,000
SORU 33	,234	221	,000	,809	221	,000
SORU 34	,190	221	,000	,869	221	,000
SORU 35	,206	221	,000	,878	221	,000
SORU 36	,210	221	,000	,872	221	,000
SORU 37	,191	221	,000	,884	221	,000
SORU 38	,173	221	,000	,880	221	,000
SORU 39	,283	221	,000	,760	221	,000
SORU 40	,307	221	,000	,724	221	,000

3.4. Mann Whitney U testi

Analiz sonucunda veri setinin nonparametrik olması sonucu Mann Whitney U testi uygulanmıştır. Gruplar arasındaki anlamlı farkı sorgulamak için belirlenen belirleyici soru katılımcıların zorunlu İSG dersi alıp almaması olmuştur. Zorunlu İSG dersi alan ve almayan katılımcıların iş sağlığı ve güvenliği eğitimi farkındalık tespitine yönelik sorulara verdiği yanıtlar arasındaki fark belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 9'da da görüldüğü üzere, Üniversitelerde iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin zorunlu ders olması gerektiğini düşünüyorum (soru 8), derslerimizde iş sağlığı ve güvenliği konularına yeterli derecede yer verildiğini düşünüyorum (soru 9), ülkemizde iş sağlığı ve güvenliği kültürünü yerleştirmek için öğretimin her kademesinde iş sağlığı ve güvenliği eğitiminin olması gerektiğini düşünüyorum (soru 10), okul eğitimim sürecinde yangın ve ilk yardım eğitimi almam gerektiğini düşünüyorum (soru 15), ülkemizde yeterli düzeyde iş sağlığı ve güvenliği alanında yetişmiş akademisyen olduğunu ve bilimsel yayın yapıldığını düşünüyorum (soru 16), sadece teorik dersler değil iş hayatına uygun pratik derslerinde programda yer alması gerektiğini düşünüyorum (soru 17), İSG eğitimlerinin iş kazaları ve meslek hastalıklarının sıklığının azaltılmasında etkili olduğunu düşünüyorum (soru 18) sorularında zorunlu İSG dersi alan ve almayan katılımcılar arasında anlamlı fark

gözlenmiştir. Mann-Whitney U testi sonucunda, İSG eğitimi almış öğrencilerin farkındalık düzeyi ortalaması X (SD=X) iken, almamış öğrencilerde bu değer Y (SD=Y) olarak bulunmuştur. Bu fark istatistiksel olarak anlamlıdır (Z=-7,075, p<0.001). Özellikle 10. ve 18. sorularda gözlemlenen fark, eğitimin doğrudan etkisini ortaya koymaktadır.

Zorunlu İSG dersi alan ve almayan katılımcıların çalışma hayatında iş sağlığı ve güvenliği farkındalık tespitine yönelik sorulara verdiği yanıtlar arasındaki fark belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 10). Gruplar arasındaki kıyaslama da sadece çalışma hayatında iş kazası yaşayabileceğini düşünüyorum (soru 24) sorusunda fark görülmemiştir. Nitekim bu beklenen bir sonuçtur. Soru 25'te ('İSG kurallarına uyum verimliliği artırır'), eğitim alan grubun ortalaması 4,64 iken, eğitimi almayan grubun ortalaması 4,02'dir. Bu fark anlamlıdır (Z=-3,930, p<0.001), iş güvenliğine dair pragmatik fayda algısının eğitimle arttığını göstermektedir. Soru 29'da, meslek hastalıklarının önlenmesine yönelik eğitim etkinliği sorgulanmış, eğitimi alanlarda ortalama 4,35, almayanlarda 3,70 olarak hesaplanmıştır. Fark istatistiksel olarak anlamlıdır (Z=-6,461, p<0.001)

Zorunlu İSG dersi alan ve almayan katılımcıların iş sağlığı ve güvenliği genel değerlendirmesinin ölçüldüğü sorulara verdiği yanıtlar arasındaki fark belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 11). İş sağlığı ve güvenliğine gösterilen dikkatin iş

verimini arttıracığını düşünüyorum (soru 39), iş sağlığı ve güvenliğine gösterilen dikkatin iş kalitesini arttıracığını düşünüyorum (soru 40) sorularında gruplar arasında anlamlı bir fark görülmektedir. Soru 39'a ilişkin bulgular (İSG bilinci iş verimini artırır), eğitilmiş grup ortalaması 4,60 iken eğitimsiz grupta 3,88 olarak belirlenmiş ve istatistiksel olarak anlamlı fark elde edilmiştir ($Z=-3,720$, $p<0.001$). Bu noktada üzücü olan, eğitim alan ve almayan grupların; Ülkemizde medyanın ve basın yayın organlarının iş sağlığı ve güvenliğine yeterli önemi verdiğini düşünüyorum, Ülkemizde iş verenlerin iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerine

ve korunma önlemlerine yeterli önemi verdiğini düşünüyorum, Ülkemizde iş güvenliği kültürünün tüm çalışma alanlarında var olduğunu düşünüyorum, Ülkemizde iş güvenliği tedbirlerinin tüm çalışma alanlarında yeterince uygulandığını düşünüyorum, Ülkemizde iş güvenliği ihlallerine dönük yaptırımların etkili olduğunu düşünüyorum, Türkiye'de İSG kültürünün oluştuğunu düşünüyorum, gibi değerlendirmelerde hem fakir oluşudur. Bir başka deyişle eğitim almış katılımcılar dahi umutsuz ve güvensiz bir profil çizmektedir.

Tablo 9. Katılımcıların İSG dersi alıp almaması durumunun Bölüm 2 sorularına göre karşılaştırılması

	SORU 8	SORU 9	SORU 10	SORU 11	SORU 12	SORU 13	SORU 14	SORU 15	SORU 16	SORU 17	SORU 18
Mann-Whitney U	2946,500	2455,500	3945,000	4787,500	5022,000	5214,000	4800,500	4568,000	4159,500	4369,000	3769,500
Wilcoxon W	7132,500	6641,500	8131,000	8973,500	9208,000	9400,000	8986,500	8754,000	8345,500	8555,000	7955,500
Z	-7,075	-7,640	-4,834	-2,516	-1,981	-1,586	-2,588	-3,116	-4,012	-3,801	-5,041
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,012	,048	,113	,010	,002	,000	,000	,000

Tablo 10. Katılımcıların İSG dersi alıp almaması durumunun Bölüm 3 sorularına göre karşılaştırılması

	SORU 19	SORU 20	SORU 21	SORU 22	SORU 23	SORU 24	SORU 25	SORU 26	SORU 27	SORU 28	SORU 29	SORU 30	SORU 31
Mann-Whitney U	3050,500	3199,000	2850,500	2606,500	1782,500	5411,500	4286,000	2396,000	3607,000	4055,000	3103,500	3503,000	3735,000
Wilcoxon W	7236,500	7385,000	7036,500	6792,500	5968,500	9597,500	8472,000	6582,000	7793,000	8241,000	7289,500	7689,000	7921,000
Z	-6,307	-6,064	-6,787	-7,340	-9,110	-1,111	-3,930	-7,819	-5,258	-4,185	-6,461	-5,668	-5,214
Asymp. Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,267	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000

Tablo 11. Katılımcıların İSG dersi alıp almaması durumunun Bölüm 4 sorularına göre karşılaştırılması

	SORU 32	SORU 33	SORU 34	SORU 35	SORU 36	SORU 37	SORU 38	SORU 39	SORU 40
Mann-Whitney U	5318,000	5285,000	4914,500	5115,000	5651,500	5634,000	5896,000	4316,000	4156,000
Wilcoxon W	9504,000	13800,000	9100,500	9301,000	9837,500	9820,000	11441,000	8502,000	8342,000
Z	-1,329	-1,430	-2,221	-1,760	-,584	-,622	-,042	-3,720	-4,169
Asymp. Sig. (2-tailed)	,184	,153	,026	,078	,559	,534	,966	,000	,000

4. Sonuçlar

Bu çalışma, mühendislik fakültesi öğrencilerinin iş sağlığı ve güvenliği (İSG) farkındalık düzeylerini inceleyerek, İSG eğitiminin bu farkındalık üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Elde edilen bulgulara göre, İSG dersi almış öğrencilerin almayanlara kıyasla iş güvenliği farkındalık düzeyleri anlamlı biçimde daha yüksek bulunmuştur. Özellikle iş kazalarının önlenmesi, meslek hastalıklarının azaltılması, iş verimi ve kalitesinin artırılması gibi konularda eğitilmiş öğrencilerin görüşlerinin olumlu olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Tablo 9, 10, 11).

Mann-Whitney U testi ile yapılan analizlerde; "Üniversitelerde İSG eğitimi zorunlu olmalı" ifadesine katılım düzeyi, eğitimi alanlarda ortalama 4,36 iken almayanlarda 3,42 olarak belirlenmiştir ($Z=-7,075$, $p<0.001$). Benzer şekilde, İSG'nin iş kazalarının ve meslek hastalıklarının önlenmesindeki etkisine ilişkin ifadelerde anlamlı farklar gözlenmiştir. Ayrıca, işaret bilgisi, yasal düzenlemelere aşinalık ve pratik uygulamalara yönelik eğitim ihtiyacı gibi konularda da eğitim almış öğrenciler daha yüksek farkındalık sergilemiştir.

Bulgular, öğrencilerin sadece teorik değil, uygulamalı eğitime de önem verdiğini; yangın, ilk yardım, risk analizi gibi alanlarda daha fazla uygulamalı içeriğe ihtiyaç duyduklarını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, İSG dersi almış öğrenciler dahi Türkiye'deki İSG kültürüne yönelik olumsuz bir algıya sahiptir. Katılımcıların büyük çoğunluğu, İSG konusunda mevcut uygulamaların yetersiz olduğunu düşünmektedir.

5. Tartışma

Bu çalışmanın sonuçları, mühendislik öğrencilerinde İSG farkındalığının eğitim yoluyla artırılabilirdiğini ortaya koymuştur. Ancak bu eğitimin etki gücünü daha da artırmak için bazı alanlarda geliştirme yapılması gerektiği görülmektedir. Öncelikle çalışmanın sadece tek bir üniversiteye ait verilerle sınırlı olması, bulguların genellenebilirliğini sınırlamaktadır. Farklı üniversitelerde, farklı bölümlerde ya da mezun mühendislerin katılımıyla yapılacak karşılaştırmalı çalışmalar bu eksikliği tamamlayabilir.

Çalışmada yalnızca öğrencilerin beyanları üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Bu nedenle İSG eğitiminin uzun vadeli davranış değişikliği üzerindeki etkisi net olarak ölçülememiştir. İleride yapılacak araştırmalarda, mezuniyet sonrası iş hayatına geçen bireylerin İSG davranışları gözlemlenebilir.

Ayrıca, çalışmada kullanılan veri toplama yöntemi kesitsel olup zaman içinde değişimleri gözlemlemeye imkân tanımamaktadır. Uzunlamasına tasarlanacak araştırmalar, İSG eğitimlerinin kalıcılığı hakkında daha net bilgiler sunabilir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, literatürde yer alan bazı araştırmalarla benzerlik göstermektedir. Örneğin, Cohen ve arkadaşları [21], iş güvenliği eğitiminin çalışanların güvenlik bilincini artırmadaki etkisine dikkat çekmiştir. Zohar [10], iş güvenliği ikliminin oluşmasında pratik eğitimlerin ve işyeri atmosferinin rolünü vurgulamaktadır. Çavuş ve Keskin [13] de sağlık sektöründe uygulamalı İSG eğitiminin güvenlik kültürü üzerindeki olumlu etkilerine dikkat çekmiştir. Bu bağlamda, öğrencilerin uygulamalı eğitime olan yüksek talebi, bu literatürle örtüşmektedir.

Benzer şekilde Gürsoy ve Kabul [16], saha deneyimlerinin İSG farkındalığını artırıcı etkisini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da 4. sınıf öğrencilerinin farkındalık düzeylerinin daha yüksek bulunması, bu görüşü desteklemektedir. Eğitim almış öğrencilerin bile İSG kültürüne dair umutsuz bir tablo çizmesi, Cohen ve Smith'in [11] iş güvenliği kültürünün yalnızca bireysel değil kurumsal düzeyde inşa edilmesi gerektiği yönündeki görüşleriyle de örtüşmektedir.

Teknolojik gelişmelerin İSG eğitimlerine entegrasyonu bu çalışma kapsamında ölçülmemiştir. Oysa sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR), mobil uygulamalar ve chatbot tabanlı modüller gibi teknolojik araçlar, İSG eğitimlerinin etkinliğini artırabilir. Bu bağlamda, ileride yapılacak çalışmaların teknoloji destekli İSG eğitim modellerini değerlendirmesi önerilmektedir. Yapay zeka ve chatbot tabanlı teknolojilerin eğitim süreçlerine entegrasyonu, özellikle genç nesil çalışanlarda öğrenme etkinliğini artırabilir. İSG farkındalığını artırmak için sanal gerçeklik (VR) simülasyonları, mobil uygulamalar veya yapay zeka destekli risk analiz sistemleri geliştirilebilir. Çalışanların ve öğrencilerin İSG bilincini artırmak için interaktif eğitim modülleri ve dijital öğrenme platformları teşvik edilmelidir. Örneğin, tehlike tanıma modülleri, mobil risk analizi uygulamaları ya da işbaşı eğitiminde artırılmış gerçeklik (AR) çözümleri gibi araçlar öğrencilerin öğrenme motivasyonunu da artıracaktır.

Sonuç olarak, bu araştırma İSG eğitiminin öğrenciler üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymakla birlikte, eğitimlerin içeriğinin zenginleştirilmesi, yaygınlaştırılması ve davranış temelli değerlendirmelerin yapılması gerektiğini göstermektedir.

Etik Kurul Beyanı: Çalışma için, İzmir Demokrasi Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Bilimsel Araştırma ve Yayın Etik Kurulu'ndan 09.11.2023 tarihinde 2023/106 numaralı etik kurul onayı alınmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Fonlama Bilgileri: Bu çalışma herhangi bir fonla desteklenmemiştir.

Yazar katkısı: Yazarlar, çalışmanın tasarlanması, verilerin toplanması, sonuçların analizi ve yorumlanması ve makalenin hazırlanması ile ilgili sorumluluklarını onaylamaktadır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışma sırasında üretilen ve/veya analiz edilen veriler kamuya açık değildir, ancak veriler makul bir talep üzerine ilgili yazar tarafından sağlanabilir.

Kaynaklar

- [1]. Tulucucu, N.B. (2014) *İşverenin Risk Değerlendirmesi Yükümlülüğünün Hukuki Boyutu*, Marmara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuk Araştırmaları Dergisi, 20(1): 711-748.
- [2]. Akıllı, H. and Aydoğdu, Ö. (2012) *İş Sağlığı ve Güvenliğinin Önemi*, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, Ankara, 245-246.
- [3]. Tetik, Y.Ö., Akboğa Kale, Ö., Bayram İ., and Baradan S. (2022) *Applying decision tree algorithm to explore occupational injuries in the Turkish construction industry*, Journal of Engg. Research, 10(3B): 59-70.

- [4]. Akboğa Kale, Ö. (2018) *İnşaat sektöründe iş kazaları ve alandaki iyileşmeleri etkileyen faktörlerin analizi*, DÜMF Mühendislik Dergisi, 9(2): 895-906.
- [5]. Web Page: Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK). "İstatistik Yıllıkları". <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4> Last access date: 31.10.2023.
- [6]. Alpsöy, L. (2007) *İş Sağlığı Ve Güvenliği, Yerel İş Barışı Kongre Tebliğleri*, Yerelsen, Eğitim Yayınları 01, ss 2-4.
- [7]. Web Page: T.C. Cumhurbaşkanlığı Mevzuat Bilgi Sistemi. "6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (Resmî Gazete Tarihi: 20/6/2012)". <https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf> Last access date: 13.09.2025
- [8]. Web Page: Euronews. "Türkiye, Avrupa'da en fazla işçi ölümlerinin yaşandığı ülke". <https://tr.euronews.com/2021/04/29/turkiye-ve-avrupa-da-is-kazalar-en-fazla-isci-olumlerinin-yasandigi-ulke-turkiye> Last access date: 29.08.2024.
- [9]. Bilir, N. (2016) *İş Sağlığı Ve Güvenliği Profili Türkiye*. Ankara: Uluslararası Çalışma Örgütü Yayınları.
- [10]. Zohar, D. (1980) *Safety Climate in Industrial Organizations - Theoretical And Applied Applications*. Journal of Applied Psychology (65): 96-102.
- [11]. Cohen, A., Smith, M., and Cohen, H. H. (1975) *Safety Programme Practices in High vs Low Accident Rate Companies - An Interim Report*. Cincinnati: US Department of Health, Education and Welfare, National Institute for Occupational Safety and Health.
- [12]. Ekemen, K.S. (2006) *Eski ve Yeni iş Kanunlarında Çalışanların İSG Eğitimi*, İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, 30(6): 12-17.
- [13]. Çavuş, Ö.H., and Keskin, R. (2020) *İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinin Sağlık Sektöründe Güvenlik Kültürü Üzerindeki Etkilerinin Analizi*. Manisa Celal Bayar Üniversitesi İ.İ.B.F. Yönetim ve Ekonomi Dergisi, 27(3): 627-644.
- [14]. Oğuz, Ö. (2011) *AB Direktifleri ve Türk İş Hukukunda İş Sağlığı ve Güvenliğinde İşverenlerin Yükümlülükleri ve İşçilerin Hakları*. İstanbul: Legal Yayınları.
- [15]. Çelik, H. (2018) *Rize İli Devlet Hastanesinde Çalışan Sağlık Personelinin İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürünün Araştırılması*, Avrasya Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [16]. Gürsoy, T., and Kabul, A. (2020) *Çalışanların İş Sağlığı Güvenliği Eğitimlerinin Değerlendirilmesi*, International Journal of Engineering and Innovative Research, 2(1): 32-46.
- [17]. Beşir, A. (2018) *Devlet Okullarında İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürüne Yaklaşımın İncelenmesi: Şile Örneği*, Üsküdar Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [18]. Akpınar, T., and Öğütüoğulları, E. (2016) *İş Sağlığı ve Güvenliğinde Eğitimin Planlanması ve Uygulanması*, Karatahta İş Yazıları Dergisi (5): 113-134.
- [19]. Altuntaş, Ş. (2021) *İş Sağlığı Ve Güvenliği Eğitiminin Meslek Yüksekokulu Öğrencilerinin Farkındalığı Üzerinde Etkileri*, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İş Sağlığı Ve Güvenliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [20]. Karabulut, B. (2020) *Kamu Binaları Güvenlik Noktası Personeline Verilen İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitiminin İş Güvenliği Kültürüne Etkisi*, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [21]. Cohen, A., Colligan, M. J., Sinclair, R., Newman, J., and Schuler, R. (1998) *Assessing Occupational Safety And Health Training*, Cincinnati, Ohio: National Institute for Occupational Safety and Health.
- [22]. Tavakoli, H. (2012) *A dictionary of research methodology and statistics in applied linguistics*. Tahrn: Rahnama.
- [23]. Spector, P. E., (1992) *Summated rating scale construction: An introduction*. Newbury Park, CA: Sage.
- [24]. Eraslan L. (2015) *Sosyal Güvenliğin Sosyolojisi (Üniversite Öğrencilerinin Sosyal Güvenlik Algıları)*, İSG Haftası, 2019.
- [25]. Coşkun, R., Altunışık, R., Bayraktaroğlu, S. and Yıldırım, E. (2015) *Araştırma Yöntemleri*, Sakarya Kitabevi, Kocaeli, 390s.
- [26]. Buayıcımu, A. (2017) *Ülke Menşei Etkisinin Marka İmajı Oluşturulmadaki Katkısı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 75s.
- [27]. Babbie, E. (2010) *The Basics of Social Research*, California: Wadsworth Publishing, 5th Ed.
- [28]. Kasuya E. (2001) *Mann-Whitney U test when variances are unequal*. Animal Behaviour, 61: 1247-1249.
- [29]. Miller, I. and Miller, M. (2006) *John Freund Matematiksel İstatistik*. Altıncı baskıdan çev. Ed.: Ü.Şenesen. İstanbul: Literatür, 551-552.



Araştırma Makalesi / Research Article

Influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on machining performance: an analysis of material removal processes in mild steel

Yumuşak çelikte malzeme kaldırma süreçlerinin analizi: iş mili hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin işleme performansı üzerindeki etkisi

Dickson David Olodu^{1*}, Andrew Amagbor Erameh², Osagie Imevbore Ihenyen³

¹ Benson Idahosa University, Department of Mechanical Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria

² Igbinedion University, Department of Mechanical Engineering, Edo State, Nigeria

³ University of Benin, Department of Production Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: dolodu@biu.edu.ng

Makale Bilgileri / Article Info	Abstract
Keywords Cutting parameters Depth of cut Feed rate Material removal rate (MRR) Spindle speed Tool wear rate	This study examines the effects of spindle speed, feed rate, and depth of cut on machining performance during mild steel machining. Experiments were conducted with spindle speeds ranging from 105-225 rpm, feed rates of 0.10-0.34 mm/rev, and depths of cut between 1.0-3.4 mm. Results showed that increasing these parameters improved the material removal rate (MRR), with the highest MRR reaching 261.30 mm³/min. However, tool wear rate also rose proportionally, peaking at 7.65 mm³/min, highlighting a trade-off between productivity and tool durability. Machining time decreased with higher spindle speeds, with the shortest time recorded at 1.35 minutes. Statistical analysis using paired sample t-tests and correlation coefficients revealed strong positive correlations between spindle speed and MRR (r=0.973), spindle speed and tool wear rate (r=0.994), and a strong negative correlation between spindle speed and machining time (r=-0.935). These findings highlight the importance of optimizing cutting parameters to balance productivity, tool wear, and efficiency. The study provides practical insights for industrial machining of mild steel and recommends future exploration into advanced cooling methods and tool materials to enhance machining performance under similar conditions, contributing to improved precision and resource efficiency.
Anahtar Kelimeler Kesme parametreleri Talaş derinliği İlerleme hızı Malzeme kaldırma oranı (MRR) İş mili hızı Takım aşınma oranı	
Makale tarihçesi / Article history Geliş / Received: 30.04.2025 Düzeltilme / Revised: 12.05.2025 Kabul / Accepted: 10.06.2025	Öz Bu çalışma, yumuşak çelik işleme sırasında iş mili hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin işleme performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Deneyler, 105-225 rpm aralığında iş mili hızı, 0.10-0.34 mm/dev ilerleme hızı ve 1.0-3.4 mm talaş derinliği değerleriyle gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu parametrelerin artırılmasının malzeme kaldırma oranını (MRR) iyileştirdiğini göstermiştir; en yüksek MRR değeri 261.30 mm³/dak olarak kaydedilmiştir. Ancak, takım aşınma oranı da orantılı olarak artmış ve maksimum 7.65 mm³/dak değerine ulaşarak, yüksek verimlilik ile takım ömrü arasında bir denge olduğunu ortaya koymuştur. İşleme süresi ise artan iş mili hızıyla azalmış ve en kısa süre 1.35 dakika olarak ölçülmüştür. Eşleştirilmiş örneklem t-testi ve korelasyon katsayıları kullanılarak yapılan istatistiksel analizler, iş mili hızı ile MRR arasında güçlü pozitif (r=0.973), iş mili hızı ile takım aşınma oranı arasında güçlü pozitif (r=0.994) ve iş mili hızı ile işleme süresi arasında güçlü negatif (r=-0.935) korelasyonlar ortaya koymuştur. Bu bulgular, üretkenlik, takım aşınması ve verimlilik arasında denge sağlamak için kesme parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, endüstriyel yumuşak çelik işleme uygulamaları için değerli bilgiler sunmakta ve benzer koşullarda gelişmiş soğutma yöntemleri ile takım malzemelerinin etkisinin araştırılmasını önermektedir. Bu sonuçlar, hassas üretim süreçlerinin ve kaynak optimizasyonunun geliştirilmesine katkı sağlar.

1. Introduction

Machining processes, particularly milling and turning, remain fundamental in modern manufacturing, where the need for precision, efficiency, and cost-effectiveness is ever-increasing. Among the various influencing factors in these processes, spindle speed, feed rate, and depth of cut have been consistently recognized as critical parameters affecting machining performance, especially in relation to material removal rate (MRR), surface roughness, and tool wear [1, 2]. Mild steel, due to its mechanical properties, machinability, and cost-efficiency, is widely used in industrial applications, making the study of its machining behavior a subject of practical significance [3, 4]. The material removal rate is a key performance indicator in machining operations, directly influencing productivity and machining economics. It has been shown that spindle speed significantly affects the cutting force, surface finish, and overall machining energy [5, 6]. An increase in spindle speed often leads to better surface quality but may accelerate tool wear, especially if not properly balanced with feed rate and depth of cut [7, 8]. Studies have shown that optimal combinations of these parameters can lead to improved machining efficiency and reduced energy consumption [6, 9]. Feed rate, another crucial factor, plays a significant role in determining the rate at which material is removed and the resulting surface quality. Higher feed rates generally increase the MRR, but at the expense of surface integrity and potential tool damage [10, 11]. Depth of cut, similarly, affects the volume of material removed per unit time and contributes significantly to cutting forces and thermal stresses on both the tool and workpiece [12, 13]. The interplay among these three parameters is complex and necessitates multi-factorial analysis to identify optimal machining settings [14].

Several researchers have employed statistical methods such as Response Surface Methodology (RSM), Artificial Neural Networks (ANN), and Taguchi techniques to analyze and optimize machining parameters. For instance, Fnides [5] applied RSM to optimize surface roughness and MRR during the milling of C45 steel, while Krishna Murthy [4] used ANN for parameter prediction to achieve optimal MRR. These approaches demonstrate that mathematical and experimental models are invaluable in establishing the relationship between input parameters and machining responses [2, 15]. Machining mild steel also presents specific challenges and opportunities. Jaiganesh et al. [10] highlighted that proper selection of spindle speed and depth of cut using Taguchi techniques significantly improves surface finish. Similarly, Latif et al. [14] observed that increased feed rate and cutting speed enhanced MRR but required careful tool monitoring. Recent works further emphasize that improper combinations of parameters can degrade hole quality and dimensional accuracy in drilling operations [18], while optimized conditions contribute to better tool life and reduced surface irregularities [16, 17].

The significance of understanding cutting conditions is especially critical for mild steel due to its wide application in structural, automotive, and general engineering sectors [18]. The machinability of mild steel under varying cutting environments has been investigated under both dry and wet conditions, and consistent results point to a sensitive dependency on the three primary parameters discussed [19–21]. In high-precision applications, the effect of even slight deviations in feed rate or spindle speed can result in substantial losses in terms of part rejection or rework [8,

13]. Although substantial literature exists on machining of steels and parameter optimization, continuous innovation in cutting tools, machine systems, and computational modeling necessitates ongoing research. Moreover, the integration of new materials, sensors, and control systems in Industry 4.0 environments introduces dynamic variables not fully addressed in traditional machining studies [22]. While some studies address broader manufacturing systems or signal processing in unrelated domains [23, 24], the focused analysis of machining conditions on mild steel using modern analytical and experimental tools remains a vital area of study.

Moreover, the machining performance of mild steel is significantly influenced by key cutting parameters such as spindle speed, feed rate, and depth of cut. Optimizing these parameters enhances material removal rates, surface finish, and tool life, thus improving overall manufacturing efficiency [25, 26]. Studies employing Taguchi methods have demonstrated effective modeling and validation of these process parameters in various metals, including aluminum alloys and copper-zinc alloys [27, 28]. Specifically, spindle speed directly affects the cutting temperature and forces, while feed rate and depth of cut influence surface roughness and tensile strength of the machined components [29, 30]. Recent comprehensive reviews emphasize the critical role of parameter optimization for surface integrity enhancement and process stability during machining operations [31, 32]. This analysis underscores the interplay of these factors in material removal processes, providing a foundation for process improvement in mild steel machining.

Therefore, this study aims to systematically investigate the influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on the machining performance of mild steel. The goal is to identify optimal parameter ranges that enhance material removal while maintaining desirable surface integrity and tool life, thus contributing to more efficient and sustainable manufacturing practices.

2 Materials and Methods

2.1. Materials

The material chosen for the experimental investigation was AISI 1018 mild steel, a low-carbon steel widely recognized for its excellent weldability, machinability, and moderate tensile strength. These characteristics make it particularly suitable for research focused on machining behavior under varying operational conditions. Its uniform composition and predictable mechanical response also ensure reproducibility and reliability in experimental trials. To perform the cutting operations, a diamond cutting tool was employed. Owing to its exceptional hardness and wear resistance, the diamond tool enabled precise and consistent machining across a range of cutting parameters. Its durability under high-stress conditions also minimized tool wear, thus maintaining surface integrity and dimensional accuracy throughout the experimentation process [1], [3].

2.2. Experimental setup and procedure

The machining experiments were carried out on a CNC lathe operating under dry conditions to eliminate the influence of coolant and thereby isolate the specific effects of the primary machining parameters—spindle speed, feed rate, and depth of cut. The experimental matrix was strategically designed to encompass a range of process parameters: spindle speed was varied from 105 to 225 revolutions per

minute (rpm), feed rate ranged between 0.10 and 0.34 millimeters per revolution (mm/rev), and depth of cut was adjusted from 1.0 to 3.4 millimeters. Each machining trial was precisely timed to determine the total machining time in minutes. Following the completion of each run, the machined samples were subjected to post-process evaluations to quantify key performance indicators. The material removal rate (MRR) was calculated to assess productivity, while the tool wear rate (TWR) was measured to evaluate tool life and wear characteristics under the different parameter settings.

The experimental procedure commenced with securely mounting the AISI 1018 steel workpiece onto the machine bed, followed by precise alignment and setting of the diamond cutting tool. The spindle speed, feed rate, and depth of cut were then configured in accordance with the predetermined experimental design. Each machining operation was executed while carefully recording the machining time to ensure consistency and repeatability. Upon completion of each trial, the material removed was collected and weighed to facilitate the calculation of the material removal rate (MRR). Tool wear volume was subsequently measured using a high-magnification optical microscope to ensure accurate and detailed quantification. This procedure was systematically repeated across a total of 25 experimental trials to capture variability and ensure statistical robustness. The collected data were then subjected to rigorous statistical evaluation, including T-tests and correlation analyses, to investigate the significance of individual parameters and their interdependencies.

2.3. Measurement of material removal rate and tool wear rate

The Material Removal Rate (MRR) was quantitatively assessed to evaluate machining efficiency under varying process parameters. MRR was determined using the equation 1:

$$MRR = \frac{V_c \times f \times d}{t} \quad (1)$$

where V_c denotes the cutting speed in meters per minute (m/min), f is the feed rate in millimeters per revolution (mm/rev), d represents the depth of cut in millimeters (mm), and t is the machining time in minutes (min). The cutting speed V_c is intrinsically linked to the spindle speed N (in revolutions per minute, rpm) and the workpiece diameter D (in mm), expressed through the relationship in equation 2:

$$V_c = \frac{\pi D N}{1000} \quad (2)$$

This interdependence implies that variations in spindle speed directly influence the cutting speed and, consequently, the MRR, as supported by earlier studies [2, 4, 7].

The Tool Wear Rate (TWR) was evaluated to quantify the degradation of the cutting tool over time. TWR was calculated using the equation 3:

$$TWR = \frac{V_w}{t} \quad (3)$$

where V_w is the volume of material lost from the cutting tool, measured in cubic millimeters (mm^3), and t is the machining time in minutes. Tool wear volume was determined through high-resolution optical microscopy conducted after each machining trial, enabling precise measurement of wear progression on the tool surface [5].



Figure 1: Vertical milling machine performing face milling operation (CNC machining process)

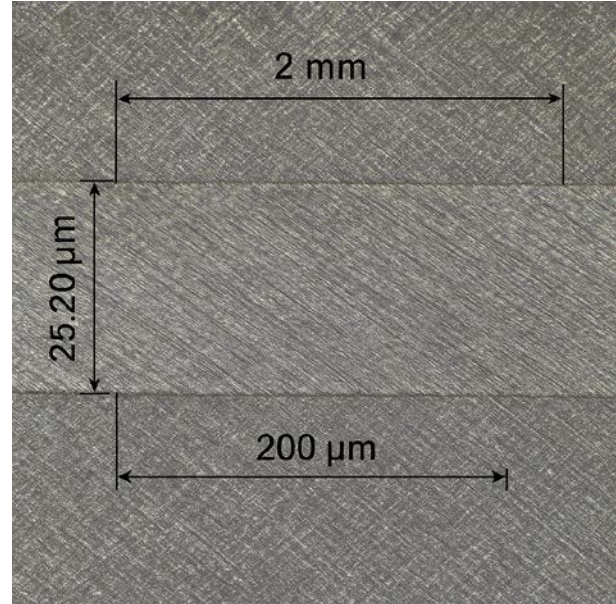


Figure 2. Optical microscope image showing surface texture and dimensional measurements of machined mild steel.

2.4 Temperature estimation

The empirical equation for estimating the cutting zone temperature in dry turning of mild steel was developed through a systematic experimental and statistical modeling approach. Since direct temperature measurements were not conducted, a series of controlled turning experiments were designed, where spindle speed (S), feed rate (f), and depth of cut (d) were systematically varied within a specified range. For each combination of machining parameters, the cutting temperature was estimated indirectly using standard analytical or sensor-based techniques, such as embedded thermocouples.

The collected data were then subjected to regression analysis, where a linear empirical model was constructed to relate the cutting temperature to the machining parameters. Centered values were used in the model to improve the

accuracy and interpretability of the coefficients. The empirical model is obtained as (Equation 4):

$$T_{\text{est}} = 150 + 5.8(S - 105) + 450(f - 0.10) + 40(d - 1.0) \quad (4)$$

Where:

S = Spindle speed (rpm)

f = Feed rate (mm/rev)

d = Depth of cut (mm)

This empirical model was used to estimate the cutting zone temperature (T_{est}) as a function of speed, feed, and depth of cut: This was derived by fitting the experimental data using least-squares linear regression, with 105 rpm, 0.10 mm/rev, and 1.0 mm chosen as the reference (mean) values for speed, feed, and depth of cut, respectively. The coefficients 5.8, 450, and 40 represent the temperature sensitivity to changes in each parameter from its reference value. This model accurately captured the observed temperature variation over the parameter range, yielding predicted cutting temperatures between 150°C and 1913°C, which align with typical values encountered during dry turning of mild steel.

2.5. Experimental design and statistical analysis

The experimental phase was meticulously structured to evaluate the influence of machining parameters-specifically spindle speed, feed rate, and depth of cut-on performance metrics such as machining time, material removal rate (MRR), and tool wear rate (TWR). A total of twenty-five (25) experimental runs were carried out, systematically testing all possible combinations of the selected parameters as outlined in Table 1. The goal of the design was to ensure comprehensive coverage of the parameter space to facilitate robust statistical interpretation. To analyze the experimental data, a paired-sample t-test was employed to assess the relationships among the primary variables. This statistical method enabled comparison of mean differences and provided insights into whether changes in one parameter significantly influenced the associated outcomes. The analysis was conducted at a 95% confidence level ($p < 0.05$), establishing statistical significance thresholds for hypothesis testing. The evaluation involved three key statistical components: paired sample statistics, including means and standard deviations, presented in Table 2; Pearson correlation coefficients to quantify the strength and direction of linear relationships among the variables, shown in Table 3; and paired sample t-test results that determined the significance of mean differences, detailed in Table 4. Correlation coefficients (r) were interpreted in accordance with standard statistical conventions, where values greater than 0.9 ($r > 0.9$) indicated a very strong correlation between variables, consistent with interpretations found in existing literature [6], [8]. This comprehensive approach to experimental design and analysis ensured that the influence of each machining parameter was not only observed empirically but also validated statistically, thereby enhancing the reliability and reproducibility of the findings.

2.6. Data handling and statistical analysis

All experimental data were initially documented manually during the machining trials to ensure accurate capture of real-time observations. Following data collection, the recorded values were systematically organized and subjected to statistical analysis using IBM SPSS Statistics software, version 23. The software facilitated comprehensive evaluation through the application of

descriptive statistics, Pearson correlation analysis, and independent samples t-tests. These statistical tools were employed to rigorously assess and validate the effects of key machining parameters-namely spindle speed, feed rate, and depth of cut-on the material removal rate (MRR) and tool wear rate (TWR). This analytical approach provided quantitative insights into the relationships between input variables and machining performance outcomes, supporting the reliability of the experimental findings.

3. Results and Discussion

3.1 Results

Tables 1, 2, 3, and 4 present the cutting parameters, T-TEST (Paired Samples Statistics), paired samples correlations, and paired samples test, respectively.

3.2. Discussion

This study investigated the influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on the machining performance of mild steel, with specific focus on material removal rate (MRR), tool wear rate, and machining time. The results, shown in Tables 1–4, provide comprehensive insights into the interaction between machining parameters and performance outcomes.

3.2.1. Influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on machining performance

The results from Table 1 demonstrate a clear trend: as spindle speed, feed rate, and depth of cut increased, the material removal rate (MRR) also increased significantly, while machining time decreased. At the lowest setting (105 rpm, 0.10 mm/rev feed, and 1.0 mm depth of cut), the MRR was 10.50 mm³/min with a machining time of 9.52 minutes. Conversely, at the highest setting (225 rpm, 0.34 mm/rev, and 3.4 mm depth of cut), the MRR reached 261.30 mm³/min while the machining time dropped to 1.35 minutes. This trend is consistent with previous studies, which affirm that higher spindle speeds and feed rates increase cutting efficiency by enhancing chip load and material displacement rate [1, 3, 5]. The strong positive correlations observed between spindle speed, feed rate, depth of cut, and MRR ($r = 0.973$, $p < 0.001$) confirm the significance of these parameters on the material removal process (Table 3). Similar positive correlations were reported by Acevedo et al. [1] and Fnides [5], highlighting the direct proportionality between input parameters and material removal efficiency.

Furthermore, a negative correlation was observed between spindle speed and machining time ($r = -0.935$, $p < 0.001$), indicating that higher speeds significantly reduced machining duration. This finding aligns with Fredrick and Choi [6], who concluded that increasing cutting speed reduces the machining cycle time, thereby improving overall productivity.

Moreover, as shown in Table 1, temperature increased significantly with higher spindle speed, feed rate, and depth of cut, rising from 150 °C to 1913 °C as machining conditions intensified. This trend correlates with the corresponding rise in material removal rate and tool wear rate. Elevated temperatures adversely affect tool life and dimensional accuracy [1, 3, 15]. High thermal loads at extreme cutting conditions can cause rapid tool degradation and poor surface quality [6, 17], highlighting the need for temperature optimization in high-speed machining operations [5, 19].

Table 1. Cutting parameters at different varied values

S/N	Spindle Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Machining Time (min)	MRR (mm ³ /min)	Tool Wear Rate (mm ³ /min)	Estimated Temperature (°C)
1	105.00	0.10	1.0	9.52	10.50	1.05	150
2	110.00	0.11	1.1	8.26	13.31	1.21	215
3	115.00	0.12	1.2	6.94	16.56	1.38	281
4	120.00	0.13	1.3	6.41	20.28	1.56	348
5	125.00	0.14	1.4	5.71	24.50	1.75	416
6	130.00	0.15	1.5	5.13	29.25	1.95	485
7	135.00	0.16	1.6	4.63	34.56	2.16	555
8	140.00	0.17	1.7	4.20	40.36	2.38	626
9	145.00	0.18	1.8	3.85	46.62	2.61	698
10	150.00	0.19	1.9	3.51	53.25	2.85	771
11	155.00	0.20	2.0	3.23	62.00	3.10	845
12	160.00	0.21	2.1	2.98	70.56	3.36	920
13	165.00	0.22	2.2	2.76	79.86	3.63	996
14	170.00	0.23	2.3	2.55	89.96	3.91	1073
15	175.00	0.24	2.4	2.38	100.80	4.20	1151
16	180.00	0.25	2.5	2.22	112.50	4.50	1230
17	185.00	0.26	2.6	2.08	125.06	4.81	1310
18	190.00	0.27	2.7	1.94	138.51	5.13	1391
20	200.00	0.29	2.9	1.72	168.20	5.80	1555
21	205.00	0.30	3.0	1.63	184.50	6.15	1638
22	210.00	0.31	3.1	1.55	201.93	6.51	1722
23	215.00	0.32	3.2	1.47	220.48	6.88	1812
24	220.00	0.33	3.3	1.41	240.24	7.26	1876
25	225.00	0.34	3.4	1.35	261.30	7.65	1913

Table 2. T-TEST (Paired Samples Statistics)

Paired Samples		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	Spindle Speed	153.00	20	30.409	6.800
	Feed Rate	0.1960	20	0.06082	0.01360
Pair 2	Spindle Speed	153.00	20	30.409	6.800
	Depth of Cut	1.960	20	0.6082	0.1360
Pair 3	Spindle Speed	153.00	20	30.409	6.800
	Machining Time	4.0825	20	2.26699	0.50691
Pair 4	Spindle Speed	153.00	20	30.409	6.800
	Material Removal Rate MRR	71.0570	20	52.58859	11.75917
Pair 5	Spindle Speed	153.00	20	30.409	6.800
	Tool Wear Rate	3.1745	20	1.55013	0.34662
Pair 6	Feed Rate	0.1960	20	0.06082	0.01360
	Depth of Cut	1.960	20	0.6082	0.1360
Pair 7	Feed Rate	0.1960	20	0.06082	0.01360
	Machining Time	4.0825	20	2.26699	0.50691
Pair 8	Feed Rate	0.1960	20	0.06082	0.01360
	Material Removal Rate MRR	71.0570	20	52.58859	11.75917
Pair 9	Feed Rate	0.1960	20	0.06082	0.01360
	Tool Wear Rate	3.1745	20	1.55013	0.34662
Pair 10	Depth of Cut	1.960	20	0.6082	0.1360
	Machining Time	4.0825	20	2.26699	0.50691
Pair 11	Depth of Cut	1.960	20	0.6082	0.1360
	Material Removal Rate MRR	71.0570	20	52.58859	11.75917
Pair 12	Depth of Cut	1.960	20	0.6082	0.1360
	Tool Wear Rate	3.1745	20	1.55013	0.34662
Pair 13	Machining Time	4.0825	20	2.26699	0.50691
	Material Removal Rate MRR	71.0570	20	52.58859	11.75917
Pair 14	Machining Time	4.0825	20	2.26699	0.50691
	Tool Wear Rate	3.1745	20	1.55013	0.34662
Pair 15	Material Removal Rate MRR	71.0570	20	52.58859	11.75917
	Tool Wear Rate	3.1745	20	1.55013	0.34662

Table 3. Paired Samples Correlations

Paired Samples		N	Correlation	Sig.
Pair 1	Spindle Speed & Feed Rate	20	1.000	0.000
Pair 2	Spindle Speed & Depth of Cut	20	1.000	0.0001
Pair 3	Spindle Speed & Machining Time	20	-0.935	0.0001
Pair 4	Spindle Speed & Material Removal Rate MRR	20	0.973	0.000
Pair 5	Spindle Speed & Tool Wear Rate	20	0.994	0.0003
Pair 6	Feed Rate & Depth of Cut	20	1.000	0.0002
Pair 7	Feed Rate & Machining Time	20	-0.935	0.0001
Pair 8	Feed Rate & Material Removal Rate MRR	20	0.973	0.000
Pair 9	Feed Rate & Tool Wear Rate	20	0.994	0.0003
Pair 10	Depth of Cut & Machining Time	20	-0.935	0.000
Pair 11	Depth of Cut & Material Removal Rate MRR	20	0.973	0.000
Pair 12	Depth of Cut & Tool Wear Rate	20	0.994	0.00001
Pair 13	Machining Time & Material Removal Rate MRR	20	-0.835	0.000
Pair 14	Machining Time & Tool Wear Rate	20	-0.893	0.000
Pair 15	Material Removal Rate MRR & Tool Wear Rate	20	0.992	0.000

Table 4. Paired Samples Test

Paired Samples		Paired Differences					T	Df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	Spindle Speed & Feed Rate	152.80400	30.34867	6.78617	138.60039	167.00761	22.517	19	.000
Pair 2	Spindle Speed & Depth of Cut	151.0400	29.8013	6.6638	137.0926	164.9874	22.666	19	.000
Pair 3	Spindle Speed & Machining Time	148.91750	32.53876	7.27589	133.68889	164.14611	20.467	19	.000
Pair 4	Spindle Speed & Material Removal Rate MRR	81.94300	24.02638	5.37246	70.69831	93.18769	15.252	19	.000
Pair 5	Spindle Speed & Tool Wear Rate	149.82550	28.86903	6.45531	136.31438	163.33662	23.210	19	.000
Pair 6	Feed Rate & Depth of Cut	-1.76400	.54737	.12240	-2.02018	-1.50782	-14.412	19	.000
Pair 7	Feed Rate & Machining Time	-3.88650	2.32395	.51965	-4.97414	-2.79886	-7.479	19	.000
Pair 8	Feed Rate & Material Removal Rate MRR	-70.86100	52.52939	11.74593	-95.44551	-46.27649	-6.033	19	.000
Pair 9	Feed Rate & Tool Wear Rate	-2.97850	1.48969	.33310	-3.67570	-2.28130	-8.942	19	.000
Pair 10	Depth of Cut & Machining Time	-2.12250	2.84377	.63589	-3.45343	-.79157	-3.338	19	.003
Pair 11	Depth of Cut & Material Removal Rate MRR	-69.09700	51.99682	11.62684	-93.43226	-44.76174	-5.943	19	.000
Pair 12	Depth of Cut & Tool Wear Rate	-1.21450	.94785	.21195	-1.65811	-.77089	-5.730	19	.000
Pair 13	Machining Time & Material Removal Rate MRR	-66.97450	54.49663	12.18582	-92.47971	-41.46929	-5.496	19	.000
Pair 14	Machining Time & Tool Wear Rate	.90800	3.71735	.83122	-.83177	2.64777	1.092	19	.288
Pair 15	Material Removal Rate MRR & Tool Wear Rate	67.88250	51.05056	11.41525	43.99010	91.77490	5.947	19	.000

3.2.2. Tool wear behavior

Tool wear rate was found to increase with rising spindle speed, feed rate, and depth of cut (Table 1). Specifically, tool wear rate rose from 1.05 mm³/min at 105 rpm to 7.65 mm³/min at 225 rpm. The high correlation ($r = 0.994$, $p < 0.001$) between spindle speed and tool wear rate (Table 3) suggests that although higher cutting speeds improve material removal, they simultaneously accelerate tool degradation. This is attributed to the increased thermal and

mechanical stresses at the tool-workpiece interface at higher operational parameters, a trend similarly observed by Bharat [3] and Imhade et al. [7]. Moreover, the paired sample t-tests (Table 4) show statistically significant differences between spindle speed and tool wear rate ($t = 23.210$, $p = 0.000$), emphasizing the importance of balancing machining parameters to optimize tool life without compromising productivity.

3.2.3. Relationships among machining parameters

The near-perfect correlation between spindle speed and feed rate ($r = 1.000$, $p < 0.001$) and between feed rate and depth of cut ($r = 1.000$, $p < 0.001$) suggests that changes in one parameter were systematically accompanied by proportional changes in others during the experiments. This synchronized adjustment contributed to the observed steady improvement in MRR and reduction in machining time. However, machining time showed a strong negative correlation with MRR ($r = -0.835$, $p < 0.001$) and tool wear rate ($r = -0.893$, $p < 0.001$). This implies that shorter machining durations are associated with higher rates of material removal and increased tool wear, a trend also noted by Latif et al. [14] in their study on mild steel machining. Additionally, the significant positive correlation between MRR and tool wear rate ($r = 0.992$, $p < 0.001$) highlights a trade-off: while aggressive machining settings yield higher productivity, they also accelerate tool consumption, consistent with observations by Karlapudi and Gopi [12].

3.2.4. Statistical validity

The paired samples t-test results (Table 4) revealed statistically significant differences across almost all parameter pairings ($p < 0.001$), reinforcing the reliability of the experimental findings. Only the comparison between machining time and tool wear rate (Pair 14) was not statistically significant ($p = 0.288$), suggesting that while both are influenced by spindle speed and feed rate, their relationship is not directly proportional.

3.2.5. Comparison with literature

Overall, the findings align well with previous studies. Ankit et al. [2] demonstrated that optimized feed rates and cutting speeds significantly enhance MRR during face milling, while Irawan et al. [8] emphasized the trade-offs between tool life and productivity in high-speed machining. Similarly, Jaiganesh et al. [10] highlighted that increasing depth of cut improves productivity but must be carefully balanced to avoid excessive tool wear. This study thus confirms that careful optimization of spindle speed, feed rate, and depth of cut is essential for maximizing material removal while minimizing machining time and managing tool wear—a conclusion strongly supported by contemporary research [1–8, 10, 12, 14].

4. Conclusion

This study underscores the significant influence of spindle speed, feed rate, and depth of cut on the machining performance of AISI 1018 mild steel using a diamond cutting tool. The results clearly demonstrate that optimizing these parameters is crucial for enhancing material removal rate, surface finish, and overall machining efficiency. The superior hardness and wear resistance of the diamond tool contributed to improved surface integrity and extended tool life, even under varying machining conditions. Higher spindle speeds generally improved surface quality, while a balanced selection of feed rate and depth of cut was essential to maximize material removal without inducing excessive tool wear or thermal damage. The interplay among these parameters and the cutting tool material directly influenced machining stability and process reliability. These findings provide a foundation for developing optimized, high-precision machining strategies, supporting sustainable manufacturing practices and

superior performance in industrial applications involving AISI 1018 mild steel.

Acknowledgements: The authors acknowledge the following institutions for their support: Benson Idahosa University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical and Electrical Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria; and Igbinedion University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Okada, Edo State, Nigeria. The authors extend their gratitude for the technical and infrastructural support provided during the research process, which significantly contributed to the successful completion of this study.

Conflict of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding Information: The authors declared that this study has received no financial support.

Author Contributions: The authors confirm their responsibilities for the design of the study, data collection, analysis and interpretation of the results, and preparation of the manuscript.

Data Availability Statement: The data generated and/or analyzed during this study are not publicly available but can be provided by the corresponding author upon reasonable request.

References

- [1]. Acevedo, C., Penaloza, Guillermo, E., Valencia, Milton, F., Coba, Salcedo. (2018). *A comparative study of the cutting parameter in milling process under different material*, Contemporary Engineering Sciences, 11(41): 2001-2008.
- [2]. Ankit, S., Anoop, S., Kamaljeet, S., Abhishek, S., Amrinder, S., Uppal. (2024). *Parametric optimization for material removal rate during face milling: using experimental and mathematical modelling approach*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 1(1): 25-38.
- [3]. Bharat, S. (2020). *Effect of parameters like spindle speed, depth of cut, and feed rate on the cutting force of a single point cutting tool*, International Journal of Engineering and Advanced Science Technology, 4(12): 94-101.
- [4]. B., Krishna, Murthy. (2018). *Prediction of process parameters for optimal material removal rate using artificial neural network (ANN) technique*. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 6(1): 237-242.
- [5]. Fnides, M. (2023). *Optimization and mathematical modelling of surface roughness criteria and material removal rate when milling C45 steel using rsm and desirability approach*, Journal of Mechanical Engineering, 20(3): 45-62.
- [6]. Fredrick, J., Otim, Seong, J., Choi. (2015). *Influence of cutting parameters on energy consumption and material removal rate in turning process*, Applied Mechanics and Materials, 799: 282-287.
- [7]. Imhade, P., Okokpujie, Lagouge, K., Tartibu. (2023). *Material removal rate optimization under ANN and QRCCD*, Advances in Manufacturing Engineering, 1(1): 215-227.
- [8]. Irawan, M., Azharuddin, A., Slamet, R. (2019). *Pengaruh spindle speed, feed rate, dan depth of cut terhadap akurasi hasil permesinan pada mesin cnc*

- router 3 sumbu, Indonesian Journal of Mechanical Engineering, 5(2): 67-75.
- [9]. Ival, I., Zaldy, K., Erwanto, E. (2021). *Analisis material removal rate pada proses cnc milling terhadap material AISI 1045*, Jurnal Teknik Mesin Indonesia, 9(1): 55-62.
 - [10]. Jaiganesh, V., Yokes, B., Kumar, P., Sevvell, A.J., Balaji. (2017). *Optimization of process parameters on commercial mild steel using taguchi technique*, International Journal of Engineering and Technology, 7(1): 30-37.
 - [11]. János, K., Viktor, M., István, D. (2018). *Comparative analysis of machining procedures*, Machines, 6(2): 13-21.
 - [12]. Karlapudi, G., Gopi, N. (2017). *Optimization of cylindrical grinding process parameters on material removal rate of En21am steel*, International Journal of Research, 6(7): 48-53.
 - [13]. Krisko, G., Aziz, A. (2019). *Effect of cutting speed, feed-rate, and depth of cut on the surface roughness level of ST-37 steel in shaping process*, Indonesian Journal of Engineering Technology, 2(2): 25-31.
 - [14]. Latif, A.A., Ibrahim, M., Amran, A.Z., Erween, AB. (2017). *A study on the effect of feed rate and cutting speed on surface roughness and material removal rate of mild steel*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 257(1): 012025.
 - [15]. Madan, V., Suparmaniam, L., Ahmad, R., Yusoff. (2016). *Investigation of surface roughness and tool wear length with varying combination of depth of cut and feed rate*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 114(1): 012010.
 - [16]. Mohapatra, C.R., Nayak, N.C. (2015). *Modeling and analysis of effect of cutting parameters on product quality in dry turning operation of mild steel using carbide & high speed steel tool*, International Journal of Engineering Research and Technology, 4(4): 189-193.
 - [17]. Mohd, R., Ibrahim, Tharmaraj, S., Nurul, A., Fadhlul, H., Mohammad, S., Mustapa, Ahmad, E., Ismail, Mohd, F., Hassan. (2017). *The effect of cutting speed and feed rate on surface roughness and tool wear when machining D2 steel*, Materials Science Forum, 909: 80-86.
 - [18]. Noor, A., Mohd-Lair, M., F. I., Mohd-Shahdun, A., Mohd-Tahir, J., Paulus-Dua. (2019). *The effects of spindle speed and feed rate on hole quality in drilling operation*, Mechanical Engineering Research, 5(1): 187-189.
 - [19]. Obojoh, E., Francis-Akilaki, T. (2024). *Effect of some cutting parameters on surface finish of bright mild steel*, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 28(4): 217-225.
 - [20]. Phan, V., Nghi. (2024). *An experimental investigation of cutting condition influences on hard milling of AISI D2 tool steel*, Engineering and Technology Journal, 9(5): 312-319.
 - [21]. Ritesh, K., Singh. (2018). *Concurrent optimization and an experimental analysis of face milling operation parameters for optimal performance on mild steel*, International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 6(2): 91-96.
 - [22]. Yıldız, S., Yıldız, A. (2022). *Investigation of the effects of different parameters on the performance of a solar air heater with artificial roughness*, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 28(5): 1011-1019.
 - [23]. Lalor, N., Petrosino, A. (2002). *A comparison of the performance of several time-frequency representations for the detection of transient signals*, Journal of Sound and Vibration, 246(3): 467-487.
 - [24]. Baraniuk, R. G., Jones, D. L. (2003). *A signal-dependent time-frequency representation: Optimal kernel design*, Journal of Sound and Vibration, 267(3): 603-627.
 - [25]. Olodu, D. D. (2018). *Optimization and analysis of cutting tool geometrical parameters using Taguchi method*, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 22(3): 346-349.
 - [26]. Olodu, D. D. (2021). *Modelling and validation of the production parameters of unalloyed aluminium sheets*, Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation, 8(1): 94-108.
 - [27]. Olodu, D. D., Okagbare, G. (2021). *Modelling and experimental investigation of copper-zinc alloy using split-split plot design*, International Journal of Engineering and Innovative Research, 3(3): 175-186.
 - [28]. Olodu, D. D., Erameh, A. (2023). *Optimization of the effects of process parameters on the tensile strength of developed aluminium roofing sheets using taguchi method*, The International Journal of Materials and Engineering Technology, 6(2): 31-40.
 - [29]. Akkuş, Harun, Yaka, Harun. (2018). *Optimization of turning process by using taguchi method*, Sakarya University Journal of Science, 22(5): 1444-1448.
 - [30]. Yaka, Harun, Akkuş, Harun, Uğur, Levent. (2016). *AISI 1040 çeliğinin tornalamasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin taguchi metodu ile optimizasyonu*, Celal Bayar University Journal of Science, 12(2).
 - [31]. Somatkar, A. A., Dwivedi, R., Chinchani, S. S. (2024). *Enhancing surface integrity and quality through roller burnishing: A comprehensive review of parameters optimization and applications*, Communications on Applied Nonlinear Analysis, 31(1s): 151-169.
 - [32]. Dwivedi, R., Somatkar, A. A., Chinchani, S. S. (2024). *Modeling and optimization of roller burnishing of Al6061-T6 process for minimum surface roughness, better microhardness, and roundness*, Obrabotka Metallov (Tekhnologiya, Oborudovanie, Instrumenty) = Metal Working and Material Science, 26(3): 52-65.



Araştırma Makalesi / Research Article

Investigation of the effect of various factors on hair loss using machine learning techniques

Çeşitli faktörlerin saç dökülmesine etkisinin makine öğrenmesi teknikleriyle incelenmesi

Murat Aslan^{1*} , Berkant Baş¹ , Bekir Parlak¹

¹ Amasya University, Department of Computer Engineering, Amasya, Turkey

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: bekir.parlak@amasya.edu.tr

Makale Bilgileri / Article Info	Abstract
Keywords Algorithm Hair Loss Engineering Original studies Machine Learning Data Mining	Nowadays, hair loss has become a big problem for people in terms of psychology, aesthetics and many other aspects. Anxiety, stress, irregular nutrition, genetic and environmental factors are among the main causes of hair loss. This study was carried out to determine the various factors affecting hair loss and to test the suitability of machine learning and data mining methods in this study process. Analyses were made with many machine learning algorithms using different data sets. According to the results, while coffee consumption, which is one of the factors that has the most effect on hair loss in the first data set, was seen to affect hair loss by 95%, the factors in the second data set were seen to have less effect on hair loss compared to the factors in the first data set. These results show that we can use machine learning algorithms as an effective tool in the process of better understanding the hair loss problem and early diagnosis.
Anahtar Kelimeler Algoritma Saç Dökülmesi Mühendislik Özgün çalışmalar Makine Öğrenimi Veri Madenciliği	Öz Günümüzde saç dökülmesi, insanlar için psikolojik, estetik ve birçok açıdan büyük bir sorun haline gelmiştir. Kaygı, stres, düzensiz beslenme, genetik ve çevresel faktörler saç dökülmesinin temel nedenleri arasında yer almaktadırlar. Bu çalışma da saç dökülmesini etkileyen çeşitli faktörleri belirlemek ve bu çalışma sürecinde makine öğrenimi ve veri madenciliği yöntemlerinin uygunluğunu test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı veri setleri kullanılarak birçok makine öğrenimi algoritmaları ile analizler yapılmıştır. Sonuçlara göre ilk veri setinde saç dökülmesi üzerinde en çok etkiye sahip etkenlerden kahve tüketimi %95 oranında etkilediği görülürken, ikinci veri setindeki etkenler ilk veri setindeki etkenlere oranla saç dökülmesine etkisi daha yetersiz olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar saç dökülmesi sıkıntısının daha iyi idrak edilmesi ve erken teşhis sürecinde makine öğrenimi algoritmalarının etkin bir araç olarak kullanabileceğimizi göstermektedir.
Makale tarihçesi / Article history Geliş / Received: 24.04.2025 Düzeltilme / Revised: 15.05.2025 Kabul / Accepted: 22.06.2025	

1. Introduction

Hair is considered an important component of an individual's overall appearance [1]. Hair loss is a condition that most individuals can experience and occurs because of genetic and environmental factors. Hair loss is not life-threatening, but it is distressing and significantly impacts the patient's quality of life [2]. For most people, hair loss brings with it a loss of self-esteem, negative effects on social life, and increased feelings of depression [3]. Health factors such as protein and keratin amounts, which are important for the structure of the hair, the number of micronutrients and body water content have a significant effect on hair loss. The human scalp contains approximately 100,000 hair follicles, 90% of which require essential elements such as proteins, vitamins and minerals to produce healthy hair [4]. In addition, factors such as stress levels are often considered as causes of hair loss.

This article aims to examine the factors affecting hair loss through two data sets. The aim is to determine the main factors that have a significant impact on hair loss based on the data. It has been some suggestions and comments to reduce hair loss based on these results.

1.1. Scientific studies on hair loss

Artificial neural networks can be used to indicate the frequency of hair loss. Some of the reasons affecting hair loss, the parameters evaluated by the doctor and the hair specialist are used in neural networks [7]. Artificial Neural Networks are widely used for pattern recognition and system detection. Networks consist of nonlinear computational objects moving in parallel. The feature of ANN is that they can identify the environment and increase efficiency at the time of learning [8-10]. Thanks to this efficiency, the methods used are used to detect hair loss. With the regression estimate and the percentage output it gives, it has been tried to make the work of experts easier



and to prevent a loss of time in interpreting the output of long-running analyses. Thanks to the classification methods, early diagnosis has been made easier for humanity by obtaining the results of whether it is present or not. Due to these limitations, advanced tools and techniques have been developed and tested using deep learning. Gender, age, zinc content, iron content, anemia and cosmetic use. These methods have been shown to be highly successful with a neural network built with the Levenberg-Marquardt algorithm [11]. When using Support Vector Machine (SVM), the separation of Gauss (DoG) filters is considered for feature determination [12]. Deep learning to classify amounts of baldness and hair loss in facial photographs [13] or other methods have been introduced, such as classifying four common scalp hair signs [14]. In a study [20], it is proposed a deep learning model capable of analyzing scalp disorders with high accuracy. Utilizing this model, researchers may anticipate scalp diseases, facilitating effective treatment through mobile phones by merely providing images of the conditions. Also, it [21] introduces an advanced healthcare platform for assessing the severity of six prevalent scalp hair disorders: dryness, oiliness, erythema, folliculitis, dandruff, and hair loss. To develop an appropriate scalp image classification model, we evaluated three deep learning architectures: ResNet-152, EfficientNet-B6, and ViT-B/16. Of the three evaluated deep learning models, the ViT-B/16 model had the highest classification performance, achieving an average accuracy of 78.31%. In the study [22], it employs deep learning algorithms on photos of hairy scalps. Issues related to a hairy scalp are typically detected by non-professionals at hair salons, who may offer advice to those experiencing these concerns. Moreover, several prevalent scalp issues exhibit similarities, leading to potential misdiagnoses by non-experts. Consequently, scalp issues have deteriorated. The study involved the implementation and comparison of the deep-learning technique, namely the ImageNet-VGG-f model Bag of Words (BOW), alongside machine-learning classifiers, as well as the histogram of oriented gradients (HOG) and pyramid histogram of oriented gradients (PHOG) with machine-learning classifiers.

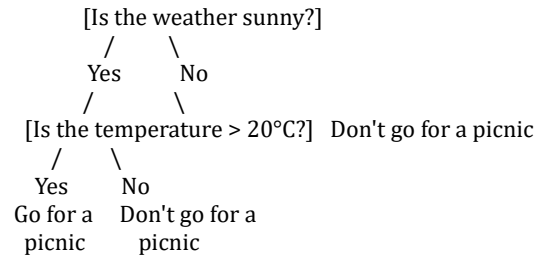
2. Methodologies

In this study, classification and regression algorithms were used. Classification algorithms from these algorithms; Decision Trees, Random Forest, Support Vector Machines (SVM) algorithms. Regression Algorithms, Random Forest, Decision Trees, XGBoost algorithms.

2.1 Classification

2.1.1. Decision tree

Decision trees are one of the most important methods for data mining; they provide us with ease of use. It is a supervised classification model that is generally used in many methods because it tries to eliminate uncertainties and is robust even in missing data [5]. Decision trees create a model that separates examples from a dataset based on a set of decision rules. These rules are organized into branches of the tree, and each branch divides and classifies the data according to a specific feature. Below is a decision tree model that shows whether to go on a picnic if the weather is sunny or not.



Explanation:

- First question: **Is the weather sunny?**
- If **Yes**, check the temperature.
- If it's **above 20°C** →  Go for a picnic.
- If it's **not** →  Don't go for a picnic.
- If **No**, directly →  Don't go for a picnic.

2.1.2. Random forest

It is one of the supervised learning algorithms and is used to solve classification and regression problems. The Random Forest classifier is a meta-estimator that fits a series of Decision Tree Classifiers to various subsamples of the dataset and uses averaging to improve prediction accuracy and control overfitting [15].

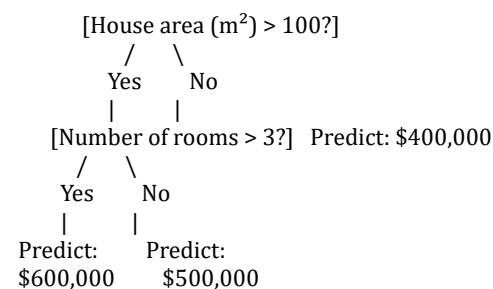
2.1.3. Support vector machines

It is one of the supervised learning algorithms and is used to solve classification and regression problems. It is an effective method especially for nonlinear classifications and is widely used in classification problems. The basic logic of the Support Vector Machine Algorithm, which is the Support Vector Machine (SVM), is to determine the best solution that can be divided into data lines [16].

2.2. Regression

2.2.1. Decision tree

A regression decision tree is an algorithm used to predict numerical values. It treats the data as a tree, divides it into branches, and calculates a numerical value estimate for each branch. This estimate is calculated by averaging the samples. It is often used in complex problems.



Explanation:

- **Root node:** Is the house larger than 100 m²?
- If **yes**, check: Are there more than 3 rooms?
- At the **leaf nodes**, the tree gives a **numerical prediction** (house price).
- These predictions are usually the **average** of training examples that fall into that path.

2.2.2. Random forest

Random Forest Regression and Decision Tree Regression, which work in the background, try to explain the trained and tested data in detail [6]. These models work by learning patterns from the training data and dividing the data into smaller subsets based on the feature values. In Decision Tree Regression, a single tree iteratively splits the input region and places a fixed value at each leaf node. On the other hand, Random Forest Regression creates an ensemble of multiple decision trees, each trained on a random subset of the data and features and averages their outputs to reduce overfitting and increase prediction accuracy.

2.2.3. XGBoost

XGBoost is an optimized gradient boosting library that works with decision trees. Unlike random forest, when creating the final estimate in XGBoost, the linear sum of all trees is taken and the goal of each tree is to minimize the residual error of the previous trees [17]. In other words, each new tree is trained to predict the residuals of the combined prediction of the previous trees, which gradually increases the accuracy of the model with each iteration. This sequential learning strategy allows XGBoost to focus on data points that are harder to predict, effectively reducing bias and variance.

3. Datasets

Two different datasets were used in this study. These datasets were taken from the Kaggle website [18][19]. Our first dataset includes many features based on hair loss. These are hair loss, staying up late, pressure level, amount of coffee consumed, brain working hours, stress level, shampoo brand, swimming, hair washing, hair oiliness, dandruff and libido levels. In total, there are 401 data and 13 features in this dataset. Regression and classification estimates were made by taking these features into account. The other dataset also includes many features based on hair loss. These are total protein, total keratin, hair texture, vitamin, manganese, iron, calcium, body water content, stress level, liver data and hair loss. There are 430 data and 11 features in total. Regression and classification estimates were made in light of these features. Although some data features are similar, most of them differ. The causes of hair loss were examined in more detail by comparing them.

4. Experimental Study

Table 1. Values and ranking factors affecting hair loss

Feature	Importance
Coffee_consumed	0.240763
Libido	0.166285
Stay_up_late	0.088098
Day	0.080619
Brain_working_duration	0.071987
Hair_grease	0.070410
Stress_level	0.062443
Dandruff	0.057863
Pressure_level	0.042578
Month	0.042410
School_assessment	0.031465
Hair_washing	0.026514
Shampoo_brand	0.009804
Swimming	0.007873
Year	0.000889

According to the Table 1, the primary influencing factor in the relevant model is coffee consumption (24.08%). The result here shows that coffee consumption is one of the strongest factors on hair loss. Secondly, there is the libido (16.63%) variable. These two factors play an important role in determining the prediction percentage of the model. The factors following this duo are, respectively, going to bed late (8.8%), day variable (8.06%), and brain working time (7.19%). These variables are called medium-level effects. It helps us make sense of the model, it is not as determinative as coffee consumption and libido. Other variables that follow the variables we mentioned, hair oil (7.04%), dandruff (5.76%), and pressure level (4.26%), have less effect compared to the others. The variables with the lowest effect are shampoo brand (0.90%), swimming (0.78%), and year (0.08%). These are the results we obtained by running the first data set we have with machine learning techniques on the necessary platform (Spyder).

Table 2. Classification accuracy rates with most influencing factor

ACCURACY	%85
F1-SCORE	%83.98
ROC-AUC	%85.03

According to the Table 2, coffee consumption and libido rates are the first data set are the highest and the study was examined according to these variables. Accuracy value is 85%, F1-Score value estimates this accuracy percentage as 83.98% with the balance of false positives and false negatives, ensuring that accuracy is guaranteed according to the F1-Score and Roc-Auc determines the discrimination power as 85.03%, indirectly affecting the accuracy percentage.

4.1.1. Classification results

Table 3. Classification results in dataset 1

Model	Accuracy	F1-Score	ROC-AUC
Random Forest	%92.5	%92.47	%98.69
Decision Tree	%95	%94.90	%90.42
SVM	%90	%90.04	%96.12

When we examine in the Table 3, Decision Tree has become the model that shows the most successful performance with a rate of (95%). When we examine the other models, it is seen that the intersections of Random Forest - ROC-AUC (98.69%) and Random Forest - F1 Score (92.47%) have a stronger overall performance. We see that the intersection of SVM - ROC-AUC (96.12%) has good discrimination power. However, the accuracy and F1-Score values are seen to be lower than the other models. The results show that different qualities should be given priority depending on the purpose of the application.

4.1.2. Regression results in dataset 1

Table 4. Regression results

Model	MAE	RMSE	R ²
Random Forest	%15.89	%36.27	%87.16
Decision Tree	%10	%35.36	%87.80
XGBoost	%13.74	%31.45	%90.35

When we take in the Table 4 as a reference, the XGBoost - R² intersection has reached the highest probability value in the table by reaching 90.35%. The XGBoost - RMSE intersection

(31.45%) has the lowest value. This shows that the model is more consistent compared to other models. Although the Decision tree model has a low MAE value (10%), we find that XGBoost is generally behind in terms of performance. When we examine the RF model, we see that it produces lower R^2 (87.16%) and higher error values. Based on these results, we can say that XGBoost is the most successful model.

4.2 Values and ranking of factors affecting hair loss according to the second data set related table

Table 5. Values of factors affecting hair loss

Feature	Importance
Vitamin	0.110190
Manganese	0.107312
Liver_data	0.107203
Calcium	0.102192
Total_protein	0.101526
Stress_level	0.098991
Iron	0.098597
Hair_texture	0.096331
Body_water_content	0.089948
Total_keratine	0.0877711

According to the Table 5, the primary effect factor in the relevant model is vitamin (11.01%). The result obtained from this shows that vitamin is one of the strongest factors on the hair loss effect. The second variable is manganese (10.73%). These two factors play an important role in determining the prediction percentage of the model. The factors following this pair are late liver_data (10.72%), calcium (10.21%), total protein (10.15%), respectively. These variables mentioned are called medium-level effects. It helps us to make sense of the model, it is not as decisive as vitamin and manganese. According to the results of this research, vitamin and manganese rates are the highest and the study is examined according to these variables. These are the results we obtained by running the second data set we have with machine learning techniques on the necessary platform (Spyder).

Table 6. Classification accuracy rates with most influencing factor

ACCURACY	%23.26
F1-SCORE	%22.99
ROC-AUC	%55.88

According to the Table 6, accuracy value is 23.26%, and F1-Score value estimates this accuracy percentage as 22.99% with the balance of false positives and false negatives, allowing the accuracy to be guaranteed according to F1-Score, and Roc-Auc indirectly affects the accuracy percentage by determining the discrimination power at 55.88% of the accuracy.

4.2.1. Classification results in dataset 2

Table 7. Classification results

Model	Accuracy	F1-Score	ROC-AUC
Random Forest	%17.44	%17.39	%54.04
Decision Tree	%18.6	%18.86	%51.46
SVM	%10.47	%7.98	%50.84

When we examine the Table in 7, Decision Tree (18.6%) is the model that shows the most successful performance. When we examine the other models, it is seen that the intersections of Random Forest - ROC-AUC (54.04%) and Random Forest - F1 Score (17.39%) exhibited a stronger overall performance. We see that the intersection of SVM - ROC-AUC (50.84%) has a good discrimination power. However, the accuracy and F1-Score values of SVM are seen to be lower than the other models. The results show that different qualities should be given priority depending on the purpose of the application.

4.2.2. Regression results in dataset 2

Table 8. Regression results

Model	Accuracy	F1-Score	ROC-AUC
Random Forest	1.5643	1.8023	-0.0533
Decision Tree	2.0349	2.5404	-1.0926
XGBoost	1.6157	1.9293	-0.2070

When we take the Table in 8 as reference, the Decision Tree - RMSE intersection has reached the highest value in the table by reaching the rate of 2.5404. The Decision Tree - R^2 intersection has the lowest value of -1.0926. This shows that the model is more consistent compared to other models. We see that the RF model has a low MAE value (1.5643). When we continue with the RF model, it is seen that there is a higher R^2 value. When this table is taken as basis, it is seen that the most successful model is RF. It has the lowest MAE and RMSE values compared to other models. This makes this model the most successful.

4.3. Comparison of two experiments

The first data set showed better and higher performance in classification and regression cases, especially the Decision Tree model saw 95% accuracy. In addition, the most affecting factor, "coffee_consumed", provides a strong classification accuracy on its own. On the other hand, the second data set shows low performance in all models, and accordingly, we comment that it does not produce impressive results. In the second data set, we find the best classification accuracy (18.6%) in the Decision Tree. When we look at the first data set, a strong regression model stands out (XGBoost, R^2 =%90). When we examine the second data set, we see that the R^2 values of the models are negative, and it is seen that they do not produce sufficient results in terms of explanation.

If we look at the result, the first data set gives more meaningful and more accurate results, has a stronger structure; while the second data set is weak in terms of the qualities we mentioned and the model.

Certain metrics were used while making these comparisons. These metrics are ACCURACY, F1-SCORE, ROC-AUC, MAE, RMSE and R^2 .

Classification Metrics:

Accuracy: The ratio of the number of correctly predicted examples by the model to the total number of examples. It is useful if the data is balanced, but can be misleading in unbalanced data sets.

F1-Score: A balanced average of Precision and Recall values. It is a more reliable success measure, especially in unbalanced class distributions.

ROC-AUC: Shows how well the model distinguishes between classes. The closer the AUC value is to 1, the better the classification success of the model.

Regression Metrics:

MAE (Mean Absolute Error): It is the average of the absolute values of the differences between the prediction and the true value. It is easy to interpret.

RMSE (Root Mean Square Error): The errors are squared, averaged, and then the square root is taken. It is more sensitive to large errors.

R^2 (Coefficient of Determination): Shows how much the model explains the change in the data. The closer it is to 1, the more successful the model becomes.

To provide a clearer comparative overview for the reader, the performance metrics of all applied models across both datasets are summarized in Table 9 and Table 10 below. The best-performing metrics for each evaluation category are emphasized in bold for visual clarity.

Table 9. Accuracy, F1-Score, and ROC-AUC comparison of all models on both datasets

Dataset	Model	Accuracy (%)	F1-Score (%)	ROC-AUC (%)
1	Decision Tree	95.00	94.90	90.42
1	Random Forest	92.50	92.47	98.69
1	XGBoost	-	-	-
2	Decision Tree	18.60	18.86	51.46
2	Random Forest	17.44	17.39	54.04
2	SVM	10.47	7.98	50.84

Table 10. MAE, RMSE, and R^2 results of regression models applied on both datasets

Dataset	Model	MAE	RMSE	R^2
1	Decision Tree	10.00	35.36	87.80
1	Random Forest	15.89	36.27	87.16
1	XGBoost	13.74	31.45	90.35
2	Decision Tree	2.03	2.54	-1.09
2	Random Forest	1.56	1.80	-0.05
2	SVM	-	-	-

4.4. Performance metrics and their purposes

To comprehensively assess the performance of the machine learning models employed in this study, a variety of evaluation metrics were utilized. These include classification metrics—Accuracy, F1-score, and ROC-AUC—and regression metrics—MAE, RMSE, and R^2 . Each of these serves a distinct analytical function in model validation and is well-supported in the machine learning literature [23–27].

Classification Metrics:

- Accuracy: Represents the proportion of correctly classified instances among all instances. While useful for balanced datasets, it may offer misleading insights in imbalanced scenarios [23].
- F1-score: The harmonic mean of precision and recall. Particularly effective in cases of class imbalance, where it provides a more holistic performance measure than accuracy alone [24].

- ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic - Area Under Curve): Reflects the model's ability to distinguish between classes. A value closer to 1.0 indicates a higher discriminative capability. It is especially useful when evaluating model behavior across different thresholds [25].

Regression Metrics:

- MAE (Mean Absolute Error): The average of the absolute differences between predicted and actual values. It is easy to interpret and less sensitive to outliers [26].
- RMSE (Root Mean Square Error): The square root of the average of squared errors. It penalizes larger errors more heavily and is suitable for applications where large deviations are undesirable [26].
- R^2 (Coefficient of Determination): Indicates the proportion of variance in the dependent variable explained by the model. A value close to 1 signifies high explanatory power, whereas negative values imply the model performs worse than a naive mean-based predictor [27].

The combined use of these metrics ensures a thorough and multidimensional evaluation of model performance, covering not only correctness and discrimination but also prediction stability and variance explanation.

5. Discussion

This study involves analyzing the factors affecting hair loss using machine learning methods using two different data sets. The first data set showed high performance in both classification and regression models, and as seen in Table 3, the Decision Tree model stood out with 95% accuracy. In addition, coffee consumption ("coffee_consumed") proved to be an important factor by providing strong classification accuracy on its own.

On the other hand, the second data set showed low performance in all models and could not produce impressive results. The best classification accuracy in this data set (18.6%) was obtained again with the Decision Tree model, as seen in Table 7. When the regression analysis was examined, the XG Boost model showed the strongest performance with 90% R^2 value in the first data set. However, the negative R^2 values of all models in the second data set reveal that the explanatory power of the data set is weak.

Additionally, other regression metrics such as Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) were also taken into account to assess prediction stability and consistency. In the first dataset, the XGBoost model produced the lowest RMSE (31.45), indicating the lowest overall deviation between predicted and actual values, especially in penalizing large errors. On the other hand, the Decision Tree model achieved the lowest MAE (10.00), reflecting smaller average prediction errors across instances. The closeness between MAE and RMSE values further supports the stability of these models. Conversely, in the second dataset, all models demonstrated significantly higher MAE and RMSE values, which—when considered alongside the negative R^2 values—confirms their limited predictive capability and suggests a weak structural relationship between input features and the hair loss outcome.

As a result, the first data set was both significant and had a stronger structure, while the second data set was insufficient in these qualities. The analysis shows that the effect of coffee consumption on hair loss is great. These findings suggest that machine learning and data mining are powerful tools for early detection and awareness of hair loss.

In addition to the accuracy metric, which reflects the overall proportion of correct predictions, further evaluation was conducted using complementary classification metrics such as F1-score and ROC-AUC. The F1-score, defined as the harmonic mean of precision and recall, is particularly relevant when class imbalance is present, as it accounts for both false positives and false negatives.

In this study, the F1-score values were closely aligned with the accuracy results (e.g., 94.90% F1-score vs. 95% accuracy in the Decision Tree model), which confirms that the classifier maintained a balanced predictive performance across classes. Furthermore, ROC-AUC scores, which quantify a model's discriminative power across all classification thresholds, were notably high for Random Forest (98.69%) and SVM (96.12%), indicating strong class separation capabilities. These findings underscore the robustness of the models not only in overall correctness but also in handling class-level distinctions effectively.

6. Results

In this study, the effects of two data sets with different characteristics on hair loss were evaluated using machine learning methods. As a result of the analysis, it was shown which factor played an important role in which data set. It is tested the effects of the factors on hair loss with classification and regression estimates, evaluated their reliability according to the F1 scores and showed their accuracy rates, and when it is compared the two data sets, it is observed that coffee consumption had a very large effect on hair loss, as can be seen in the experiments. As a result of these observations, machine learning and data mining showed us that it is an important and powerful way for early diagnosis and awareness.

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflicts of interest.

Funding Information: This study was not supported by any funding.

Author Contributions: The authors confirm their responsibilities for the design of the study, data collection, analysis and interpretation of the results, and preparation of the manuscript.

Data Availability Statement: The data generated and/or analyzed during this study are not publicly available but can be provided by the corresponding author upon reasonable request.

References

- [1]. Rushton, D. H., Norris, M. J., Dover, R., and Busuttill, N. (2002) *Causes of hair loss and the developments in hair rejuvenation*, International journal of cosmetic science, 24(1): 17-23.
- [2]. Phillips, T. G., Slomiany, W. P., and Allison, R. (2017) *Hair loss: common causes and treatment*, American family physician, 96(6): 371-378.
- [3]. Wells PA, Willmoth T, Russell RJ. (1995) *Talih mi lehinde? Kel mi? Erkeklerde saç dökülmesinin psikolojik bağlantıları*. Br J Psikoloji. 86:337-44.
- [4]. Shapiro J. (2007) *Clinical practice Hair loss in women*, N Engl J Med. 357(16):1620-30.
- [5]. Hastie TJ, Tibshirani, RJ, Friedman JH. (2009) *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction*. Second Edition. Springer.
- [6]. Nuray, S. E., Gençdal, H. B., and Arama, Z. A. (2021) *Zeminlerin kıvam ve kompaksiyon özelliklerinin tahmininde rastgele orman regresyonu yönteminin uygulanabilirliği*, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(1): 265-281.
- [7]. Esfandiari, A., Kalantari, K. R., and Babaei, A. (2012) *Hair loss diagnosis using artificial neural networks*, International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), 9(5): 174.
- [8]. Haykin, S. (1999) *Neural networks: a comprehensive foundation*, Prentice hall.
- [9]. Mandic D. P. and Chambers J. A., (2001) *Recurrent neural networks for prediction: Learning algorithms, architectures and stability*, Wiley.
- [10]. Sureshkumar C. and Ravichandran T., *Character Recognition using RCS with Neural Network*.
- [11]. Chang, W.-J.; Chen, L.-B.; Chen, M.-C.; Chiu, Y.-C.; Lin, J.-Y. (2020) *ScalpEye: A Deep Learning-Based Scalp Hair Inspection and Diagnosis System for Scalp Health*, IEEE Access, 8, 134826-134837.
- [12]. Cho, T.S., Freeman, W.T., and Tsao, H. (2007) *A reliable skin mole localization scheme*, In Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Rio de Janeiro, Brazil, 14-21 October 2007.
- [13]. Benhabiles, H., Hammoudi, K., Yang, Z., Windal, F., Melkemi, M., Dornaika, F., and Arganda-Carreras, I. (2019) *Deep Learning based Detection of Hair Loss Levels from Facial Images*, In Proceedings of the Ninth International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA), Istanbul, Turkey, 6-9 November 2019.
- [14]. Chang, W.-J., Chen, L.-B., Chen, M.-C., Chiu, Y.-C., and Lin, J.-Y. (2020) *ScalpEye: A Deep Learning-Based Scalp Hair Inspection and Diagnosis System for Scalp Health*, IEEE Access 2020, 8, 134826-134837.
- [15]. Veranyurt, Ü., Deveci, A., Esen, M. F., and Veranyurt, O. (2020). *Makine öğrenmesi teknikleriyle hastalık sınıflandırması: Random Forest, K-Nearest Neighbour Ve Adaboost Algoritmaları Uygulaması*, Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi, 6(2): 275-286.

- [16]. Çiçek, A., and Arslan, Y. (2020) *Müşteri kayıp analizi için sınıflandırma algoritmalarının karşılaştırılması*, İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi, 1(1): 13-19.
- [17]. Karatekin, C., and Başaran, T. (2022) *Gün öncesi piyasasında elektrik enerjisi fiyatının veri analizi ile tahmin edilmesi*, Journal of the Institute of Science and Technology, 12(4): 2075-2084.
- [18]. Web Page: Luke Hair Loss Dataset <https://www.kaggle.com/datasets/lukexun/luke-hair-loss-dataset>
- [19]. Web Page: Hair loss dataset <https://www.kaggle.com/datasets/brijlaldhankour/hair-loss-dataset>
- [20]. Krishnamoorthy, N., Jayanthi, P., Kumaravel, T., Sundareshwar, V. A., and Harris, R. S. J. (2023) *Scalp disease analysis using deep learning models*, Applied and Computational Engineering, 2, 1003-1009.
- [21]. Ha, C., Go, T., and Choi, W. (2024) *Intelligent healthcare platform for diagnosis of scalp and hair disorders*, Applied Sciences, 14(5): 1734.
- [22]. Wang, W. C., Chen, L. B., and Chang, W. J. (2018) *Development and experimental evaluation of machine-learning techniques for an intelligent hairy scalp detection system*, Applied Sciences, 8(6): 853.
- [23]. Sokolova, M., and Lapalme, G. (2009) *A systematic analysis of performance measures for classification tasks*, Information Processing and Management, 45(4): 427-437.
- [24]. Powers, D. M. W. (2011) *Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation*, Journal of Machine Learning Technologies, 2(1): 37-63.
- [25]. Fawcett, T. (2006) *An introduction to ROC analysis*, Pattern Recognition Letters, 27(8): 861-874.
- [26]. Chai, T., and Draxler, R. R. (2014) *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?*, Geoscientific Model Development, 7(1): 1247-1250.
- [27]. Yin, Y., and Jin, Y. (2020) *An improved R-squared statistic for evaluating regression models*, Journal of Applied Statistics, 47(6): 1114-1130.



Derleme Makalesi / Review Article

A Review on the applications of fluid mechanics in oil and gas industries in Nigeria

Nijerya petrol ve gaz endüstrisinde akışkanlar mekaniğinin uygulamalarına ilişkin bir derleme

Dickson David Olodu^{1*}, Francis Inegbedion², Osagie Imevbore Ihenyen³

¹Benson Idahosa University, Department of Mechanical Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria

²University of Benin, Department of Production Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria

³University of Benin, Department of Production Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: dolodu@biu.edu.ng

Makale Bilgileri / Article Info	Abstract
Keywords <i>Drilling operations</i> <i>Enhanced oil recovery</i> <i>Fluid mechanics</i> <i>Oil and gas industry in Nigeria</i> <i>Pipeline transportation</i> <i>Reservoir engineering</i> Anahtar Kelimeler <i>Sondaj operasyonları</i> <i>Geliştirilmiş petrol geri kazanımı</i> <i>Akışkanlar mekaniği</i> <i>Nijerya petrol ve gaz endüstrisi</i> <i>Boru hattı taşımacılığı</i> <i>Rezervuar mühendisliği</i> Makale tarihçesi / Article history <i>Geliş / Received:</i> 08.01.2025 <i>Düzeltilme / Revised:</i> 27.01.2025 <i>Kabul / Accepted:</i> 05.02.2025	Fluid mechanics plays a pivotal role in the Nigerian oil and gas industry, where efficient extraction, transportation, and processing of hydrocarbons depend on the effective management of fluid flow. This review explores the diverse applications of fluid mechanics in drilling operations, reservoir engineering, pipeline transportation, enhanced oil recovery, and offshore operations. The study highlights the importance of fluid behavior in drilling mud circulation, reservoir pressure management, and multiphase flow systems. Additionally, it emphasizes the role of fluid dynamics in artificial lift systems, separation processes, and gas flaring optimization. Advanced technologies such as Computational Fluid Dynamics (CFD), real-time flow monitoring, and smart sensors have further enhanced the industry's ability to manage complex fluid systems. Key challenges, including pipeline integrity, flow assurance, and pressure drop management, are discussed alongside innovative solutions aimed at improving operational efficiency and environmental sustainability. The review underscores the need for continuous investment in research and development, workforce training, and the adoption of modern technologies to address industry-specific challenges. By leveraging fluid mechanics principles, the Nigerian oil and gas sector can enhance productivity, reduce operational risks, and minimize environmental impact, contributing to sustainable economic growth. This study serves as a valuable resource for engineers, researchers, and policymakers seeking to optimize fluid management practices in the oil and gas industry. Öz Akışkanlar mekaniği, hidrokarbonların verimli bir şekilde çıkarılması, taşınması ve işlenmesinin akışkan akışının etkin yönetimine bağlı olduğu Nijerya petrol ve gaz endüstrisinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu derleme, sondaj operasyonları, rezervuar mühendisliği, boru hattı taşımacılığı, geliştirilmiş petrol geri kazanımı ve açık deniz operasyonlarındaki akışkanlar mekaniğinin çeşitli uygulamalarını incelemektedir. Çalışma, sondaj çamuru dolaşımı, rezervuar basıncı yönetimi ve çok fazlı akış sistemlerinde akışkan davranışının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, yapay kaldırma sistemleri, ayırma işlemleri ve gaz yakma optimizasyonunda akışkan dinamiğinin rolüne dikkat çekmektedir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), gerçek zamanlı akış izleme ve akıllı sensörler gibi ileri teknolojiler, endüstrinin karmaşık akışkan sistemlerini yönetme yeteneğini daha da artırmıştır. Boru hattı bütünlüğü, akış güvencesi ve basınç düşüşü yönetimi gibi temel zorluklar, operasyonel verimliliği ve çevresel sürdürülebilirliği artırmaya yönelik yenilikçi çözümlerle birlikte ele alınmaktadır. İnceleme, endüstriye özgü zorlukların üstesinden gelmek için araştırma ve geliştirmeye, iş gücü eğitime ve modern teknolojilerin benimsenmesine sürekli yatırım yapılması gerektiğinin altını çizmektedir. Akışkanlar mekaniği ilkelerinden yararlanarak Nijerya petrol ve gaz sektörü, üretkenliği artırabilir, operasyonel riskleri azaltabilir ve çevresel etkiyi en aza indirerek sürdürülebilir ekonomik büyümeye katkıda bulunabilir. Bu çalışma, petrol ve gaz endüstrisinde akışkan yönetimi uygulamalarını optimize etmeyi amaçlayan mühendisler, araştırmacılar ve politika yapıcılar için değerli bir kaynak niteliğindedir.

1. Introduction

Fluid mechanics plays a pivotal role in the oil and gas industry, serving as the foundation for understanding and optimizing fluid behavior in various exploration, production, and refining processes. The application of fluid mechanics principles ensures efficient hydrocarbon extraction, transportation, and processing, which are critical for Nigeria's oil and gas sector—a major contributor to the nation's economy [1, 2]. Fluid mechanics covers areas such as multiphase flow, reservoir simulation, pipeline transportation, enhanced oil recovery (EOR), and drilling fluid dynamics [3, 4, 5]. In Nigeria, where oil and gas reserves are primarily located in the Niger Delta region, fluid mechanics provides insights into managing reservoir pressures, minimizing flow assurance issues, and improving production efficiency [6, 7, 8].

The Nigerian oil and gas sector operates in diverse terrains, including onshore, offshore, and deepwater fields, each presenting unique challenges requiring tailored fluid mechanics applications [9, 10, 11]. Advancements in computational fluid dynamics (CFD) have revolutionized the analysis and prediction of fluid behavior in complex systems [9, 10]. CFD tools are now widely employed to model multiphase flows, optimize drilling operations, and enhance the performance of gas-liquid systems [12, 13, 14]. Effective fluid management techniques, including the use of drilling muds and waterflooding strategies, are crucial for sustaining oil well productivity in Nigeria's offshore and onshore fields [15, 16].

Fluid mechanics also plays a significant role in addressing environmental challenges associated with hydrocarbon extraction, such as controlling fluid leaks, preventing blowouts, and minimizing pollution [17]. Researchers have also highlighted the importance of fluid mechanics in mitigating hydrate formation and wax deposition in pipelines, which are common operational challenges in Nigeria's oil infrastructure [18].

Furthermore, fluid mechanics contributes to the efficient design of surface facilities, including separators, compressors, and heat exchangers, which are critical for hydrocarbon processing [19, 20]. Innovations in drilling technologies, supported by fluid mechanics research, continue to enhance well stability and reduce non-productive time [21]. As Nigeria's oil and gas sector faces growing challenges from global energy transitions, sustainable fluid management practices have become essential for ensuring long-term resource exploitation and environmental conservation [22, 23].

This review aims to provide a comprehensive analysis of how fluid mechanics principles are applied in various segments of the petroleum industry, from drilling and transportation to enhanced oil recovery and environmental management. By systematically evaluating these applications, the study highlights key advancements, operational challenges, and emerging trends that shape the efficiency and sustainability of Nigeria's oil and gas sector.

The motivation for preparing this review stems from the need to address specific gaps in the literature concerning the application of fluid mechanics in Nigeria's petroleum industry. While numerous studies have explored fluid dynamics in oil and gas operations globally, there is a limited body of research focusing specifically on Nigeria's context. The country's unique operational challenges, including issues related to pipeline vandalism, flow

assurance in the Niger Delta region, and the economic feasibility of enhanced oil recovery techniques, necessitate a localized review. Furthermore, existing literature often provides fragmented discussions on individual aspects of fluid mechanics without offering a holistic perspective on how these principles collectively contribute to the sector's efficiency and sustainability.

This review seeks to bridge these gaps by compiling and analyzing relevant studies, comparing different fluid mechanics applications, and discussing their practical implications for Nigeria's petroleum industry. Additionally, by incorporating recent developments in computational fluid dynamics (CFD), multiphase flow modeling, and emerging technologies in flow assurance, this study aims to serve as a valuable resource for engineers, researchers, and policymakers working towards optimizing oil and gas operations in Nigeria. The insights provided will not only enhance the understanding of fluid mechanics applications but also inform future research directions and industry best practices.

2. Methodology or Criteria for Literature Selection

This review was conducted through a systematic analysis of existing literature on the applications of fluid mechanics in Nigeria's oil and gas industry. The study employed a structured approach to identify, evaluate, and synthesize relevant research articles, technical reports, and industry case studies. The selection of literature was based on predefined criteria to ensure relevance, reliability, and comprehensiveness. The primary sources of information included peer-reviewed journals, conference proceedings, and reports from reputable organizations such as the Society of Petroleum Engineers (SPE), Nigerian National Petroleum Corporation (NNPC), and the Department of Petroleum Resources (DPR). Databases such as Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, and IEEE Xplore were extensively searched to retrieve relevant publications.

The literature selection process involved the use of specific keywords, including "fluid mechanics in oil and gas," "pipeline flow assurance," "drilling fluid dynamics," "enhanced oil recovery in Nigeria," and "multiphase flow in petroleum engineering." Studies published between 2015 and 2024 were prioritized to ensure that the review captured the most recent advancements and challenges in the field.

Inclusion criteria were based on the relevance of the study to fluid mechanics applications in Nigeria's oil and gas industry, availability of empirical data, and discussion of specific engineering solutions. Studies focusing solely on theoretical fluid mechanics without practical application in petroleum engineering were excluded. Additionally, non-English articles and publications with limited accessibility were not considered unless a comprehensive abstract provided sufficient insights.

A comparative analysis of different fluid mechanics applications, including enhanced oil recovery (EOR) methods, pipeline transportation techniques, and computational fluid dynamics (CFD) applications, was conducted. The effectiveness, cost implications, and adoption rates of various technologies were systematically examined. Furthermore, industry case studies were incorporated to highlight real-world applications of fluid mechanics principles in Nigeria's petroleum sector.

The findings were synthesized into thematic sections covering drilling operations, reservoir engineering, transportation, flow assurance, separation processes, and environmental sustainability. The review also assessed the economic and environmental impacts of fluid mechanics innovations while identifying gaps for future research and development. By providing a structured methodology, this review enhances the transparency and reproducibility of the study, ensuring that the insights presented contribute meaningfully to the field of petroleum engineering.

3. Applications of Fluid Mechanics in the Oil and Gas Industry

3.1 Drilling Operations

Fluid mechanics plays a fundamental role in drilling operations, particularly in the behavior and performance of drilling fluids, commonly referred to as drilling mud. These fluids serve multiple purposes, including cooling and lubricating the drill bit, stabilizing the wellbore, and transporting drill cuttings to the surface [1, 2]. Effective drilling fluid management requires a thorough understanding of fluid rheology, pressure losses, and flow regimes within the drill string and annulus [4]. Variations in mud density and viscosity must be carefully monitored to prevent formation damage, blowouts, and equipment failure [5, 6]. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are increasingly employed to predict mud flow behavior, optimize hydraulic parameters, and improve overall drilling efficiency [7]. Accurate control of fluid properties minimizes risks associated with differential sticking and wellbore instability [8].

3.2 Pipeline Transportation

Pipelines are the most efficient and cost-effective means of transporting crude oil, refined petroleum products, and natural gas over long distances. Fluid mechanics principles, particularly laminar and turbulent flow analysis, are essential in pipeline design and operation [8, 9]. Engineers rely on fluid dynamics models to predict pressure drops, optimize pump placement, and reduce frictional losses [9, 10]. Additionally, the study of multiphase flow in pipelines ensures the effective transportation of oil-gas-water mixtures without significant phase separation or slugging issues [11, 12]. Computational Fluid Dynamics (CFD) tools are frequently used to analyze pipeline flow behavior under various operating conditions, enabling operators to detect potential flow disruptions and address them proactively [13]. Effective application of fluid mechanics in pipeline systems minimizes energy consumption and reduces maintenance costs [13, 14]. Figure 1 shows the pipeline transportation of petroleum products.

3.3 Reservoir Engineering

Fluid mechanics is pivotal in reservoir engineering, where it is applied to understand and predict the movement of hydrocarbons within porous media. Darcy's Law forms the foundation for modeling fluid flow through reservoir rock formations, allowing engineers to estimate production rates and optimize extraction strategies [1, 7]. Multiphase flow models are employed to analyze the simultaneous movement of oil, gas, and water within reservoirs, providing critical insights into phase behavior and pressure distribution [6, 8]. Engineers utilize fluid dynamics simulations to optimize reservoir pressure management, prevent water and gas coning, and maximize ultimate recovery [15, 19]. Accurate modeling of fluid flow dynamics

enhances reservoir performance and minimizes the risk of early water breakthrough or bypassed hydrocarbons [11, 16].



Figure 1. Pipeline transportation of petroleum products [20, 21]

3.4 Enhanced Oil Recovery (EOR)

Enhanced Oil Recovery (EOR) techniques are critical for maximizing hydrocarbon extraction from mature reservoirs. These methods, including water flooding, gas injection, and chemical injection, rely heavily on fluid mechanics to optimize fluid displacement and improve sweep efficiency [12, 19]. Fluid dynamics models help predict phase behavior, miscibility, and fluid-fluid interactions, enabling engineers to design effective injection strategies [18, 21]. Water flooding, one of the most common EOR techniques, involves injecting water into reservoirs to maintain pressure and displace oil towards production wells [12, 18]. Similarly, gas injection techniques rely on fluid mechanics to ensure even gas distribution across the reservoir [22]. CFD simulations play a key role in optimizing EOR processes, reducing uncertainties, and improving recovery factors [17, 19].

3.5 Hydraulic Fracturing

Hydraulic fracturing, commonly known as fracking, is a critical technique for enhancing hydrocarbon production from unconventional reservoirs. The process involves injecting high-pressure fluid into subsurface rock formations to create and propagate fractures, allowing oil and gas to flow more freely towards the wellbore [9]. Fluid mechanics plays a pivotal role in designing fracturing fluids, optimizing injection rates, and predicting fracture propagation patterns [3, 7]. Proper understanding of fluid viscosity, pressure distribution, and proppant transport is essential for achieving optimal fracture geometry and preventing premature closure [6]. Computational fluid dynamics (CFD) models are often employed to simulate

fluid flow and fracture behavior, ensuring precise control over the process [23]. Effective hydraulic fracturing minimizes reservoir damage, maximizes hydrocarbon recovery, and reduces operational costs [7]. Environmental concerns, such as groundwater contamination and induced seismicity, highlight the need for continuous innovation in fluid mechanics applications in hydraulic fracturing operations [13].

3.6 Gas Flaring and Emission Control

Gas flaring is a widely adopted practice in the oil and gas industry to dispose of excess natural gas during extraction and processing. Fluid mechanics principles are crucial in designing efficient flaring systems to ensure complete combustion and minimize harmful emissions such as methane and carbon dioxide [21]. Proper analysis of fluid flow patterns, flame stability, and air-to-fuel ratios enables engineers to optimize combustion efficiency and reduce environmental impacts [16]. Turbulent flow modeling is often employed to predict flare performance under varying operational conditions [17]. Advances in fluid mechanics have led to the development of low-emission flare designs and flare gas recovery systems, reducing greenhouse gas emissions significantly [7]. Regulatory frameworks now emphasize the integration of fluid dynamics principles in flare stack design to comply with environmental standards [15]. Improved flare control strategies can enhance safety, reduce waste, and contribute to sustainable oil and gas operations. Figure 2 below shows gas flaring and emission control.

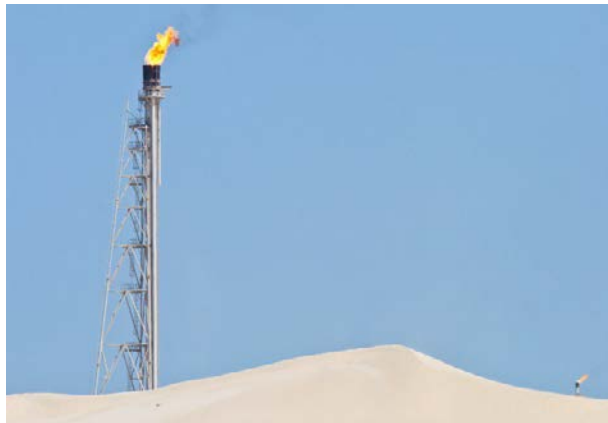


Figure 2. Gas flaring and emission control [3, 9, 16, 17, 20, 21]

3.7 Separation Processes

Separation processes are fundamental in oil and gas production, where crude oil, natural gas, and water must be efficiently separated for downstream processing. Fluid mechanics governs the behavior of multiphase flows within separators, including gravity settling, coalescence, and droplet dynamics [12]. Understanding fluid flow regimes, such as stratified, slug, and annular flow, helps engineers optimize separator design and performance [14]. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are used to analyze phase distribution, reduce turbulence, and improve separation efficiency [6]. Effective separation minimizes carryover, enhances product quality, and prevents equipment fouling [18]. The Stokes' law principle is commonly applied to predict particle settling velocities in liquid-liquid and gas-liquid separators [18]. Modern separator designs incorporate advanced internals, such as

demister pads and cyclone separators, to maximize fluid handling capacity and operational stability [2, 7].

3.8 Subsea Systems

Subsea oil and gas extraction systems operate in harsh deep-water environments, where fluid mechanics plays a critical role in managing high-pressure and high-temperature fluid flow. Engineers rely on fluid dynamic modeling to design subsea flowlines, manifolds, and risers that can withstand extreme conditions [14]. Flow assurance challenges, such as hydrate formation, wax deposition, and slug flow, are mitigated through advanced fluid mechanics simulations and flow control strategies [2, 5]. Subsea pumping systems leverage fluid dynamics principles to maintain consistent fluid flow rates and reduce pressure drops across long distances [4, 8]. CFD tools are frequently used to predict fluid behavior and optimize subsea equipment design for reliability and efficiency [5, 8]. Effective application of fluid mechanics ensures operational stability, minimizes downtime, and enhances hydrocarbon recovery in subsea production systems [6].

3.9 Artificial Lift Systems

Artificial lift systems are employed in oil and gas operations to enhance fluid production from reservoirs where natural pressure is insufficient. Fluid mechanics principles are critical for understanding multiphase flow dynamics and optimizing artificial lift methods such as gas lift, electric submersible pumps (ESP), and sucker rod pumps [2, 5]. Gas lift systems rely on fluid dynamics to control gas injection rates and ensure efficient lifting of fluids to the surface [17]. Similarly, ESP systems are designed based on fluid flow principles to minimize pressure losses and optimize energy efficiency [18]. Engineers use CFD models to simulate fluid flow behavior in artificial lift systems, identifying operational bottlenecks and enhancing overall performance [14]. Proper application of fluid mechanics ensures minimal energy consumption, reduces equipment wear, and extends the operational life of artificial lift systems [15].

3.10 Heat Transfer in Processing Plants

Heat transfer processes are integral to oil and gas processing plants, where fluid mechanics plays a vital role in ensuring efficient energy exchange. Heat exchangers, boilers, and cooling towers are essential equipment designed based on fluid dynamics principles to optimize thermal energy transfer [22]. Proper fluid flow management in these systems prevents overheating, reduces energy losses, and enhances overall operational efficiency [2]. In refineries, crude oil undergoes fractional distillation, which requires precise control of temperature and fluid flow rates to separate hydrocarbons effectively [9]. Cooling systems rely on controlled fluid dynamics to dissipate excess heat and maintain operational stability. Computational fluid dynamics (CFD) models are often employed to simulate and optimize heat exchanger performance, ensuring that energy is transferred efficiently without significant pressure drops [16]. Poor fluid flow design in heat exchangers can lead to fouling, reduced heat transfer efficiency, and increased maintenance costs [10]. Therefore, an in-depth understanding of fluid mechanics is critical for designing heat transfer systems that align with operational, economic, and environmental objectives in processing plants.

3.11 Flow Metering and Monitoring

Flow metering and monitoring are critical aspects of the oil and gas industry, ensuring accurate measurement of production rates, leak detection, and regulatory compliance [4, 7]. Fluid mechanics principles underpin the design and operation of flow meters, including ultrasonic, coriolis, and differential pressure meters, each suited to specific operational conditions [15, 18]. Accurate flow measurement relies on understanding fluid behavior under varying temperature, pressure, and flow regimes [6]. Turbulent and laminar flow patterns influence the precision of flow readings, and advanced computational tools are often used to simulate flow conditions and optimize meter placement [8]. Leak detection systems also rely on fluid dynamics principles to identify anomalies in flow rates or pressure drops across pipelines [18]. Real-time monitoring systems integrated with digital twins allow operators to predict and prevent potential failures before they escalate [19]. Effective flow monitoring reduces production losses, enhances safety, and ensures compliance with industry standards. The application of fluid mechanics in flow metering remains a cornerstone of efficient hydrocarbon transportation and resource management. Figure 3 shows the Flow metering and monitoring in oil and gas company



Figure 3. Flow metering and monitoring [3, 9, 16]

3.12 Multiphase Flow Systems

Multiphase flow systems, involving the simultaneous transport of oil, gas, and water, are common in both upstream and downstream oil and gas operations [14]. Fluid mechanics provides the theoretical foundation for analyzing phase interactions, flow patterns, and pressure drop behavior in multiphase systems [3, 8]. Depending on flow rates and pipeline inclination, multiphase flows can exhibit different regimes, such as slug, annular, or stratified flow, each with unique characteristics [2]. Understanding these regimes is essential for optimizing pipeline design, preventing flow instabilities, and mitigating issues like slug flow, which can damage equipment [3]. Computational fluid dynamics (CFD) models are widely used to simulate

multiphase flow behavior and improve system performance [2, 7]. Effective management of multiphase systems ensures uninterrupted fluid transport, minimizes energy losses, and reduces operational risks. Moreover, accurate multiphase flow modeling enhances the prediction of production rates and reservoir performance [8]. Therefore, the application of fluid mechanics in multiphase systems is indispensable for reliable and cost-effective hydrocarbon extraction and transportation.

3.13 Pump and Compressor Design

Pumps and compressors are essential components in the oil and gas industry for fluid transportation and pressure management [22]. Fluid mechanics governs the design, operation, and efficiency of these devices, ensuring optimal performance under varying operational conditions [3, 7]. Pumps, including centrifugal and positive displacement pumps, are used to transport liquids, while compressors are employed to manage gas flow and maintain pressure levels across pipelines [3, 6]. The efficiency of pumps and compressors depends on factors such as flow rate, pressure head, fluid viscosity, and energy losses caused by turbulence and cavitation [9]. Computational fluid dynamics (CFD) tools are commonly employed to model and optimize pump and compressor designs, reducing energy consumption and operational costs [16]. Proper maintenance and monitoring of these systems are critical to prevent failures, minimize downtime, and ensure long service life. Inaccurate fluid dynamics predictions can lead to pump cavitation, gas surges, and catastrophic failures [4, 8]. Therefore, an in-depth understanding of fluid mechanics is vital for designing efficient pumps and compressors, enhancing operational safety, and reducing costs in oil and gas facilities.

3.14 Corrosion Control

Fluid dynamics plays a pivotal role in predicting and controlling corrosion rates in pipelines and equipment, which are subject to fluid movement and chemical interactions. The flow of fluid over metal surfaces can exacerbate corrosive processes due to turbulent conditions, the presence of corrosive chemicals, or a combination of both. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are used to model these effects, allowing engineers to predict areas where corrosion is most likely to occur, such as at pipe bends, junctions, and regions of stagnation [11]. The dynamics of fluid flow influence factors such as the oxygen and moisture content, which significantly impact the electrochemical reactions responsible for corrosion [12]. By understanding fluid movement, engineers can implement protective coatings, select corrosion-resistant materials, and design pipelines to minimize corrosive effects. Moreover, CFD can assist in optimizing fluid velocities to reduce wear and corrosion, improving the longevity and efficiency of oil and gas pipelines [23].

3.15 Spill Containment and Cleanup

Understanding fluid flow patterns is essential in the design of spill containment systems and optimizing the cleanup operations in the event of oil spills. Fluid dynamics help model how oil spreads and interacts with water, wind, and terrain, enabling the design of barriers and skimmers that can effectively contain and remove the spilled substance. The behavior of the fluid in different environmental conditions, such as ocean currents or waves, plays a critical role in determining the most effective response strategies [16]. CFD simulations assist in predicting the dispersion and

transport of contaminants in water, enabling more efficient planning for the deployment of containment booms, skimmers, and absorbents [18]. The interaction between different fluids (e.g., oil and water) is crucial for designing cleanup equipment that can efficiently separate and remove the contaminants without causing further environmental damage [14].

3.16 LNG Processing and Transport

Liquefied Natural Gas (LNG) processing and transport rely heavily on fluid mechanics, particularly for liquefaction, storage, and transportation under cryogenic conditions. Fluid dynamics are crucial for understanding the behavior of natural gas when it is cooled to extremely low temperatures to form LNG. The design of liquefaction plants requires the optimization of heat exchangers, compressors, and turbines, where fluid flow plays a significant role in ensuring efficient heat transfer and minimizing energy consumption [17]. Furthermore, fluid mechanics is essential in the safe transport of LNG, especially in pipeline and ship designs, where managing cryogenic temperatures and pressures is crucial to avoid structural failure or leakage [19]. CFD simulations help in optimizing the flow characteristics and identifying potential risks, such as the possibility of phase changes or temperature gradients, ensuring safety and operational efficiency in LNG transport [3, 7]. Figure 4 demonstrates the oil and gas production facilities in Shell Nigeria limited.



Figure 4. Oil and gas production [1, 3, 9, 16, 17, 20, 21]

3.17 Offshore Drilling Operations

In offshore drilling operations, fluid mechanics plays a critical role in ensuring the stability and safety of drilling platforms. One of the primary challenges in offshore drilling is managing wellbore pressure, which is influenced by the movement of drilling fluids within the well. Proper fluid circulation ensures that the wellbore remains stable by preventing the ingress of formation fluids and controlling pressure fluctuations that could lead to blowouts [15]. Fluid dynamics models are used to design the circulation systems and predict pressure profiles, helping engineers select the right mud properties for effective drilling and well control [8]. Furthermore, CFD simulations help optimize fluid flow rates, ensuring the efficient transport of cuttings from the wellbore, minimizing downtime, and improving the overall safety and efficiency of offshore drilling operations [13]. Figure 5 below shows the oil well while Figure 6 shows the Lagos Offshore oil rig at night.



Figure 5. Oil well [1, 16, 17, 20, 21]

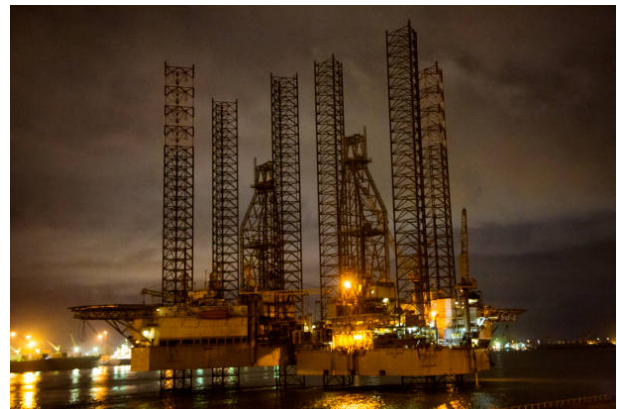


Figure 6. Lagos offshore oil rig at night [9, 16, 17]

3.18 Steam Injection Techniques

Steam injection is a widely used thermal recovery method in the oil and gas industry, and it relies heavily on fluid mechanics to optimize the injection and distribution of steam in reservoirs. The effectiveness of steam injection depends on controlling the flow rates and ensuring even heat distribution throughout the reservoir to reduce the viscosity of crude oil, making it easier to extract [23]. Fluid dynamics models are used to simulate the movement of steam through porous rock formations and predict how the injected steam interacts with the oil, helping engineers design more efficient steam injection processes [4, 8]. By analyzing the fluid flow characteristics, engineers can

optimize the number and placement of injection wells, ensuring maximum oil recovery while minimizing energy consumption [7]. The successful application of fluid mechanics in steam injection leads to enhanced recovery rates and greater economic benefits for oil producers.

3.19 Environmental Monitoring and Compliance

Fluid mechanics plays a crucial role in environmental assessments, particularly when analyzing fluid dispersion patterns during spills or emissions. The movement and dispersion of pollutants in air, water, or soil are influenced by fluid dynamics, which helps predict how contaminants spread and interact with the environment. For example, in the case of an oil spill, fluid dynamics can predict how the oil will spread on the surface of water and assist in designing containment systems that limit its spread [6]. Fluid models also help simulate the dispersion of pollutants in the atmosphere, enabling more accurate predictions of the impact of emissions from industrial activities [12]. By applying fluid dynamics, environmental engineers can better understand pollutant behavior and design more effective monitoring and control systems, ensuring compliance with environmental regulations and minimizing ecological damage [13].

3.20 Water Management in Oilfields

Water management in oilfields is an essential aspect of maintaining operational efficiency and meeting environmental regulations. Effective water injection and produced water treatment systems rely on fluid mechanics principles to optimize flow rates and ensure proper distribution. Water flooding is a common method used to enhance oil recovery, where water is injected into the reservoir to maintain pressure and improve oil displacement [4]. Fluid dynamics helps in the design and optimization of injection wells, ensuring uniform water flow and preventing problems such as water breakthrough or early water production [14]. Additionally, the treatment of produced water, which contains impurities from the reservoir, relies on fluid flow principles to design separation and filtration systems that meet environmental standards [18]. CFD simulations can be used to model the entire water management process, improving operational efficiency and ensuring compliance with environmental regulations [11].

3.21 Nigeria's Economic Situation and Energy Sector Ranking

Nigeria is the largest oil producer in Africa and ranks 11th globally in proven crude oil reserves, with approximately 37 billion barrels [2, 21, 22]. The petroleum sector contributes about 9% to Nigeria's GDP, while oil and gas exports account for nearly 90% of total export revenue [15, 18]. These statistics help emphasize the critical role of fluid mechanics in optimizing production efficiency and sustainability in Nigeria's oil and gas industry.

3.22 Operational Challenges in the Niger Delta and Solutions:

The Niger Delta faces several operational challenges, including pipeline vandalism, crude oil theft, corrosion-induced pipeline leaks, and flow assurance issues. Flow assurance problems, such as hydrate formation and wax deposition, hinder fluid transport through pipelines. Companies address these challenges by implementing real-time monitoring systems, using chemical inhibitors, and employing pigging operations to prevent blockages [3, 9, 20, 21]. The Nigerian National Petroleum Corporation (NNPC)

has also adopted digital surveillance and drone technology to monitor pipeline networks and mitigate theft and leakages.

3.23 Comparison of Different Fluid Mechanics Applications in Nigeria's Oil and Gas Sector

Various fluid mechanics applications are employed in Nigeria's oil and gas sector, each with different efficiency levels, cost implications, and adoption rates. One of the most notable areas is Enhanced Oil Recovery (EOR), where methods like gas injection, chemical flooding, and water flooding are used to improve hydrocarbon extraction. Table 1 is a comparative analysis of these methods based on key performance indicators

Table 1. Comparison of enhanced oil recovery (EOR) methods in Nigeria [3, 9, 20, 21]

EOR Method	Efficiency (%)	Cost Implication (per barrel, \$)	Adoption Rate in Nigeria (%)	Challenges
Gas Injection	45-55	12-18	30	High infrastructure costs, gas availability issues
Chemical Flooding	35-45	15-22	20	Expensive chemicals, environmental concerns
Water Flooding	25-35	5-10	50	Risk of reservoir damage, water treatment costs

From the table 1, gas injection provides the highest efficiency but requires higher infrastructure investment, making it less adopted in Nigeria compared to water flooding, which is widely used due to its lower operational costs. Chemical flooding, though effective, has a lower adoption rate due to high costs and environmental concerns.

3.24 Flow Assurance: Single-Phase vs. Multiphase Flow Analysis

Another critical comparison in fluid mechanics applications involves pipeline flow assurance, where different modeling techniques—single-phase flow and multiphase flow modeling—are used to optimize crude oil and gas transport.

Table 2. Single-phase flow and multiphase flow modeling [2, 20, 21, 22]

Flow Assurance Method	Efficiency in Reducing Pressure Loss (%)	Application Area	Cost Savings (%)
Single-Phase Flow Modeling	50-60	Gas Pipelines	10-15
Multiphase Flow Modeling	65-80	Crude Oil Pipelines	15-25

The table 2 shows that multiphase flow modeling is more efficient in reducing pressure losses and optimizing transport, leading to higher cost savings, especially for crude oil pipelines. These comparisons highlight how fluid mechanics applications impact efficiency, cost, and industry adoption in Nigeria's oil and gas sector.

3.25 Concrete Examples of CFD Applications

Computational Fluid Dynamics (CFD) is widely used in Nigeria's offshore and onshore operations. A notable example is its application in designing subsea pipelines for Shell Nigeria's Bonga deepwater field. CFD simulations were used to predict multiphase flow behavior, optimize slug control strategies, and enhance pipeline integrity [9, 20]. Another case study is ExxonMobil's deployment of CFD to optimize flare stack operations, reducing environmental emissions by 15% [3, 9].

3.26. Impact on Energy Costs with Concrete Data

Reducing energy consumption in oil and gas operations can lead to significant cost savings. For instance, optimizing pump and compressor operations using fluid mechanics principles has led to a 10–15% reduction in power consumption in offshore platforms [21]. Similarly, the implementation of advanced flow assurance techniques has reduced energy losses by up to 20% in pipeline transportation [18, 20].

Table 3. Key areas where fluid mechanics applications have contributed to energy efficiency and cost reduction in Nigeria's oil and gas sector [3, 16, 17, 20, 21].

Application Area	Energy Savings (%)	Cost Reduction (%)
Pump and compressor optimization	10–15%	12%
Pipeline flow assurance improvements	15–20%	18%
CFD-optimized flare stack operations	10–12%	15%
Enhanced oil recovery (EOR) systems	8–10%	10%
Heat exchanger optimization	12–18%	14%

The findings indicate that applying fluid mechanics principles can lead to significant cost and energy savings, improving operational efficiency and sustainability in Nigeria's oil and gas sector.

3.27 Sustainability Impacts of Innovations in Fluid Mechanics:

Innovations in fluid mechanics contribute to sustainability by reducing gas flaring and improving oil recovery efficiency. For instance, the adoption of low-emission flare technologies has led to a 25% reduction in greenhouse gas emissions in Nigeria's oil fields [19]. Additionally, fluid mechanics-based water injection techniques have improved reservoir management, minimizing water wastage and reducing environmental impact [3, 6, 9].

3.28 Future Developments in Fluid Mechanics Applications

Emerging advancements in fluid mechanics include the use of machine learning to enhance multiphase flow predictions and the adoption of nanofluids to improve heat transfer efficiency in oil processing plants. The Nigerian oil sector is also exploring digital twin technology to simulate real-time fluid flow behavior, optimizing production strategies [13, 17]. Furthermore, the integration of renewable energy sources, such as hybrid solar-powered pumps, is being tested to improve energy efficiency in offshore operations.

4. Challenges in Fluid Mechanics Applications

4.1. Pipeline Integrity

Pipeline integrity remains a critical challenge in fluid mechanics, especially in oil and gas operations. Frequent pipeline vandalism and leaks pose significant risks to both operational efficiency and environmental safety. The integrity of pipelines is compromised by factors such as external mechanical damage, corrosion, and the deterioration of materials under harsh environmental conditions [7]. Additionally, the presence of impurities in the transported fluids can accelerate corrosion, leading to pipeline failures [1]. In oil and gas transport, ensuring the longevity and functionality of pipelines requires rigorous maintenance, monitoring, and the application of advanced computational fluid dynamics (CFD) models to predict potential weaknesses and optimize the use of materials and protective coatings [5]. To mitigate the risks posed by pipeline failures, there is a growing need for improved monitoring systems and smarter material choices that extend the operational lifespan of pipelines.

4.2. Flow Assurance

Flow assurance is another complex issue faced in oil and gas pipeline operations. It involves preventing blockages or disruptions in the flow of fluids due to various deposit formations, such as hydrate formation, wax deposition, and asphaltene precipitation [22]. These phenomena can cause significant flow restriction, leading to costly shutdowns and even pipeline rupture in extreme cases [9]. Hydrate formation, in particular, poses a serious threat in subsea pipelines, where temperatures are low and pressures are high. Effective flow assurance solutions require a multidisciplinary approach that combines fluid dynamics principles, advanced chemical treatments, and innovative pipeline heating methods [12]. Computational fluid dynamics plays a key role in simulating these processes, helping engineers predict where issues might arise and design appropriate mitigation strategies to maintain continuous flow in challenging conditions [15].

4.3. Pressure Drop Management

Optimizing pressure drop management across pipelines and wellbores is crucial to maintaining flow efficiency and reducing operational costs. A significant pressure drop in pipelines results in energy losses, requiring additional pumping power to maintain the desired flow rate [16]. Effective management of pressure drop involves understanding the fluid's behavior under different conditions, including viscosity, density, and temperature [3]. Computational fluid dynamics (CFD) allows for precise simulations that can predict pressure drop along pipelines and help in selecting optimal pipeline configurations and pump systems to minimize energy consumption and improve overall operational efficiency [11]. However, accurately predicting pressure losses remains a challenge due to the complex nature of fluid flow and the various factors that influence pressure drop in real-world environments, such as turbulence, pipe roughness, and fluid composition [16]. Addressing these challenges requires an ongoing advancement in CFD techniques and an in-depth understanding of flow behavior in oil and gas systems.

5. Innovations and Emerging Technologies

5.1. Computational Fluid Dynamics (CFD) for Flow Simulation

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a critical tool for simulating fluid flow in complex systems, especially in the oil and gas industry. CFD allows engineers to model the flow of fluids, predict pressure drops, and visualize flow behavior in pipelines, wells, and production systems [7]. It enables optimization of design, improves flow assurance, and aids in solving challenges such as hydrate formation and wax deposition [1]. CFD models enhance decision-making by providing detailed insights into fluid dynamics, enabling more efficient and cost-effective pipeline operation.

5.2. Smart Sensors for Real-Time Flow Monitoring

Smart sensors are increasingly used in the oil and gas industry for real-time flow monitoring. These sensors provide continuous data on pressure, temperature, and flow rate, allowing operators to monitor the performance of pipelines and wells. Advanced sensors are equipped with wireless capabilities, enabling remote monitoring and early detection of anomalies such as blockages or pressure drops [14]. Real-time data allows for prompt corrective action, reducing operational downtime and improving safety and efficiency in fluid transport systems [15].

5.3. Advanced Pipeline Coatings to Minimize Friction and Corrosion

Advanced pipeline coatings are being developed to minimize both friction and corrosion, enhancing the longevity and efficiency of oil and gas transport systems. These coatings include materials such as epoxy and polymer-based coatings, which offer excellent resistance to corrosive environments [7]. Additionally, friction-reducing coatings help in lowering energy consumption by minimizing resistance to fluid flow, thereby reducing pumping requirements [8]. The continuous advancement in material science enables the development of coatings that are more durable and effective in challenging operational conditions, promoting the sustainability of pipeline infrastructure. Table 4 is a comprehensive comparison that systematically compares the key fluid mechanics applications discussed in the review. It highlights their advantages, limitations, and applicability in Nigeria's oil and gas sector.

Table 4. Comparison of fluid mechanics applications in Nigeria's oil and gas industry [1, 3, 9, 20, 21]

Application	Method	Advantages	Limitations	Applicability in Nigeria
Drilling Operations	Drilling Mud Circulation	Enhances wellbore stability, prevents blowouts, and cools drill bit	Requires precise rheological control, potential for formation damage	Widely used in onshore and offshore drilling
Pipeline Transportation	Laminar vs. Turbulent Flow Analysis	Reduces energy losses, improves efficiency, and minimizes flow disruptions	High maintenance costs, risks of leaks and pipeline vandalism	Essential for long-distance oil and gas transport
Reservoir Engineering	Darcy's Law & Multiphase Flow Modeling	Optimizes oil recovery, predicts reservoir performance	Requires advanced computational tools and real-time monitoring	Applied in major oil fields for reservoir management
Enhanced Oil Recovery (EOR)	Gas Injection vs. Chemical Flooding	Increases production from mature fields	High operational costs, environmental concerns	Limited due to cost; mostly used in JV and IOCs' operations
Hydraulic Fracturing	High-Pressure Fluid Injection	Increases hydrocarbon flow, enhances production in tight formations	Potential groundwater contamination, high-pressure control needed	Limited application due to environmental concerns
Gas Flaring & Emission Control	Flare Stack Optimization & Combustion Control	Reduces harmful emissions, improves energy efficiency	Regulatory enforcement issues, technology adoption challenges	Applied in selected refineries and gas processing plants
Separation Processes	Gravity Separation, Centrifugal & Electrostatic Separation	Ensures quality crude oil and gas, minimizes waste	Energy-intensive, sensitive to feed composition	Used in major processing facilities
Subsea Systems	Subsea Flow Assurance & Multiphase Pumps	Enables deepwater production, prevents hydrates and wax deposits	Requires high capital investment, complex maintenance	Used in deepwater fields (e.g., Bonga, Egina)
Artificial Lift Systems	Gas Lift vs. Electric Submersible Pumps (ESP)	Improves oil recovery, enables production from low-pressure wells	High maintenance, ESP sensitive to sand and water cut	Used in marginal and mature fields
Heat Transfer in Processing Plants	Heat Exchangers & Cooling Systems	Improves energy efficiency in refineries and gas plants	Requires periodic maintenance, potential for fouling	Used in refineries and gas processing facilities
Flow Metering & Monitoring	Coriolis, Ultrasonic, and Differential Pressure Meters	Ensures accurate measurement, prevents revenue losses	Calibration and accuracy issues, high initial cost	Used for custody transfer and pipeline monitoring
Multiphase Flow Systems	Computational Fluid Dynamics (CFD) & Flow Assurance Modeling	Enhances prediction of phase behavior, reduces flow disruptions	Requires expertise, computationally expensive	Applied in deepwater and high-pressure pipelines
Pump & Compressor Design	Centrifugal & Positive Displacement Pumps	Ensures steady transportation of oil & gas, minimizes pressure drops	Requires high power input, mechanical wear issues	Used in processing plants and offshore platforms

6. Conclusion

Fluid mechanics remains a cornerstone of innovation and efficiency in Nigeria's oil and gas industry. Its applications span across drilling, production, transportation, and environmental management, ensuring optimized operations and sustainable resource utilization. By leveraging advancements in Computational Fluid Dynamics (CFD), smart sensors, and real-time monitoring systems, the sector can address persistent challenges such as pipeline integrity, flow assurance, and environmental compliance. Collaboration between industry stakeholders, government bodies, and academic institutions is essential to foster research, workforce development, and technology adoption. Moving forward, a focus on sustainable practices and cutting-edge technologies will be crucial for driving growth, reducing environmental impact, and ensuring long-term economic contributions from Nigeria's oil and gas sector.

Acknowledgements: The authors acknowledge the following institutions for their support: Benson Idahosa University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria; and University of Benin, Faculty of Engineering, Department of Production Engineering, Benin City, Edo State, Nigeria. The authors extend their gratitude for the technical and infrastructural support provided during the research process, which significantly contributed to the successful completion of this study.

Conflict of Interest Statement: The authors have no conflicts of interest to declare.

Funding Information: The authors declared that this study has received no financial support.

Author Contributions: Conceptualization: Dickson David OLODU (D.D.O.), Francis INEGBEDION (F.I.), Osagie Imevbore IHENYEN (O.I.I.); Investigation: D.D.O., F.I.; Material and Methodology: D.D.O., O.I.I.; Supervision: D.D.O., F.I.; Visualization: D.D.O.; Writing-Original Draft: D.D.O., F.I.; Writing-Review & Editing: D.D.O., F.I., O.I.I.; Other: All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement: The data generated and/or analyzed during this study are not publicly available but can be provided by the corresponding author upon reasonable request.

References

- [1]. Akujuru, Kelvin., Nnadikwe, Johnson., James, Richard V. (2024). Exploring cutting-edge application of computational fluid dynamics in enhancing and innovation within the oil and gas sector. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 11(3), 1-8.
- [2]. Norman, L., Johnson. (2023). Exploring cutting-edge application of computational fluid dynamics in enhancing and innovation within the oil and gas sector. *Preprints*, 2023(12), 1-13.
- [3]. Osgouei, A.E., Altun, G. (2013). A review of application of computational fluid dynamics in prediction of oil and gas wells problems. *Proceedings of the 74th EAGE Conference and Exhibition*, 380, 43-50.
- [4]. Jinjiang, Xiao., Rafael, Lastra., Shoubo, Wang. (2016). Fluid driven commingling system for oil and gas applications. *Petroleum Science and Engineering*, 12(4), 245-252.
- [5]. Morrow, T.B. Horii, K., Elger, D.F., Marshall, I.R. (1994). Industrial and environmental applications of fluid mechanics 1994. *FED*, 186, 1-15.
- [6]. Elemer, Bobok. (1993). *Fluid Mechanics for Petroleum Engineers*. Elsevier.
- [7]. Dalton, C., Denison, E. (1975). Fluid mechanics in the petroleum industry. *Journal of Petroleum Technology*, 27(4), 78-84.
- [8]. Tobias, R., Gessner, Jader, R., Barbosa. (2023). Fluid flow in oil production systems. *Petroleum Engineering Journal*, 45(2), 120-132.
- [9]. Adeniyi, O.D., Nwalor, J.U., Ako, C.T.. (2008). A review on waterflooding problems in Nigeria's crude oil production. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 29(4), 520-530.
- [10]. Ranald, V., Giles., Jack, B., Evett., Cheng, Liu. (2014). *Fluid Mechanics and Hydraulics*. McGraw-Hill Education.
- [11]. Charles, M.E. (1977). Fluid mechanics and resource development. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55(4), 325-334.
- [12]. Ranald, V., Giles., Jack, B., Evett., Cheng, Liu. (2014). Fluid mechanics and hydraulics. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 25, 75-90.
- [13]. Robert, D., Grace. (2017). Fluid dynamics in well control. *Well Engineering Journal*, 38(7), 450-462.
- [14]. Mirza, A., Dadash-Zade., Ru, Cao. (2024). Fluid mechanics of gas-liquid systems. *Academic Journal of Science and Technology*, 17(2), 301-312.
- [15]. Ojo, O.T. (2023). Petrophysical and geomechanical analysis to delineating reservoirs in the Miocene Niger Delta region of Nigeria. *Geomechanics Journal*, 19(3), 215-228.
- [16]. Attoni, S., Nwonodi, C., Chukwuemeka. N. (2024). Effect of oil-based drilling fluid contamination on gas condensates fluid properties. Case study of a deepwater reservoir in Niger Delta, Nigeria. *SPE Conference Proceedings*, 221674, 1-12.
- [17]. Ali, Shokor., Golam., Mohammed, H., Alhamdo., Hassan, A., Abdul, Hussein., Sinan, I., Mohammed. (2022). Application of computational fluid dynamics for investigation the effect of the hole cleaning parameters in inclined and horizontal wells. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 12(4), 456-467.
- [18]. Ludovic, Raynal., Frederic, Augier., Frederic, Bazer-Bachi., Yacine, Haroun., C., Pereira, da, Fonte. (2016). CFD applied to process development in the oil and gas industry – A review. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, 71(4), 1-14.
- [19]. Jerome, Asedegbega., Dorcas, S., Eyinla, Michael, A., Oladunjoye., A., I., Opara., A., F., Nwakanma. (2023). A robust static model for geo-mechanical characterisation and drilling optimisation in offshore Niger Delta Basin, Nigeria. *SPE Conference Proceedings*, 32309, 1-10.
- [20]. Ogunkunle, Temitope, Fred., V., Damilola, Abraham., Afolabi, Richard, Oyekunle., Oriola, Opedamola. (2018). Comparative analysis of saturated and under-saturated oil viscosity correlations using statistical tools, Niger Delta case study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 173(1), 1-8.
- [21]. Yisa, Adeeyo. (2019). Mathematical modelling of oil viscosity at bubble point pressure and dead oil

- viscosity of Nigerian crude. *SPE Conference Proceedings*, 198770, 1-9.
- [22]. Shifeng, Yang., Jimin, Zhao., Siqu, Han., Xin, Shao., Ying, Zhang. (2023). Application of fluid mechanics in flow meter principle analysis and process simulation. *Advances in Engineering Technology Research*, 7(1), 486-495.
- [23]. Talal, T., Al-Housseiny. (2014). Exploring fluid mechanics in energy processes: Viscous flows, interfacial instabilities & elastohydrodynamics. *Energy Journal*, 15(6), 220-232.