



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2023

SAYI / NUMBER : 3

CILT / VOLUME : 26



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

<http://jes.ksu.edu.tr/>

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



Sahibi / Owner

Prof.Dr. Alptekin YASIM
KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL
munsal@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assist. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER
zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ. TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof. Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ, TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Prof. Dr. Kristina SARIC
Geological Eng.
University of Belgrade, SERBIA
kristina.saric@rgf.bg.ac.rs

Prof. Dr. Ramazan GÖKÇE
Food Eng.
Pamukkale Univ., TURKEY
gokce@pau.edu.tr

Prof. Dr. A. Mehmet YÜCEER
Chemical Eng.
İnönü Univ., TURKEY
mehmet.yuceer@inonu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Fethullah GÖÇER
Industrial Eng.
KSU Univ. TURKEY
fgocer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Erdem SELVER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
eserver@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
fkececioglu@ksu.edu.tr

Assoc. Prof.Dr. Çağrı UZAY
Mechanical Eng.
KSU Univ., TURKEY
cagriuzay@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Oğuz DOĞAN
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
oguzdogan@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Hasan BADEM
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
hbadem@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Zeyneb KILIÇ
Civil Eng.
Adıyaman Univ. TURKEY
zkilic@adiyaman.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Ayşe Ruşen DURUCAN
Civil Eng.
Fırat Univ. TURKEY
ardurucan@firat.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Elif ÇELİK
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Sermet AYMAN
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sayman@ksu.edu.tr

Res. Assist. Yalın YAMAÇ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
yalinyamac@ksu.edu.tr

Res. Assist. Arif ÇUTAY
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
arifcutay@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC

Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara. USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul. TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge,UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adıyaman Univ.
Adıyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 26 SAYI 3) KATKI VEREN HAKEMLER

Burcu SANCAR BEŞEN

Melda Meral ÖCAL

Ahmet Mete VURAL

Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU

Bahri ERSOY

Lütfü NAMLI

Sümeyye SINIR

Emrah PEŞMAN

Muhammed GÜMÜŞ

Merve AÇIKGENÇ ULAŞ

Onur SÖZÜDOĞRU

Taner TUNCER

Mehmet Onur GENÇ

Orhan Erdal AKAY

Osman ACAR

Eyüp Emre ÜLKÜ

İbrahim KILIÇ

Gökhan BORAN

İlkay ATAR

Turgay ÖZDEMİR

Gaye KAYA

Orkan Zeynel GÜZELCİ

Halet Almıla ARDA BÜYÜKTAŞKIN

Asım DAVULCU

Yekta GEZİNÇ

İsrafil KARADÖL

Semet ÇELİK

Hakan GÜNEYLİ

Birol ŞAHİN

Ruşen SINIR

İlknur DEMİRAL

Ragıp İNCE

Öznur Begüm GÖKÇEK

Kubilay Muhammed SÜNNETÇİ

Bahadır Erman YÜCE

Tufan YILMAZ

Alptekin TÜRKKAN

Ömür ŞAHİN

Mücahid GÜNAY

Kadir KARAKUŞ

Mehmet Emin AYDEMİR

Alperen KAYMAKÇI

Halil Turgut ŞAHİN

Aslı DEMİR

Kamuran ÖZTEKİN



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Development Of Permanganat Alternative Effect Washing Chemicals in Denim Washing Processes**
Denim Yıkama İşlemlerinde Permanganat Alternatifi Efekt Yıkama Kimyasalları Geliştirilmesi 573-579
Seda TÜRKÖĞLU, Gökhan CEYHAN, Cem GÜNEŞOĞLU, Esra TABAŞ ASİLTÜRK, Abdullah ESEN
- Prevalence Of Gram-Negative Bacteria Isolated From Fruit And Vegetables Retailed in Adana Province**
Adana İlinde Perakende Satılan Meyve Ve Sebzelerden İzole Edilen Gram-Negatif Bakterilerin Yaygınlığı 580-588
Mevhibe TERKURAN, Zerrin ERGİNKAYA, Fatih KÖKSAL
- Kısmi Gölgeleme Koşullarındaki FV Sistemlerin Derin Öğrenme Tabanlı Maksimum Güç Noktası Tahmini**
Deep-Learning Based Maximum Power Point Prediction For a PV System Under Partial Shading Conditions 589-603
Ramazan AKDERE, Erdal KILIC, Ö. Fatih KEÇECİOĞLU
- Derin Karıştırma Kolonları İle Destekli Yol Dolgusunun Üç Boyutlu Sayısal Modellemesi: Parametrik Çalışma**
Three-Dimensional Numerical Modeling of Embankment Supported With Deep Mixing Columns: A Parametric Study 604-613
Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN, İlnur BOZBEY
- Doğaltaş Toz Atıklarından İnce Tane Boyutlu Kalsiyum Karbonatın Hidrosiklon İle Kazanılması**
Recycling of Fine Size Calcium Carbonate From Natural Stone Dust Waste By Hydrocyclone 614-624
Zehra Ebru SAYIN, Hakan ÇİFTÇİ, Mustafa GÜRİSOY
- Boru Demeti Isı Değiştiricilerinde Farklı Boru Çapı Kullanımının Akış Ve Isı Transferini İyileştirmeye Etkisi**
The Effect Of Use Of Different Diameter On Improvement Of Flow And Heat Transfer in Tube Bank Heat Exchangers 625-636
Muhammet Nasif KURU, Mehmet Tahir ERDİNÇ, İlyas KARASU, Şaban ÜNAL
- Kiriş Ve Sac Plaka Yapılarda Yapay Sinir Ağları İle Mesnet Konum Optimizasyonları**
Support Location Optimizations in Beam and Sheet Plate Structures With Artificial Neural Networks 637-652
Onur ÜNLÜ, Hakan DEMİR, Necmettin KAYA
- Hidrotermal Ön İşlemlenmiş Okalipütüs Kök Odunlarından Proliz Yöntemiyle Aktif Karbon Üretilmesi**
Production of Activated Carbon From Hydrothermal Pre-Treated Eucalyptus Rootwoods By Prolysis Method 653-662
Ayşegül APAYDIN, Ertuğrul ALTUNTAŞ, Ali ŞAMİL

- Beton Numune Atıklarından Elde Edilen Geri Dönüşüm Agregaları İle Üretilen Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkileri**
Elevated Temperature Effects on Concrete Produced With Recycling Aggregate Obtained From Concrete Specimens 663-675
Mounzer KHIR ALLAH, Zinnur ÇELİK, Ahmet Ferhat BİNGÖL
- Sivas İli Tarımsal Atıklarının Biyokütle Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi Ve Sayısal Haritalarının Oluşturulması**
Determining The Biomass Energy Potential of Agricultural Wastes in Sivas and Creating Digital Maps 676-684
Ayben POLAT BULUT
- Madenlerin Sınıflandırılmasına Yönelik Hibrid Bir CNN Modelin Oluşturulması**
Creating a Hybrid CNN Model for Mines Classification 685-693
Turab SELÇUK
- Tarımsal Traktörlerle Yapılan Yol İçi Taşımacılıkta Kullanıcı Bölümü Yapısının Hava Akışı Direnci Açısından Deneysel İncelenmesi**
Experimental Investigation of User Compartment Structure in Terms of Air Flow Resistance For on Road Transportation With Agricultural Tractors 694-706
Hanifi KÜÇÜKSARIYILDIZ, Osman BABAYİĞİT, Eyüb CANLI, Kazım ÇARMAN
- Geribesleme Doğrusallaştırması Kullanılarak Kablo İle Sürülen Düzlemsel Paralel Bir Robotun Denetimi**
Control of A Cable-Driven Planar Parallel Robot With Feedback Linearization 707-717
Caner SANCAK, Mehmet İTİK
- Beyin Mr Görüntülerinden Tümör Tespiti İçin Derin Öğrenmeye Dayalı Hibrit Modeller**
Deep Learning Based Hybrid Models For Tumor Detection From Brain Mr Images 718-733
İclal ÖZCAN, Serkan ÖZTÜRK
- Geleneksel Ahşap Pirografi Tekniğinin Mobilya Yüzeylerinde Lazer Teknolojisi İle İnovasyonu**
Innovation Of Traditional Wood Pyrography With Laser Technology on Furniture Surfaces 734-741
Cebraail AÇIK
- Jelatin Çözeltilerinin Farklı Sıcaklıklarda Kurutulması; Kinetik, Termodinamik Ve Fonksiyonel Özelliklerinin Değerlendirilmesi**
Drying Of Gelatin Solutions At Different Temperatures; Evaluation Of Kinetic, Thermodynamic And Functional Properties 742-752
Ümran CANSU, Erdal YILDIRIM
- Hızlandırılmış Ve Doğal Yaşlandırmanın Çam Kabuğu Ve Kozalağından Üretilen Kompozit Malzemelerin Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri**
Effects Of Accelerated And Natural Aging On Some Properties Of Composite Materials Produced From Pine Bark And Cones 753-764
Fatih Tuncay EFE
- Mobilya Ve İç Mekan Tasarımında Kullanılan Farklı Kalınlıktaki Lif Levhaların Bazı Özelliklerinin Karşılaştırılması**
Comparison of Some Properties of Different Thickness Fiberboards Used in Furniture and Interior Design 765-773
Celal UĞUR, İbrahim BEKTAŞ, Ahmet TUTUŞ

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

Kimyasal Koruyucu Giysilerin Seçimi, Temizlenmesi Ve Performans Özellikleri
Selection, Decontamination, Performance Properties Of Chemical Protecive Clothing
Dilara SEVİNDİK, Bengi KUTLU

774-783

Saydam Betonun Özellikleri Üzerine Bir Çalışma
Light Transmitting Concrete Production
İlker Bekir TOPÇU, Recep KURAL

784-794



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.08.2022
Kabul Tarihi : 01.08.2023

Received Date : 19.08.2022
Accepted Date : 01.08.2023

DEVELOPMENT OF PERMANGANAT ALTERNATIVE EFFECT WASHING CHEMICALS IN DENIM WASHING PROCESSES

DENİM YIKAMA İŞLEMLERİNDE PERMANGANAT ALTERNATİFİ EFEKT YIKAMA KİMYASALLARI GELİŞTİRİLMESİ

Seda TÜRKOĞLU^{1*} (ORCID: 000-001-5328-0278)
Gökhan CEYHAN^{2/3} (ORCID: 0000-0002-9127-2348)
Cem GÜNEŞOĞLU⁴ (ORCID: 0000-0002-8796-9679)
Esra TABAŞ ASİLTÜRK¹ (ORCID: 0000-0001-8363-3070)
Abdullah ESEN¹ (ORCID: 0000-0002-5394-1504)

¹Baykan Denim, Malatya, Turkey

²Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department Of Materials Science And Engineering, K.Maraş, Turkey

³Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Technical Sciences Vocational School, Food Processing Division, K.Maraş, Turkey

⁴Gaziantep University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Gaziantep, Turkey

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Seda TÜRKOĞLU, Seda.Firat@baykandenim.com

ABSTRACT

The process of giving effect or attrition on the denim is a situation that develops day by day according to the fashion trends that have developed in recent years. The effect is to try to achieve a more matte appearance by gradually removing these materials by means of paint deformation, while the fiber is not allowed to break brittle on the working surfaces of the particles, where the hard and amorphous surfaces provide a kind of fine sanding function. The aging process is generally done to provide a random wear look and to break the uniform denim paint look. The most important of these can be listed as the difficulty of use, the fact that it contains permanganate, which is harmful to the environment, expected to be banned in the near future, and the absence of repeated use. By using Al₂O₃ material, which is in the oxide abrasive class, by adding liquid paraffin and TEA, which acts as a compatibilizing agent, at different rates, abrasion slurry was produced and its effects on denim products were investigated. In this study, the effects of particle size of oxide species, α - Al₂O₃ ratio in Al₂O₃ specific surface areas and impurities in Al₂O₃ were also investigated.

Keywords: Aluminum oxide, denim, tumbled

ÖZET

Denim ürün efekt verme işlemi veya yıpratma, son yıllarda gelişen moda trendlerine göre uygulama alanı günden güne gelişen bir durumdur. Efekt, özellikle sert ve şekilsiz yüzeylerin ince zımpara işlevi kazandırdığı parçacıkların çalışma yüzeylerinde lifin gevrek kırılmalarına izin vermeden gerçekleştirilirken, boyayı deformasyona uğratarak yavaş yavaş uzaklaştırarak daha mat bir görünüm elde etmeye çalışmaktır. Eskitme işlemi genel olarak gelişmiş güzel bir yıpranma görünüşü sağlamak ve tek düze denim boya görüntüsünü kırmak için yapılır. Geleneksel efektlendirme işlemi olan ponza taşı ve permanganat birlikteliği kullanım açısından ciddi dezavantajlar içermektedir. Bunlardan en önemlisi kullanın zorluğu, çevre için zararlı, yakın zamanda yasaklanması beklenen permanganat içermesi ve tekrarlı kullanımının olmaması olarak sıralanabilir. Oksit aşındırıcı sınıfına giren Al₂O₃ malzemesi kullanılarak, sıvı parafin ve uyumlaştırıcı ajan görevi yapan TEA farklı oranlarda eklenerek aşınma bulamacı üretimi yapılmış ve denim ürünler üzerinde etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada oksit türlerinin parçacık boyutunun, alüminyum oksit içindeki α -Al₂O₃ oranının, spesifik yüzey alanlarının (BET) ve Al₂O₃ içindeki safsızlıkların da etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum oksit, denim, eskitme

ToCite: TÜRKOĞLU, S., CEYHAN, G., GÜNEŞOĞLU, C., TABAŞ ASİLTÜRK, E., ESEN, A., (2023). DEVELOPMENT OF PERMANGANAT ALTERNATIVE EFFECT WASHING CHEMICALS IN DENIM WASHING PROCESSES. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(3), 573-579.

INTRODUCTION

When we look at the textile sector, processes such as aging, patterning, dyeing, resin and chemical application are applied on clothing products such as trousers, shorts and jackets, which are produced from all kinds of fabrics such as jeans and linen (Petrie,1976). As a traditional method, some attrition processes are carried out in order to give the denim fabric trousers or shirts a worn look. Clothing products are generally processed in a waterless environment with stones impregnated with chemicals. The stone used here is mostly pumice. Permanganate or hypochlorite is often used as a chemical. This is a type of wash in which deep spot effects are achieved. In such washings, the color to be obtained after washing completely changes depending on the fastness values of the dyestuffs used in the dyeing phase of the fabric against the chemicals used in snow washing. In recent years, the above mentioned decolorizing chemicals have also been used by impregnating or mixing with various fillers, thus preventing the problems such as holes caused by the stone, especially in knitted products (Technical Guide,2017).

After the ready-to-wear stage of denim fabrics, effect washing processes are applied. For this, pumice stone and chemicals that are harmful to the environment working in low liquor are used. The use of these materials also brings about fastness problems. In order to achieve the bleaching effect in classical methods, the machines work for an average of 90 minutes and cause fatigue and wear of both energy and mechanical parts. The average water consumption for a product is around 80 liters. Especially the high amount of water is quite thought-provoking. In addition, for production facilities, processes such as storing, transporting and loading stones into machines are long and difficult processes. Both materials used in this process have many disadvantages. potassium permanganate is a very strong oxidizing compound. This makes it very harmful for the environment. Today, its use is restricted in many areas. Pumice stone is also a material that needs continuous use due to its difficulty in use (transportation, transportation, loading, storage) and not being long-lasting (low strength). Its reuse is very low. Worn pumice stones after use turn into fine powder and are used in different areas as waste such as aerated concrete and pumice production (Baran et al., 2010).

The main bleaching agent in bleaching fluids used in abrasion or paint removal processes is not sodium hypochlorite itself, but hypochlorous acid formed from it in a pH-sensitive balance. In order to provide analytically mild bleaching conditions, the optimum range for the most effective bleaching known should be between pH 9.0-11.5 (Bosman, 2007). Since under practical conditions in industrial production it is difficult to keep pH levels below 10 constant, it is necessary to initially select chemicals that will have a pH range of 11.0-12.5 (BS EN ISO 105-X12, 2017). Aluminum oxide is one of the inorganic materials with abrasive effect (BS EN ISO 13934- 1,2017). Aluminum oxide is chemically stable and very hard and corrosive in terms of its crystal structure. Generally, it is used intensively to remove the surface roughness in polishing processes (Wiberg & Holleman, 2001).

METARYAL AND METHOD

In this study, it is aimed to use pure aluminum oxide powders in micro size (250-500 μm) as an alternative to the use of pumice stone and potassium permanganate in order to achieve a washing effect. First of all, in order to get rid of possible moisture or other impurities in the commercially available Al_2O_3 powders from ZİBO; It was mixed with ethyl alcohol at a ratio of 1:3 in a mini reactor under pressure at 100 °C for 1 hour. It was then cooled to room temperature and removed from the evaporator to separate it from its solvent. The resulting powders were dried in an oven at 1000 °C for 3 hours. In the second part, 100 g of Al_2O_3 , 250 mL of water and 1.7 mmol of liquid paraffin were added to the mini-reactor and mixed under 2 bar pressure, 120 °C, for approximately 1 hour. 50 gr Al_2O_3 and 0.4 mmol TEA as a compatibilizing agent were added on it to provide consistency, and mixing was continued at 350 rpm for about half an hour and at room temperature. At this stage, the sample turned into slippery and irregular lumps of approximately 2-3 mm in diameter. The resulting material will hereinafter be denoted by the A1 code. The material that came to room temperature was weighed and preserved. Figure 1 shows the synthesis phase and the material produced. The obtained material was characterized by FTIR and SEM/EDX analysis.

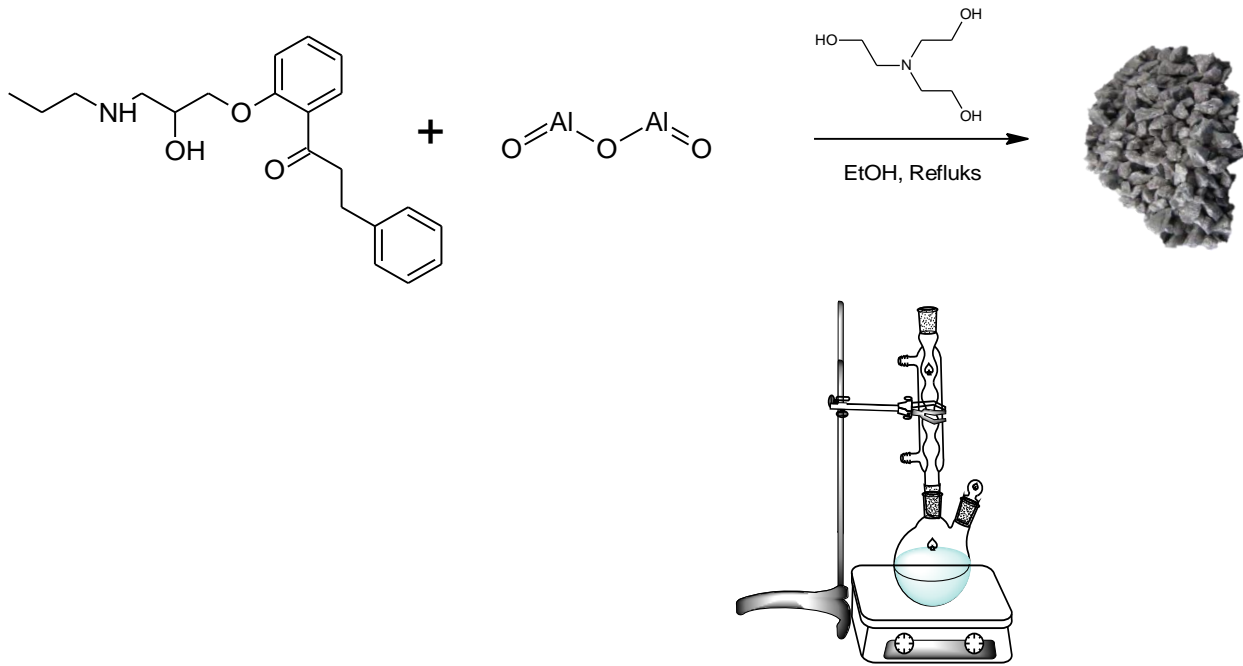


Figure.1 Diagram Showing the Synthesis Steps of A1

In the third part, denim samples determined with the abrasive sludge obtained were subjected to dry washing process in BAYKAN Denim. We used the dry washing option in the business where wet and dry washing is usually carried out. For this; samples were placed in a pilot drum wash at room temperature (Figure 2). A1 coded aluminum oxide-based abrasive mud that we prepared on denim was added. It was washed dry for approximately 45 minutes. Afterwards, the samples were taken to the drum dryer and subjected to the drying process. This process was continued at 75°C for 30 minutes. The samples were checked under the light cabinet and the wear effects were observed.



Figure 2. Dry Washing Process

In this study, in the washing and drying processes; changes on the effect were investigated depending on temperature, time and A1 concentration. Looking at Table 1, changes in time, temperature and amount of material used for the effective washing process were examined.

Table 1. Washing Effect Run Rating For A1

A1	Washing			Drying			
	Temperature (°C)	25			75		
	Time (min)	15	30	45	15	30	45
Mass (gr)	100	*	*	**	*	**	***
	200	*	**	***	*	**	***

*:bad, **:good, ***:best

In Table 1, washing and drying are examined as two separate processes. Strong effects are seen as the amount of substance increases and the washing time increases in the washing process. However, in drying, even if the amount of substance increases, there is an improvement in effecting with increasing time, but good results are seen even with low amount of substance.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, carried out in Baykan Denim R&D center, it is aimed to achieve an aging effect on denim without the use of chemicals that are harmful to the environment, especially in a waterless environment. For this, firstly, the purification of α forms of aluminum oxide in ethyl alcohol was carried out. First of all, an laboratory-type condensation system was set up and mixing was carried out in an air atmosphere, at 100 °C, for approximately 1 hour. Particle sizes and distribution of aluminum oxides were determined from the images obtained by the Bruker brand SEM device in Kahramanmaraş Sütçü İmam University, USKIM Central Laboratories (Figure 3).

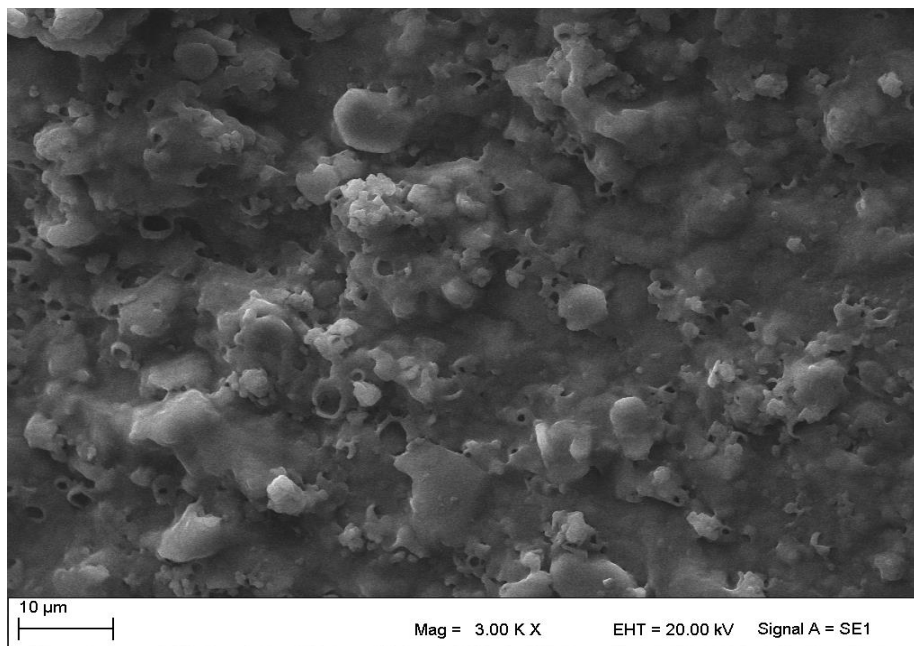


Figure 3. SEM image of Al_2O_3 Particles

When Scanning Electron Microscope (SEM) image was examined, it was determined that it contains 0.13% Na_2O , 0.026% CaO , 0.021% Fe_2O_3 , 0.044% SiO_2 and 94.6% $\alpha-Al_2O_3$. The particle size distribution is; measured as $>112 \mu m$ (%) 29-47, $110-60 \mu m$ (%) 31-57, $60-45 \mu m$ (%) 11-3, $<45 \mu m$ (%) 1-0. As it can be understood from the EDX analysis, it is seen that $\alpha-Al_2O_3$ is prepared in pure and balanced particle size. The carbon peaks seen in the structure are due to the coating of the sample with carbon before the SEM analysis (Figure 4) (Srisawad et al.,2012; Ersching et al.,2012; Greer & De Hosson, 2011)

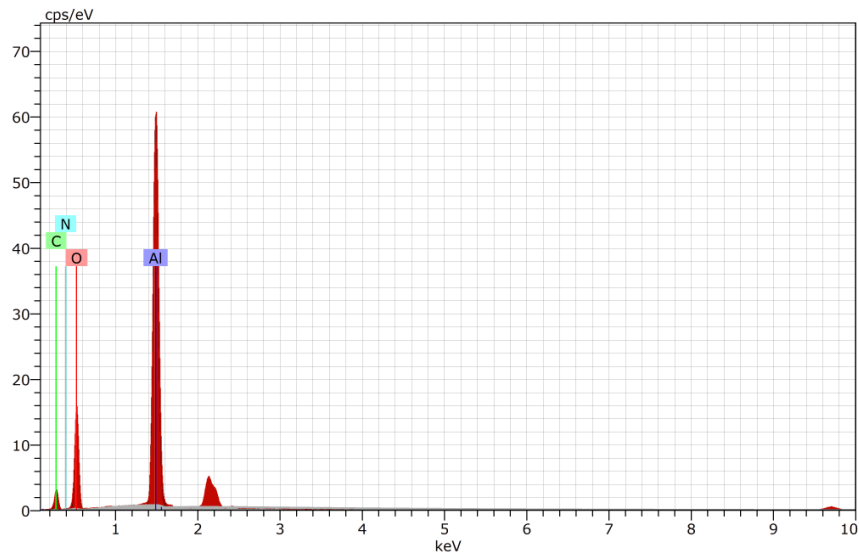


Figure 4. Al₂O₃ SEM/EDX graph

The images obtained as a result of the studies on denim of the prepared abrasive slurry are shown in Figure 5. Studies were carried out on the front, back and leg parts of the denim trousers sample. It contains 98% cotton and 2% Elastane in black and blue denims. As seen in examples 1 to 5 in Figure 5, wear marks are clearly visible on the hems, especially in the seam areas. On the front, the worn surfaces are more prominent, especially in the pockets and seams. On the zipper part (7), the most obvious wear effect is seen. It exhibited intense wear patterns on the seams on the back parts.



Figure 5. Images of the Denim Parts Before and After Washing, 1-5 Hems, 6,7 and 9 Front Parts, 8,10 Back Parts

Potassium permanganate and pumice stone are used in etching with traditional methods. The difference between the aging effect obtained as a result of the washing and drying processes made with this method and the effecting process made with aluminum oxide-based abrasive mud is given in Figure 6.



Figure 6. Aging Effect Study With Different Materials, 1) Pumice Stone and $KMnO_4$, 2) Al_2O_3 Based Abrasive Slurry

As seen in Figure 6, in the first image, the appearance obtained after washing and drying with pumice stone and $KMnO_4$ used in the traditional method and the appearance obtained by using Al_2O_3 -based abrasive slurry are compared. In the first image, the rate of wear and tear is quite high and it destroys the fibers. It gives more destruction than the desired abrasive appearance effect.

However, in the second image, the desired aging effect shows the desired effect without damaging the fibers too much.

CONCLUSION

In general, the combination of $KMnO_4$ and pumice stone, which is used in denim effecting processes made with classical methods, may be restricted or even banned and prevented from being used in the future due to the cost and the fact that permanganate is quite harmful for the environment. For this reason, it is quite remarkable that the aluminum-based slurry, which we recommend in our study, which is environmentally friendly and will abrade the fibrous structures more softly in terms of its crystal lattice structure, is suitable both in terms of effecting and cost. The findings we obtained in the effects studies, even when applied only as a slurry, gave very good visuals. Significant aging effects were observed especially on the hems, back pocket edges and seams. In the next step, in order to bring the prepared slurry to the pumice stone structure, it will be combined with phenolic resin to obtain a stone image. The biggest difference here is that the pumice stone cannot be recycled. On the other hand, as the aluminum oxide particles erode, they will turn into dust and be recovered from the system. The recovered aluminum oxide particles will be used as input material in the abrasive sludge process again.

KAYNAKLAR

A. Baran, A. Fiedler, H. Schulz, M. Baranska. (2010). "In situ Raman and IR spectroscopic analysis of indigo dye", *Anal. Methods* 2,1373–1376.

Adobe technical guide (2017). The HSB/HLS colour model.

BS EN ISO 105-X12. (2017). Tests for colour fastness, Colour fastness to rubbing, Milton Keynes: BSI.

BS EN ISO 13934- 1. (2017). "Tensile Properties of Fabrics. Determination of Maximum Force and Elongation at Maximum Force using the Strip Method", Milton Keynes: BSI.

BS EN ISO 5084. (2017). Textiles. Determination of thickness of textiles and textile products, Milton Keynes: BSI.

C.J.S. Petrie, M.M. Denn. (1976). "Instabilities in polymer processing", *American Institute of Chemical Engineers*, 22, 209.

Ersching, K., Dorico, E., Da Silva, R. C., Zoldan, V. C., Isoppo, E. a., Viegas, a. D. C., & Pasa, a. a. (2012). Surface and interface characterization of nanoporous alumina templates produced in oxalic acid and submitted to etching procedures. *Materials Chemistry and Physics*, 137(1), 140–146.

Greer, J. R., & De Hosson, J. T. M. (2011). Plasticity in small-sized metallic systems: Intrinsic versus extrinsic size effect. *Progress in Materials Science*, 56(6), 654–724.

J. Bosman. (2007). Processes and Strategies for Solid State Q Switch LASER marking of Polymers, PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands.

Srisawad N., Chaitree W., Mekasuwandumrong O., Praserthdam P. and Panpranot J.(2012). “Formation of CoAl₂O₄ Nanoparticles via Low-Temperature Solid-State Reaction of Fine Gibbsite and Cobalt Precursor”, *Journal of Nanomaterials*, 108369, 8.

Wiberg, E ; Holleman, AF. (2001). *Inorganic Chemistry*. Elsevier. ISBN 978-0-12-352651-9.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :27.09.2022
Kabul Tarihi :28.07.2023

Received Date : 27.09.2022
Accepted Date : 28.07.2023

PREVALENCE OF GRAM-NEGATIVE BACTERIA ISOLATED FROM FRUIT AND VEGETABLES RETAILED IN ADANA PROVINCE

ADANA İLİNDE PERAKENDE SATILAN MEYVE VE SEBZELERDEN İZOLE EDİLEN GRAM-NEGATİF BAKTERİLERİN YAYGINLIĞI

Mevhibe TERKURAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-3150-459X)
Zerrin ERGİNKAYA² (ORCID: 0000-0001-6208-2927)
Fatih KÖKSAL³ (ORCID: 0000-0003-0790-1525)

¹Osmaniye Korkut Ata University, Department of Gastronomi and Culinary Arts, Osmaniye, Türkiye

²Çukurova University, Department of Food Engineering, Adana, Türkiye

³Çukurova University, Department of Clinical Microbiology, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mevhibe TERKURAN, mevhibeterkuran@korkutata.edu.tr

ABSTRACT

In this study, 65 samples of fresh products (leafy vegetables, ready-to-eat mixed salads, and fruits) retailed in Adana province of Türkiye were investigated for presence of Gram-negative bacteria. *Salmonella* spp. was undetected in any samples. However, *Klebsiella pneumoniae* (22%), *Stenotrophomonas maltophilia* (15%), *Citrobacter freundii* (11%), *E. coli* (11%), *Klebsiella oxytoca* (11%), *Acinetobacter* spp. [*A. baumannii*, *A. pittii*, (7%)], *Pseudomonas putida* (7%), were the predominant microorganisms and were detected in (19/65) 29.2% of samples by MALDI-TOF system. Their bacterial counts were between 3.6 and 8.3 log CFU/g. Strains of *Enterobacter ludwigii* (4%), *Delftia lacustris* (4%), *Burkholderia cenocepacia* (4%), and *Burkholderia vietnamiensis* (4%) were less detected. Our results revealed the fruits and vegetables produced in Adana province generally comply with microbiological criteria of the Turkish Food Codex interms of *Salmonella* spp., but higher bacterial count of *E. coli* (between 5.8 and 6.3 log CFU/g) was found. Besides, *Escherichia coli*, *Acinetobacter* spp., *Klebsiella pneumoniae*, *Citrobacter freundii*, and *Stenotrophomonas maltophilia* species could be risky to human health.

Keywords: Contamination, Gram-negative bacteria, fresh produce, foodsafety.

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin Adana ilinde perakende satışı yapılan 65 adet taze ürün örneğinde (yapraklı sebzeler, hazır karışık salatalar ve meyveler), Gram- negatif bakteri varlığı araştırılmıştır. *Salmonella* spp. hiç bir örnekte bulunmamıştır. Ancak, *Klebsiella pneumoniae* (%22), *Stenotrophomonas maltophilia* (%15), *Citrobacter freundii* (%11), *E. coli* (%11), *Klebsiella oxytoca* (%11), *Acinetobacter* spp. [*A. baumannii*, *A. pittii*, (%7)], *Pseudomonas putida* (%7) baskın mikroorganizmalar olup, örneklerin (19/65) %29.2'sinde MALDI-TOF sistemi ile tespit edilmiştir. Bakteri sayıları 3.6 ile 8.3 log CFU/g arasında bulunmuştur. *Enterobacter ludwigii* (%4), *Delftia lacustris* (%4), *Burkholderia cenocepacia* (%4) ve *Burkholderia vietnamiensis* (%4) suşları ise daha az oranda tespit edilmiştir. Sonuçlarımız Adana ilinde üretilen meyve ve sebzelerin, *Salmonella* spp. açısından Türk Gıda Kodeksi mikrobiyolojik kriterlerine genel olarak uygun olduğunu, ancak *E. coli* sayısının daha yüksek olduğunu (5.8 ile 6.3 log CFU/g arasında) ortaya koymuştur. Ayrıca, *Escherichia coli*, *Acinetobacter* spp., *Klebsiella pneumoniae*, *Citrobacter freundii* ve *Stenotrophomonas maltophilia* türleri, insan sağlığı için riskli olabilir.

Anahtar kelimeler: Kontaminasyon, Gram-negatif bakteriler, taze ürünler, gıda güvenliği

INTRODUCTION

In the last decade, foodborne outbreaks associated with the consumption of fresh vegetables and fruits have been increasing worldwide (Lynch et al., 2009; Carvalheira et al., 2017). In the United States, the proportion of all foodborne outbreaks reported with a defined food source associated with consumption of fresh fruit and vegetables was 0.7% in the 1970s; In the 1990s, this rate increased to 6%, and in 2000s this rate reached 13%. Similarly, an outbreak of *Listeria monocytogenes* in European countries that affected Austria, Denmark, Finland, Sweden, and the United Kingdom between 2015 and 2018 was reported to be caused by contaminated frozen vegetables (EFSA, 2018). Recently (June 2020), it was reported that the *Salmonella* Newport epidemic (1127 cases, 167 hospitalizations) in the USA, which affected approximately 48 States, was caused by the consumption of red onions (Sivapalasingam et al., 2004; EFSA, 2018; Colosi et al., 2020). Numerous foodborne bacteria cause bacterial intoxication amongst these the most important and most frequently encountered are *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp., *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Bacillus cereus*, *Clostridium* spp., *Escherichia coli* O157:H7, *Shigella* spp., *Yersinia enterocolitica*, *Brucella* spp., and *Aeromonas* spp. (Abebe et al., 2020; Sun et al., 2021). Among these bacteria, *Salmonella enteritidis* and *Campylobacter* spp. takes the first place in terms of disease potential. The crucial pathogens of them; *E. coli* serotype O157:H7 (included in the Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) group) is serious in humans and most often the cause lethal infections (HUS; Hemolytic Uremic Syndrome), pathogens transmitted by food all over the world in recent years are one of the most important major public health hazards (Luna Guevara et al., 2019).

The majority of gastrointestinal infections are linked to the fresh produce contaminated with pathogenic bacteria in particular the *Enterobacteriaceae* spp. (Ehuwa et al., 2021). In general, fruits and vegetables carry non-pathogenic/opportunistic microorganisms; during many production practices, such as growing, harvesting, transport, storage, and subsequent processing, these products can be contaminated with pathogens of animal and human origin. These products, which were considered seasonal until recently, have increased rapidly in recent years because they are considered healthy foods. Besides, these foods are consumed raw; their microbial content poses a risk to consumer health (Carvalheira et al., 2017; Ehuwa et al., 2021). The presence of pathogenic and non-pathogenic bacteria carrying antibiotic resistance genes in fresh vegetables and fruits, and the spread of antibiotic resistance genes through possible horizontal gene transfer among these bacteria may be in question (Falomir et al., 2010a; Ehuwa et al., 2021). In the last few years, antibiotic-resistant Gram-negative bacteria have become a serious problem worldwide (Carvalheira et al., 2017; Ehuwa et al., 2021).

The coliform group bacteria that show fecal characteristics spread to the environment through feces, since they are found in the intestines of humans, animals, and birds. Therefore, *E. coli* an important member of coliforms is an indicator species of fecal contamination in foods. *Acinetobacter* spp. (which are opportunistic bacteria), and important *Enterobacter* species: *Klebsiella* spp., *Citrobacter freundy*, and *Salmonella* spp. are usually found in soil, water, and fresh produce (Heaton and Jones, 2008). Besides, both *Enterobacter* and *Klebsiella* species, primarily *E. cloacae* and *K. pneumoniae*, and to a minor extent other species, have a crucial clinical impact because of the emergence of antibiotic resistance around the world (Dunn et al., 2019). The endophytes, such as *Streptomyces* species, *Klebsiella pneumonia*, *Morganella morganii*, and *Pantoea agglomerans* do not usually cause symptoms in plants, but they are clinically important (Kirzinger et al., 2011). Although most vegetable processors and consumers assume that washing fresh vegetables will decrease the microbial load on their surface, studies have shown that washing with water alone is not effective in declining the microbial population in fresh vegetables (Carvalheira et al., 2017).

As can be seen in studies conducted in several countries in the world, it is known that there are significant microbial contamination problems in fresh produce. However, it is of great importance to determine what kinds of health risks are caused by these detected microbiological problems (Ehuwa et al., 2021; Kirzinger et al., 2011). Besides, the emergence of antibiotic resistance among Gram-negative *Enterobacter* species threatens the effective prevention and treatment of an increasing number of infections all over the world.

Therefore, in this study, raw or unprocessed fruits and vegetables, which are one of the ways of transmission of Gram-negative bacteria to humans, were evaluated to determine the safety of fruits and vegetables sold commercially in the South region of Türkiye.

MATERIAL AND METHOD

Material

In the present study, 65 food samples [n=25 fruit; apples, pears, strawberries, bananas, n=25 vegetables; lettuces, parsleys, purple cabbages, and n=15 packet salads; mixed ready to eat salads] were purchased from 3 local markets and 1 bazaar located in Adana province (Southern part of Türkiye) from 2019 March to September 2021. All food samples originated from Turkish food production and were processed in Southern Türkiye. All samples were transported to the microbiology laboratory (University of Çukurova, Department of Food Engineering) in a sterile container as soon as possible.

Method

Bacterial Strains and Growth Conditions

The reference methods: EN/ISO 6579 for *Salmonella* spp. and EN/ISO 16649-2 for *E. coli* were applied respectively to the isolation and counting of pathogenic/Gram-negative bacteria in fresh products (Table 2) (Turkish Food Codex, 2011). Sample preparation and homogenization were performed under aseptic conditions; 25 g of samples were added into sterile filter-stomaching bags (Isolab) and 225 mL of buffered peptone water was added into the stomaching bags and homogeneously mixed in a stomacher (Bagmixer-Interscience, France) twice for 1 min. Each sample was serially diluted with buffered peptone water (10^{-3}). Then 0.1 mL each of the 10^{-2} and 10^{-3} dilution fractions was separately spread plated onto a selective agar [for *Enterobacteriaceae* spp., Violet Red Bile Glucose (VRBD) Agar (Merck 1.10275, Deutschland); for *E. coli*, Tryptone Bile X-Glucuronide (TBX) Agar (LAB-M HAL003); for *Acinetobacter* spp. CHROM agar™ *Acinetobacter* (CHROM agar, Paris, France)] and Mac Conkey agar plates (Oxoid), and incubated at 30-37 °C for 24 h. Isolation and counting of the bacteria took part in two parallel processes.

The isolation of *Enterobacteriaceae* spp.; further bacterial species-level identification of suspicious isolates took place on selective agar plates mentioned above. The presumptive colonies (1-2 mm in diameter, red and ring-shaped) were considered as *Enterobacteriaceae*; colonies with opaque bluish-green color were considered as *E. coli*. Suspected colonies were inoculated on Tryptone Soy Agar (TSA) plates containing 5% sheep blood (Oxoid) media for pure culture. Then following biochemical tests were performed; catalase production, Gram staining, motility, and oxidase tests in line with Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. The colonies (non-motile, Gram-negative, catalase-positive, oxidase-negative) were identified by MALDI-TOF (Bruker, Germany) system (Carvalho et al., 2017; Lupo et al., 2014; Espinal et al., 2012; Turkish Food Codex, 2011; Holt et al., 1994).

Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using SPSS 17 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) version, expressing the values in mean and standard deviations shown by descriptive statistics (Özdamar, 1999).

RESULTS AND DISCUSSION

A total of 27 Gram-negative bacteria were identified from 65 fruit and vegetable samples. The highest numbers of bacterial species were obtained from lettuce samples. The majority of the isolates identified; were *Klebsiella pneumoniae* (6, 22%), and *Stenotrophomonas maltophilia* (4, 15%), respectively (Figure 1). The viable bacterial counts of the identified species and their sources were shown in (Table 1). In this study, *E. coli* (3, 11%) was isolated from lettuce and purple cabbage samples (Table 1 and Figure 1), while *Salmonella* spp. was not isolated from any of the samples.

Different types of freshly consumed vegetables contain many types of microorganisms inside and on the surface of the plant tissue. Fresh fruits and vegetables have shown increasing levels of bacterial contamination worldwide. Similarly, it is observed in this study that most of the fresh produce consumed raw/undercooked in Southern Türkiye are contaminated with *Enterobacteriaceae* species. Various factors affect the being of *Enterobacteriaceae* spp. in fruits and vegetables. These contamination factors are respectively the types of fruits and/or vegetables, soil contact, and seasonal differences (Ruimy et al., 2010; Mesbah Zekaret et al., 2017). Fruits and vegetables can be contaminated indirectly through fecal bacteria from animals during fertilization or through direct contact with humans during harvest, processing, and packaging. The production stages: harvesting, transporting, processing, packaging, washing, and selling of fruits and vegetables by untrained persons can cause bacterial contamination and pose a risk to public health (Lynch et al., 2009; Ruimy et al., 2010; Igiehon et al., 2020). Direct contact with

these products usually occurs between sellers and consumers. Schwaiger et al. (2011b) confirmed this situation and reported that the contamination of fruits and vegetables is higher at the cultivation stage. In a similar study conducted in Bangladesh by Alam et al. (2015), it was determined that almost all vegetable samples were highly contaminated with pathogenic bacteria. Pathogens including *Klebsiella* spp., *Staphylococcus* spp., and *Pseudomonas* spp. were found to be dominant. In addition, *Klebsiella* spp., *Bacillus* spp., *Listeria* spp, *Escherichia coli*, and *Vibrio* spp., were also detected. Their results are in line with our study in terms of Gram-negative microorganism species.

Table 1. Distribution of the Isolates and Viable Bacterial Counts in Different Fruit and Vegetable Samples and Results of MALDI- TOF MS

No	Isolate No	Fruits/vegetables	Bacterial species	MALDI-TOF MS Score	Origin	Bacterial count range (log CFU/g Min-Max)	Bacterial count range Mean (log CFU/g \pm SD)
1	F-45	Apple (red)	<i>A. pittii</i>	1.890	Market-1	4.1-5.8	5.07 \pm 0.76
2	F-53	Spinach	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.206	Market-1	4.1-5.8	5.00 \pm 0.73
3	F-46	Apple (green)	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.097	Market-1	4.1-4.8	4.37 \pm 0.14
4	F-4	Pear	<i>Citrobacter freundii</i>	2.255	Market-1	4.5-5.3	5.03 \pm 0.21
5	F-5	Lettuce	<i>E. coli</i>	1.911	Market-1	5.8-6.3	6.20 \pm 0.13
6	F-1	Parsley	<i>Klebsiella oxytoca</i>	2.276	Market-1	6.1-6.6	6.40 \pm 0.07
7	F-7	Banana	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.322	Market-1	3.6-4.8	4.40 \pm 0.48
8	F-48	Purple cabbage	<i>Citrobacter freundii</i>	2.299	Market-2	5.8-6.6	6.30 \pm 0.19
9	F-52	Spinach	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.163	Market-2	4.1-4.8	4.37 \pm 0.14
10	F-7	Lettuce	<i>E. coli</i>	1.911	Market-2	5.8-6.2	6.07 \pm 0.07
11	F-47	Purple cabbage	<i>E. coli</i>	1.943	Market-2	5.8-6.3	6.07 \pm 0.06
12	F-34	Strawberry	<i>Burkholderia vietnamiensis</i>	1.997	Market-2	4.5-6.3	5.70 \pm 1.08
13	F-36	Banana	<i>Delftia lacustris</i>	1.786	Market-2	4.5-5.3	5.00 \pm 0.19
14	F-37	Banana	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	1.770	Market-2	4.5-5.3	5.03 \pm 0.21
15	F-53	Spinach	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	1.717	Bazaar	5.8-6.3	6.07 \pm 0.06
16	F-4	Pear	<i>Pseudomonas putida</i>	1.876	Bazaar	5.1-5.6	5.43 \pm 0.08
17	F-55	Lettuce	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	1.720	Bazaar	4.2-4.8	4.43 \pm 0.10
18	F-50	Parsley	<i>Pseudomonas putida</i>	1.897	Bazaar	4.5-6.3	5.70 \pm 1.08
19	F-34	Strawberry	<i>Burkholderia cenocepacia</i>	2.023	Market-3	5.8-6.3	6.13 \pm 0.08
20	F-47	Purple cabbage	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	1.768	Market-3	3.7-5.8	5.03 \pm 1.54
21	F-55	Lettuce	<i>Enterobacter ludwigii</i>	2.229	Market-3	4.5-6.3	5.70 \pm 1.08
22	F-54	Purple lettuce	<i>Citrobacter freundii</i>	2.219	Market-3	6.1-6.6	6.33 \pm 0.06
23	F-36	Lettuce	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.040	Market-3	6.1-8.3	7.50 \pm 1.48
24	F-34	Strawberry	<i>Klebsiella oxytoca</i>	2.228	Market-3	4.5-6.3	5.67 \pm 1.02
25	F-38	Lettuce	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	2.307	Market-3	6.8-8.3	7.77 \pm 0.70
26	F-2	Dill	<i>Klebsiella oxytoca</i>	2.245	Market-3	6.1-6.6	6.30 \pm 0.07
27	F-65	Packet salad	<i>A. baumannii</i>	2.062	Market-3	3.8-5.8	5.00 \pm 1.12

Min: Minimum, Max: Maximum, SD: Standard Deviation

E. coli is a normal part of the intestinal microflora of many healthy animals, including humans. However, some strains can cause diseases, these pathogenic species are increasingly associated with contamination of vegetables such as fresh spinach and lettuce (Papadopoulou et al., 2019; Abebe et al., 2020). Bacterial colonization of freshly grown plants can occur at high levels in outer tissue, although some studies have reported bacteria detected in plant tissue as well. The rate of *E. coli* detected in the total isolates and samples was found to be (3/27) 11% and (3/65) 4.6% respectively in the present work. The lowest total counting results of *E. coli* in the samples were found at 5.8 log CFU/g and the highest count was 6.3 log CFU/g (Table 1). Our result was lower than a similar study conducted to determine the microbiological quality of salads sampled in the food service units of a military hospital in Ankara (Türkiye); 70 salads were investigated, and *E. coli* was detected in 11.4% of these samples and was subsequently compared to the food samples. It has been observed that there is a high microbial load (Ayçiçek et al., 2004).

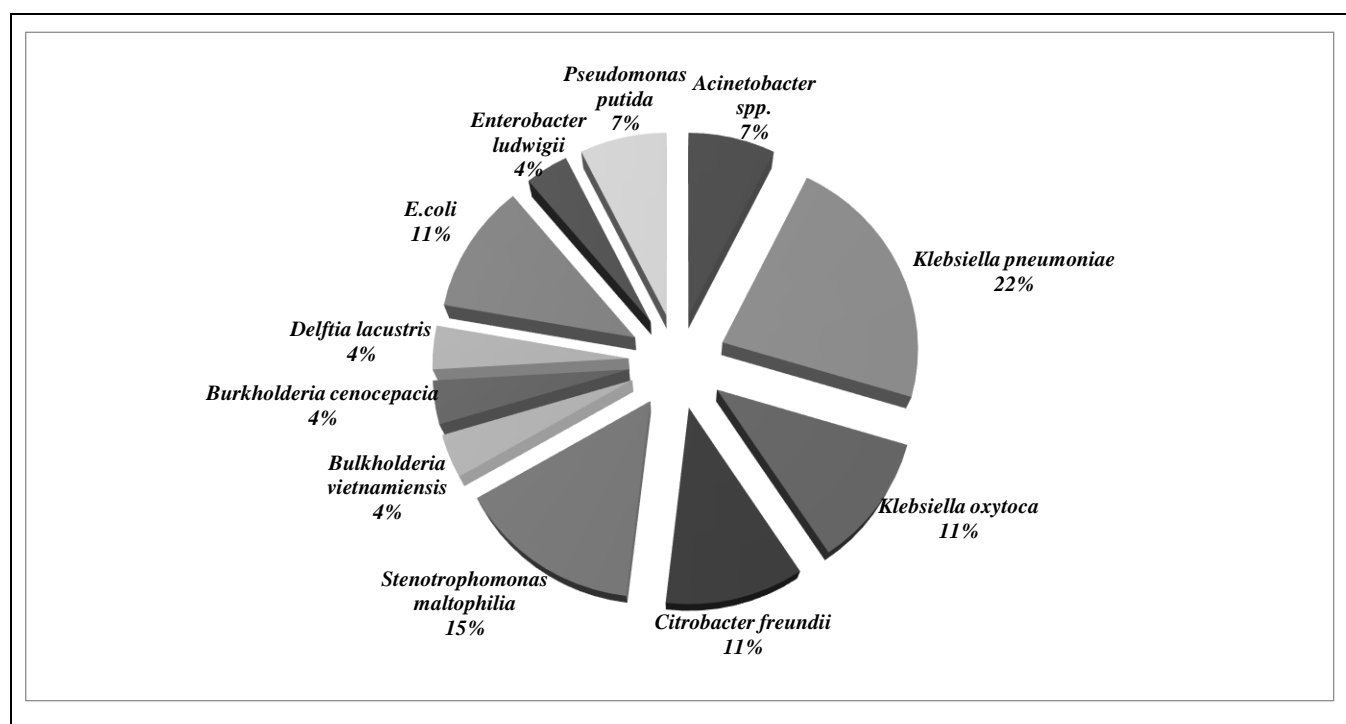


Figure1.The Distribution Rate of Gram-Negative Bacteria Isolated from Fresh Produce

Similarly, our results (11%) were lower than in another study in Kars city of Türkiye, in the analysis of 40 salad samples collected from 4 different restaurants; *E. coli* was detected higher level than the limits of the Turkish Food Codex in 8 (20%) of the samples (Gülmez et al., 2005). By contrast, in a study conducted in Brazil about Ready-to-eat of minimally processed leafy green vegetables, in which 162 samples of salads were collected, *E. coli* was detected in 86 (53.1%) of these samples was higher than our results (De Oliveira et al., 2011). In another study conducted in England, in line with our study, 4.7% of 1213 vegetable salad samples were found to be contaminated with *E. coli* (Meldrum et al., 2009). In a recent study conducted in Bangladesh, 60 ready-to-eat mixed vegetable salad samples were collected, and *E. coli* was found to be 4.98 ± 0.20 to 6.66 ± 0.80 log CFU/g higher than our results (Younus et al., 2020). The main root cause for these varying may depend on geographical differences, sample collection /isolation /identification methods as well as contamination level of the bacteria. In the Turkish Food Codex Microbiological Criteria Regulation, “Fruits and vegetables and their processed products, and other mentioned products.etc., considering the pathogenic bacteria limits for these products; the highest *E. coli* value allowed in these products is 10^3 CFU/g-mL; *L. monocytogenes*, *E. coli* O157, and *Salmonella* spp. should not be found in 25 g. of the sample” (Table 2). Accordingly, in our study, it was determined that 11% of the *E. coli* positive samples (between 5.8 and 6.3 log CFU/g) were higher than the level of legislation.

In international regulations, the presence of bacteria belonging to *Enterobacteriaceae* spp. in foods is used to evaluate their general hygiene levels. According to guidelines of the health protection agency (United Kingdom of Great Britain), the microbiological safety of ready-to-eat foods, classifying *Enterobacteriaceae* count into 3 levels: (1) unsatisfactory (>4 log CFU/g), (2) borderline (2–4 log CFU/g), and (3) satisfactory (<2 log CFU/g) (Colosi et al., 2020; Bolton, 2009). Although the presence of these bacteria in fruits and vegetables is not generally considered dangerous, their high number indicates that hygiene practices are not followed during pre-during-post/production processes (Bolton et al., 2009), The *Enterobacteriaceae* viable count levels in the present study ranged from 3.6 log CFU/g (banana) to 8.3 log CFU/g (lettuce), results which are higher than previous reports that have evaluated the microbial load of fresh fruits and vegetables (Xylia et al., 2019; Uhlig et al., 2017). The highest bacterial load was found in lettuce (8.3 log CFU/g), parsley, purple cabbage, purple lettuce, dill (6.6 log CFU/g), spinach, and strawberry (6.3 log CFU/g) (Table 1). The lowest bacterial count was found in the banana sample (F7), (3.6 log CFU/g). Leafy and bulbous vegetables showed the highest microbial diversity associated with higher CFU counts. Leafy vegetables are more vulnerable to micro-damage caused by environmental factors (heavy rain, wind, packaging/transportation conditions, etc.) because of their natural structure, this makes further possible contamination with various bacteria found in the soil more likely. These lesions may also act as an entry portal/site for the bacteria that preferentially adhere easily to cut edges. Bacteria counting level was less in bananas can be attributed to their growth above ground and they are not coming to contact with fertilizers and wastewater, thus

preventing contamination with fecal *Enterobacteriaceae*. However, human contamination may have occurred in these products (Bekele et al., 2020).

In this study, *Salmonella* spp. was not detected in any of the samples. This result may depend on geographical differences or selected methods, sample collection, contamination level, etc. However, Gram-negative various bacteria were detected in the present work. Besides, *Acinetobacter* spp. (especially *Acinetobacter baumannii*, *A. pittii* species were nosocomial infection agents worldwide with higher antibiotic-resistant species), *Citrobacter* spp., *Klebsiella pneumonia*, *Pseudomonas* spp. as well as *E. coli* may play a role in antibiotic-resistant-bacterial development by acting as a permanent source of antibiotic resistance and virulence genes. They can accumulate resistance markers that can be transferred to more virulence bacteria it can also enable the transfer of other resistance and virulence genes, such as plasmids, transposons, and integrons, in addition to specific resistance and virulence genes (Falomir et al., 2010a; Usui et al., 2019). If both virulence markers and antibiotic resistance are located on the same plasmid or if naturally virulent organisms acquire a resistance plasmid and spread between hosts, this can also cause an epidemic (Usui et al., 2019). Therefore, monitoring these bacteria in fresh produce is necessary to eliminate the spreading of antibiotic-resistant bacteria.

Our results confirmed the hypothesis about microbial contamination can be occurred in fresh produce with opportunistic pathogens including *Acinetobacter* spp., *Enterobacteriaceae*, *K. pneumonia*, *P. putida*, and other species, which should be considered a food safety concern. Besides, this contamination can be the cause of crucial health problems in immunocompromised/children/elderly individuals. In addition, fresh produce can act as a carrier of antibiotic-resistant bacteria from the farm to the consumer (Falomir et al., 2010a; Falomir et al., 2010b; Schwaiger et al., 2011a; Schwaiger et al., 2011b).

Table 2. Microbiological Criteria of Pathogenic Bacteria in Fruit and Vegetables (Turkish Food Codex, 2011)

Food	Microorganisms /Toxins/Metabolites	Sampling Plan (1)		Limits (2)		Reference Method(3)
		n	c	n	M	
Fruits and Vegetables and their processed products		n	c	n	M	
Washed, chopped, and packed raw vegetables, individually or mixed, as well as frozen and dehydrated vegetables	<i>Salmonella</i> spp.	5	0	0/25g-mL		EN/ISO6579
	<i>Listeria monocytogenes</i>	5	0	0/25g-mL		RN/ISO11290-1
	<i>E. coli</i> O157	5	0	0/25g-mL		ISO16654
Ready to eat and (unpasteurized) fruit and vegetables	<i>E. coli</i>	5	2	10 ²	10 ³	ISO16649-1 or 2
				CFU/g	CFU/g	

(1); n: The number of samples, c: number of samples allowed having values between n and M limit, (2): Unless stated otherwise, the limit is evaluated as CFU/g-mL. CFU: Colony Forming Unit (in solid medium), (3): The latest published versions of the standards used in this regulation are used.

CONCLUSION

This study analyzed the presence of Gram-negative bacteria in retail fresh products in Adana province of Türkiye. The obtained results show that it is necessary to further investigate different types of vegetables and fruits from other regions of Türkiye as well as Middle-East Countries. These findings suggest that products that are generally consumed raw/undercooked, because they are thought to be more beneficial to the human body this way may pose serious health risks under certain conditions. In the food industry, for the elimination/limitation of Gram-negative bacteria in fruits and vegetables; with systems such as HACCP (Hazard Analyses Critical Control Point) and good hygiene practices, all stages of "farm to fork" food processing need to be controlled. Disinfection of fruit and vegetables is an important critical control point in the HACCP system. Proper hygiene practices such as raising food workers' awareness of hygiene, hand washing, and thorough washing of fruits and vegetables before consumption can reduce the risk of infection by these opportunistic pathogens. The elimination/reducing the dissemination of these bacteria may also play a role in preventing the spreading of antibiotic resistance. Therefore, the limitation of Gram-negative-bacterial contamination/proliferation in fresh produce is needed some new policies and regulations; environmental management, manure management practice, application of education programs for food handlers as well as effective handling application from the farms to the markets in the national and international area.

ACKNOWLEDGMENTS

All authors are thankful to Osmaniye Korkut Ata University [This work was supported by the Scientific Research Project Unit of Osmaniye Korkut Ata University (Grant number; OKUBAP-2020-PT 2-001)].

REFERENCES

- Abebe, E., Gugsu, G., & Ahmed, M. (2020). Review on major food-borne zoonotic bacterial pathogens. *Journal of Tropical Medicine*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4674235>
- Alam, M.S., Feroz, F., Rahman, H., Das, K.K., Noor, R. (2015). Microbiological Contamination Sources of Freshly Cultivated Vegetables. *Nutrition & Food Science*, 45(4), 646-658. <https://doi.org/10.1108/NFS-04-2015-0032>
- Ayçiçek, H., Sarimehmetoğlu, B., & Çakiroğlu, S. (2004). Assessment of the microbiological quality of meals sampled at the meal serving units of a military hospital in Ankara, Turkey. *Food Control*, 15, 379-384. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(03\)00101-4](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(03)00101-4)
- Bekele, F., Shumbej, T., Dendir, A., Mesfin, D., Solomon, A., Jemal, A., & Alemayehu, M. (2020). Contamination rate of commonly consumed fresh vegetables and fruits with parasites of medical importance in Wolkite and Butajira Towns of Gurage Zone, Southern Ethiopia. *International Journal of Public Health Science (IJPHS)*, 9(3), 211. <https://doi.org/10.11591/ijphs.v9i3.20395>
- Bolton, E. (2009). Guidelines for assessing the microbiological safety of ready-to-eat, foods placed on the market; *Health Protection Agency: London UK*, p, 33.
- Carvalho, A., Silva, J., & Teixeira, P. (2017). Lettuce and fruits as a source of multidrug resistant *Acinetobacter* spp. *Food Microbiology*, 64, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.12.005>
- Colosi, I. A., Baciu, A. M., Oprea, R. V., Peca, L., Gudat, T., Simon, L. M., & Costache, C. (2020). Prevalence of ESBL, AmpC and carbapenemase-producing Enterobacterales isolated from raw vegetables retailed in Romania. *Foods*, 9(12), 1726. <https://doi.org/10.3390/foods9121726>
- De Oliveira, M. A., De Souza, V. M., Bergamini, A., M. M., & De Martinis, E., C. P. (2011). Microbiological quality of ready-to-eat minimally processed vegetables consumed in Brazil. *Food Control*, 22(8), 1400-1403. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.02.020>
- Dunn, S. J., Connor, C., & McNally, A. (2019). The evolution and transmission of multi-drug resistant *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae*: the complexity of clones and plasmids. *Current Opinion in Microbiology*, 51, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.06.004>
- Ehuwa, O., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). *Salmonella*, food safety, and food handling practices. *Foods*, 10(5), 907. <https://doi.org/10.3390/foods10050907>
- Espinal, P., Seifert, H., Dijkshoorn, L., Vila, J., & Roca, I. (2012). Rapid and accurate identification of genomic species from the *Acinetobacter baumannii* (Ab) group by MALDI-TOF MS. *Clinical Microbiology and Infection*, 18(11), 1097-1103. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2011.03696.x>
- European Food Safety Authority (EFSA) (2018). European Centre for Disease Prevention and Control multi-country outbreak of *Listeria monocytogenes* serogroup IVb, multi-locus sequence type 6, infections linked to frozen corn and possibly to other frozen vegetables. First update, *EFSA Supporting Publ*, 15.
- Falomir, M.P., Gozalbo, D., Sebastia C., & Rico, H. (2010a). Detection and antibiotic susceptibility of coliform bacteria in fresh vegetables. In: *Microorganisms in industry and environment, from scientific and industrial research to consumer products*. Mendez-Vilas A (ed.), Hackensack, NJ: World Scientific Publishing Co, 372-376. https://doi.org/10.1142/9789814322119_0080
- Falomir, M. P., Gozalbo, D., & Rico, H. (2010b). Coliform bacteria in fresh vegetables: from cultivated lands to consumers. Current Research, Technology and Education Topics In *Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*, 2, 1175-1181.
- Gülmez, M., Sezer, Ç., Duman, B., Vatansever, L., Oral, N., & Baz, E. (2005). Lokantalarda tüketime sunulan bazı gıdaların ve içme sularının mikrobiyolojik kaliteleri. *Kafkas Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, 11(1), 5-10.

- Heaton, J. C., & Jones, K. (2008). Microbial contamination of fruit and vegetables and the behaviour of enteropathogens in the phyllosphere: a review. *Journal of Applied Microbiology*, 104(3), 613-626. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03587.x>
- Holt, J.G., Krieg, N.R., Sneath, P.H.A., Stanley, J.T. & William, S.T. (1994). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Williams and Wilkins, Baltimore, 587-685.
- Igiehon, O. O., Adekoya, A. E., Idowu, A. T. (2020). A review on the consumption of vended fruits: microbial assessment, risk, and its control. *Food Quality and Safety*, 4(2), 77-81. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaa014>
- Kirzinger, M. W., Nadarasah, G., & Stavrinos, J. (2011). Insights into cross-kingdom plant pathogenic bacteria. *Genes*, 2(4), 980-997. <https://doi.org/10.3390/genes2040980>
- Luna-Guevara, J. J., Arenas-Hernandez, M. M., Martínez de la Peña, C., Silva, J. L., Luna-Guevara, M. L. (2019). The role of pathogenic *E. coli* in fresh vegetables: behavior, contamination factors, and preventive measures. *International Journal of Microbiology*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2894328>
- Lupo, A., Vogt, D., Seiffert, S.N., Endimiani, A., & Perreten, V. (2014). Antibiotic resistance and phylogenetic characterization of *Acinetobacter baumannii* strains isolated from commercial raw meat in Switzerland. *Journal of Food Protection*, 77, 1976-1981. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-073>
- Lynch, M. F., Tauxe, R. V., & Hedberg, C. W. (2009). The growing burden of foodborne outbreaks due to contaminated fresh produce: risks and opportunities. *Epidemiology & Infection*, 137(3), 307-315. <https://doi.org/10.1017/S0950268808001969>
- Meldrum R.J., Little C.L., Sagoo, S., Mithani, V., Mc Lauchlin J., & De Pinna E. (2009). Assessment of the microbiological safety of salad vegetables and sauces from kebab take-away restaurants in the United Kingdom. *Food Microbiology*, 26(6), 573-7. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.03.013>
- MesbahZekar, F., Granier, S. A., Marault, M., Yaici, L., Gassilloud, B., Manceau, C., & Millemann, Y. (2017). From farms to markets: Gram-negative bacteria resistant to third-generation cephalosporins in fruits and vegetables in a region of North Africa. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1569. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01569>
- Özdamar, K. (1999). Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi. Kaan Kitabevi, Eskişehir, Türkiye, 535s.
- Papadopoulou, E., Haug, L. S., Sakhi, A. K., Andrusaityte, S., Basagaña, X., Brantsaeter, A. L., & Chatzi, L. (2019). Diet as a source of exposure to environmental contaminants for pregnant women and children from six European countries. *Environmental Health Perspectives*, 127(10), 107005. <https://doi.org/10.1289/EHP5324>
- Ruimy, R., Brisabois, A., Bernede, C., Skurnik, D., Barnat, S., Arlet, G., & Andremont, A. (2010). Organic and conventional fruits and vegetables contain equivalent counts of Gram-negative bacteria expressing resistance to antibacterial agents. *Environmental Microbiology*, 12(3), 608-615. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2009.02100.x>
- Schwaiger, K., Helmke, K., Hölzel, C. S., & Bauer, J. (2011a). Antibiotic resistance in bacteria isolated from vegetables with regards to the marketing stage (farm vs, supermarket). *International Journal of Food Microbiology*, 148(3), 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.06.001>
- Schwaiger, K., Helmke, K., Hölzel, C. S., & Bauer, J. (2011b). Comparative analysis of the bacterial flora of vegetables collected directly from farms and from supermarkets in Germany. *International Journal of Environmental Health Research*, 21(3), 161-172. <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.515672>
- Sivapalasingam, S, Friedman, C, R, Cohen, L, & Tauxe, R., V. (2004). Fresh produce: a growing cause of outbreaks of foodborne illness in the United States, 1973 through 1997. *Journal of Food Protection*, 67(10), 2342-2353. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.10.2342>
- Sun, L., Zhang, H., Chen, J., Chen, L., Qi, X., & Zhang, R. (2021). Epidemiology of foodborne disease outbreaks caused by *Nontyphoidal Salmonella* in Zhejiang Province, China, 2010–2019. *Foodborne Pathogens and Disease*, 18(12), 880-886. <http://doi.org/10.1089/fpd.2021.0006>
- Turkish Food Codex (2011). Official newspaper. Turkish Food Codex Regulation on Microbiological Criteria. (29 December 2011) Official Gazette. 2011:28157.

Uhlig, E, Olsson, C, He, J, Stark, T, Sadowska, Z, Molin, G., & Håkansson, Å., (2017). Effects of household washing on bacterial load and removal of *Escherichia coli* from lettuce and “ready-to-eat” salads. *Food Science & Nutrition*, 5(6), 1215-1220.<https://doi.org/10.1002/fsn3.514>

Usui, M, Ozeki K, Komatsu, T, & Fukuda, A, (2019), Tamura, Y, Prevalence of extended-spectrum b-lactamase-producing bacteria on fresh vegetables in Japan. *Journal of Food Protection*, 82, 1663–1666.<https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-19-138>

Xylia, P., Botsaris, G, Chrysargyris, A, Skandamis, P., & Tzortzakis, N, (2019). Variation of microbial load and biochemical activity of ready-to-eat salads in Cyprus as affected by vegetable type, season, and producer. *Food Microbiology*, 83, 200-210.<https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.05.013>

Younus, M.I., Sabuj, A.A.M., Haque, Z.F., Sayem, S. M., Majumder, S., Parvin, M. S., & Saha, S. (2020). Microbial risk assessment of ready-to-eat mixed vegetable salads from different restaurants of Bangladesh Agricultural University campus. *Journal of Advanced Veterinary Animal Research*, 7(1), 34-41. <https://doi.org/10.5455/javar.2020.g390>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.10.2022
Kabul Tarihi : 01.12.2022

Received Date : 27.10.2022
Accepted Date : 01.12.2022

KISMİ GÖLGELENME KOŞULLARINDAKİ FV SİSTEMLERİN DERİN ÖĞRENME TABANLI MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAHMİNİ

DEEP-LEARNING BASED MAXIMUM POWER POINT PREDICTION FOR A PV SYSTEM UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS

Ramazan AKDERE^{1*} (ORCID: 0000-0002-2756-3474)
*Erdal KILIÇ*¹ (ORCID: 0000-0002-1572-6109)
*Ö. Fatih KEÇECİOĞLU*¹ (ORCID: 0000-0001-7004-4947)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ramazan AKDERE, akdereramazan@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, kısmi gölgeleme koşulları (KGK) altındaki bir fotovoltaik (FV) sistemin, maksimum güç noktası (MGN) derin öğrenme yöntemi kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılacak veri seti Matlab/Simulink ortamında FV sistem modellenerek oluşturulmuştur. Bu veriler kullanılarak derin öğrenme ağının farklı katman sayısı ve nöron sayısı için başarısı incelenmiştir. Model başarısı ortalama mutlak yüzde hata (MAPE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama hata karekökü (RMSE) istatistiksel performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen tablo ve grafiklerden eğitim setindeki üç katmanlı ve 64 nöronlu sistemin daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, kısmi gölgeleme koşulları, derin öğrenme.

ABSTRACT

In this study, the maximum power point is estimated using deep learning method for a photovoltaic (PV) system under partial shading conditions. The data set to be used in the study is created by modeling the PV system in Matlab/Simulink environment. The success of the deep learning network is examined for different number of layers and number of neurons using these data. Model success is evaluated with mean absolute percent error (MAPE), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) statistical evaluation criteria. From the tables and graphics obtained as a result of the study, it is observed that the three-layers and 64-neurons system in the training set gives more successful results.

Keywords: Photovoltaic, partial shading conditions, deep learning.

GİRİŞ

Dünyamızda enerji kaynağı olarak en çok fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fiyatının yüksek olması, kaynakların sınırlı olması ve çevre kirliliğine yol açması gibi birçok sorunu bulunması nedeniyle alternatif enerji kaynak arayışlarını artırmıştır (Keçecioglu vd., 2015; Kılıç, 2019). Güneşten dünyamıza bir dakikada ulaşan enerji miktarı dünyanın bir yılda kullandığı enerjiden fazladır. Böylesine büyük ve temiz bir enerji kaynağının kullanılabilmesi için yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ülkeler çevreye zarar veren enerji kaynaklarından uzaklaşmakta ve yenilenebilir enerjiye geçmek için araştırmalar yapmaktadır. Böylece güneş enerjisinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi genellikle ışığı doğrudan elektrige çeviren FV sistemlerle yapılmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi her geçen gün teknolojik olarak ilerlemekte, maliyet bakımından düşüş göstermektedir. Temiz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra kurulumdan sonra düşük maliyetle çalışması gibi nedenlerden dolayı güneş enerjisinin önemi her geçen gün artmaktadır (EİGM, 2021). FV sistemler, tarımsal işletme, endüstriyel işletme, alışveriş merkezi, spor tesisi, konut enerji santrali gibi birçok yerde ihtiyaç duyulan enerjinin bir kısmının veya tamamının karşılanması için kullanılabilir. Ayrıca enerji üretilerek dağıtım şirketlerine satılabilir (Balkan, 2022).

FV hücreler daha büyük akım, gerilim ve güç değerleri elde edilmesi için seri, paralel ve seri-paralel bağlanarak FV panel oluşturulur. FV paneller seri, paralel ve seri-paralel bağlanarak FV dizi oluşturulur. Benzer koşullarda FV paneller ve diziler, FV hücrelerin karakteristik eğrisine sahiptir. Farkları ise çıkışta elde edilen akım, gerilim ve güç değerleridir (Özcelik, 2015).

Şehir merkezleri başta olmak üzere FV sistemlerin kurulumunda dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar vardır. FV panellerin kurulumdan önce gölge ve verim analizlerinin çok iyi yapılması gerekmektedir (Eltez, 2022). Güneş panellerinin üzerine bulut, bina ya da ağaç gölgesi düşmesi, tozlanma gibi nedenlerden dolayı FV panellerin çıkış güçlerinde azalmalar meydana gelir. Bu duruma kısmi gölgelenme koşulu denilmektedir. Panellerin bazı hücrelerinin maksimum verim ile global maksimum güç noktasında (GMGN) çalışırken bazı hücrelerin KGK altında çalışması panel çıkış gücünün yerel maksimum güç noktası (YMGN) ile çalışmasına sebep olabilir. Bu da sistemden elde edilebilecek verimin düşmesine neden olur. Sistemin GMGN çalışmasını sağlamak için değiştir & gözle, artan iletkenlik, kısa devre akımı, açık devre gerilimi gibi maksimum güç izleme algoritmaları kullanılmaktadır. Klasik bu algoritmaların yanı sıra yapay sinir ağları (YSA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), bulanık mantık, ateş böceği algoritması (ABA), guguk kuşu arama algoritması (GKAA) vb. akıllı algoritmalar da geliştirilmiştir (Karakaya, 2021).

FV çıkış gücü tahmini son yirmi yılda birçok araştırmacı ve akademisyenin dikkatini çekmektedir (Mellit vd., 2014). Son dönemlerde süper bilgisayarların da ortaya çıkması sonucunda dünya çapında toplanan büyük miktarda verinin işlenebilmesiyle birlikte birçok araştırmacı tahmin doğruluğunu artırmak için derin öğrenme uygulamaları geliştirmektedir (Mellit vd., 2020).

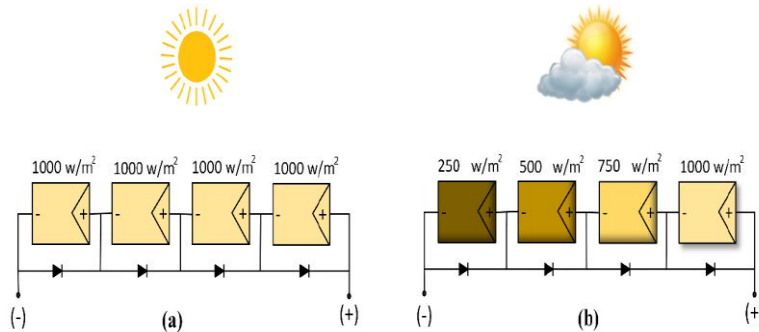
Bu çalışmada, FV sistemlerde KGK altında bulunan 4 adet FV panel seri olarak bağlanmış ve giriş ışınım değerleri (G) (W/m^2), 100'er aralıkla değiştirilerek 10000 adet giriş verisi elde edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında yapılan model ile bu giriş verilerine karşılık gelen 10000 adet çıkış verisi bulunmuştur. Oluşturulan bu veri seti içerisinde 7000 veri öğrenme için, 1500 veri doğrulama için, 1500 veri de test için ayrılmıştır. Ayrılan bu verilerin yapılan tüm çalışma boyunca aynı kalması sağlanarak araştırma sonucunun ortaya çıkabilecek hatalardan arındırılması amaçlanmıştır. Elde edilen veriler derin öğrenme ile her katmanda bulunan nöron sayısı için üç defa eğitilmiştir. Eğitim sonucunda katman sayısının ve nöron sayısının değiştirilmesi durumunda çıkış güçlerinde meydana gelen farklılıkların incelenmesi için MAPE, MAE ve RMSE istatistiksel değerlendirme yöntemleri ile her katmandaki tüm nöron sayıları için yapılan üç eğitimin ortalaması alınmış ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada, daha önceki çalışmalardan farklı olarak eğitim tamamladıktan sonra eğitim setine dâhil olmayan ve ara değerlerden oluşan toplam 100 adet veri ile derin öğrenme modelleri teste tabi tutulmuştur. Ayrıca birçok istatistiksel değerlendirme kriteri ile karşılaştırma yapılarak elde edilen sonuçların tutarlılığı çok daha net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası, kısmi gölgelenme koşulları ifade edilmiş, üçüncü bölümünde derin öğrenme yöntemi ve veri seti açıklanmış, dördüncü bölümde istatistiksel değerlendirme kriterleri belirtilmiş, beşinci bölümde çalışmadan elde edilen bulgular detaylı olarak incelenmiş ve son bölümde çalışmanın sonuçlarına yer verilmiştir.

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE KISMİ GÖLGELENME KOŞULLARI

FV panellerin düzgün güneş ışınımı dağılımındaki bağlantısı Şekil 1. a'da gösterilmiştir. KGK altında FV panellerin güçleri farklılıklar gösterir. Şekil 1.b'de kısmi gölgeleme koşulları altında FV paneller gösterilmiştir. Bu durum sistemden maksimum verim alınmasını engeller. Bu güç farklılıkları dolayısıyla YMGN ortaya çıkar. Maksimum güç noktası takibi (MGNT) teknikleri ile bu FV panellerin GMGN'da çalışması amaçlanır. Yapay zekâ, GMGN elde etmek için kullanılan ve oldukça etkili olan bir yöntemdir (Bassam, 2018; Karakaya, 2021). Düzgün dağılım koşulları altında FV paneller maksimum verim ile çalışırlar. Böylece tüm panellerden o anki ışınım değerine bağlı olarak GMGN'de verim elde edilir. Panellerin bir kısmında KGK oluşması durumunda bu panellerden alınan güçte azalma meydana gelir. KGK altında çalışan paneller YMGN'de çalışır ve verim düşer. Şekil 2'de FV panellerin güç gerilim eğrisi gösterilmiştir (Keskin, 2014; Qassab, 2015). Işık şiddetinin akım-gerilim karakteristiğinde akımı, güç-gerilim karakteristiğinde gücü artırdığı anlaşılmaktadır (Özçalık vd., 2013).

Bu çalışmada, 300 W_p gücünde 4 adet FV panel seri olarak bağlanmıştır. Yapılan çalışma ile KGK altında bulunan FV paneller MATLAB/Simulink ile modellenmiştir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan FV panelin elektriksel parametre ve değerleri verilmiştir. Tablo 2'de FV panel modeli parametre ve değerleri verilmiştir.



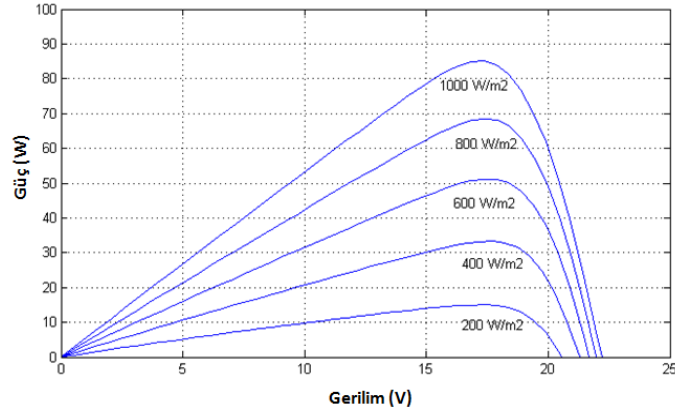
Şekil 1. a. Düzgün Dağılım Altında FV Paneller b. KGK Altında FV Paneller

Tablo 1. FV Panel Elektriksel Parametre ve Değerleri

Parametre	Değer
Güç (W)	300
G : Güç Yoğunluğu (W/m ²)	152,9
I _{mp} : Maksimum Güçteki Akım (A)	8,14
V _{mp} : Maksimum Güçteki Gerilim (V)	36,9
I _{sc} : Kısa Devre Akımı (A)	8,67
V _{oc} : Açık Devre Gerilimi (V)	45
Nominal Çalışmada Hücre Sıcaklığı (°C)	45
Açık Devre Gerilimi Sıcaklık Sabiti (%/°C)	-0,42791
Kısa Devre Akımı Sıcaklık Sabiti (%/°C)	0,086701
Panel Verimi (η)	%15.5

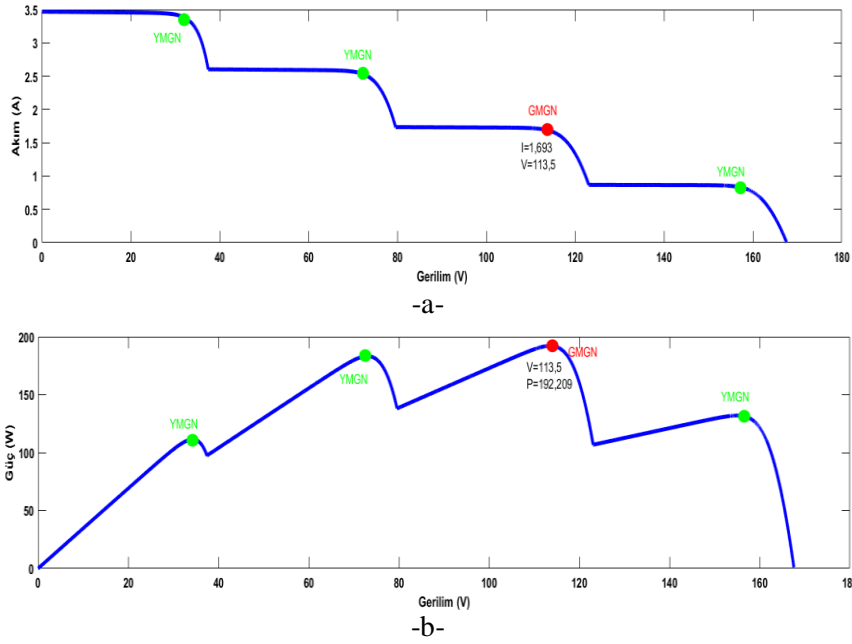
Tablo 2. FV Panel Modeli Parametre ve Değerleri

Parametre	Değer
I _L : Işıktan Üretilen Akım (A)	8,6751
I ₀ : Diyot Doyum Akımı (A)	2,6018x10 ⁻⁹
Diyot İdealite Faktörü	1,1098
R _{SH} : Paralel Direnç (ohm)	665,1993
R _s : Seri Direnç (ohm)	0,26603

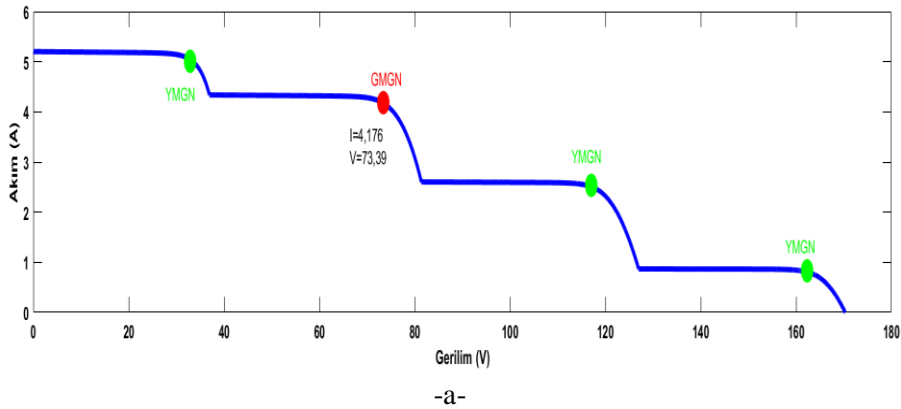


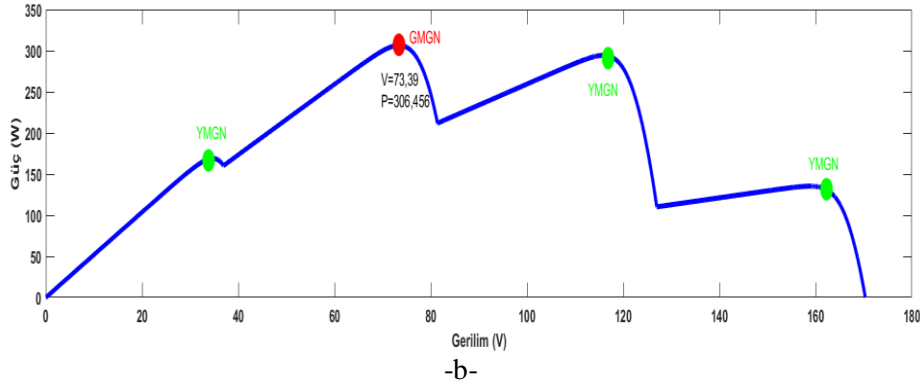
Şekil 2. FV Panellerin Güç-Gerilim Eğrisi

Yapılan çalışmada eğitim veri seti içerisinde bulunan $G1=100 \text{ W/m}^2$, $G2=200 \text{ W/m}^2$, $G3=300 \text{ W/m}^2$ ve $G4=400 \text{ W/m}^2$ olduğu duruma ait YMGN ve GMGN değerlerini gösteren akım (A) – gerilim (V), güç (W) – gerilim (V) grafikleri aşağıdaki Şekil 3’te verilmiştir. $G1=600 \text{ W/m}^2$, $G2=500 \text{ W/m}^2$, $G3=100 \text{ W/m}^2$, $G4=300 \text{ W/m}^2$ giriş değerlerine karşılık gelen YMGN ve GMGN değerleri ile akım (A) – gerilim (V), güç (W) – gerilim (V) grafikleri Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 100- 200-300-400 Veri Girişine Karşılık Gelen a. Akım-Gerilim Grafiği b. Gerilim-Güç Grafiği

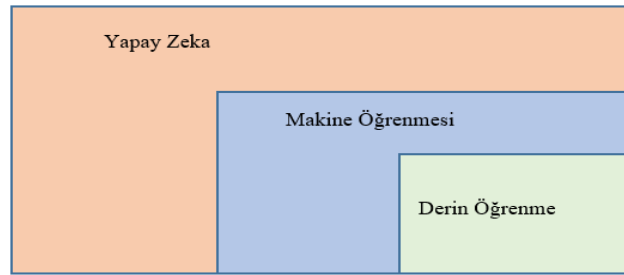




Şekil 4. 600- 500-100-300 Veri Girişine Karşılık Gelen a. Akım-Gerilim b. Gerilim-Güç Grafiği

DERİN ÖĞRENME

Derin öğrenme, özellikleri ve görevleri doğrudan verilerden öğrenen, farklı veriler için sonuçları tahmin etmeye yarayan bir makine öğrenme yöntemidir (LeCun vd., 2015). Derin öğrenme kavramı (yani birden fazla gizli katmana sahip sinir ağları), ana özelliğinin hiyerarşik olarak birçok doğrusal olmayan bilgi işleme katmanını kullanmak olduğu geniş bir makine öğrenimi yaklaşımları ve mimarileri sınıfı olarak düşünülebilir (Yousefi-Azar & Hamey, 2017). Derin Öğrenme, YSA tekniklerinin ve algoritmalarının eğitim için kullanıldığı bir makine öğrenimi dahıdır (Alaskar & Saba, 2021). Derin öğrenme denetimli, yarı denetimli veya denetimsiz olarak gerçekleştirilebilir (Schmidhuber, 2015; Can, 2020). Şekil 5'te yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenme arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5. Yapay Zekâ, Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme.

Makine öğreniminin bir alt kümesi olan derin öğrenme, yapılandırılmamış veriler üzerinde çok daha iyi başarı sağlayan bir öğrenim sınıfıdır. Derin öğrenme, özellik çıkarma ve dönüştürme için çok sayıda doğrusal olmayan işlem birimi katmanı kullanır. Derin öğrenme ağı içerisinde bulunan veri girişine yakın alt katmanlar, basit özellikleri öğrenirken üst katmanlar ise alt katman özelliklerinden türetilen daha karmaşık özellikleri öğrenir. Büyük miktardaki verileri kullanıp gerekli bilgileri analiz ederek çıkarım yapabilmesini sağlayan bu yapı derin öğrenmeyi diğer öğrenme yöntemlerine göre daha üstün kılmaktadır (Shinde & Shah, 2018; Mathew vd., 2020). Derin öğrenmede en önemli konulardan birisi veri setinin yeterli olmasıdır. Eğitimin başarılı olabilmesi için veri sayısının çok olması gerekmektedir. Eğer eğitimde kullanılan veri sayısı yeterli düzeyde olmazsa ağın öğrenmesi zorlaşacaktır (Can, 2020).

Yapılan çalışmada 300 Wp gücündeki güneş panellerinden 4 tanesi seri bağlanmış ve FV panelin giriş ışınım değerleri (W/m^2), 100 ve katları şeklinde değiştirilerek çıkışta elde edilen toplam gücün değeri bulunmuştur. Toplam 10000 veri elde edilmiştir. Ayrıca eğitime hiç girmemiş ve ara değerlerden oluşan 100 adet veri seti performans testi için oluşturulmuştur. Veri setinin bir parçası Tablo 3'te gösterilmiştir.

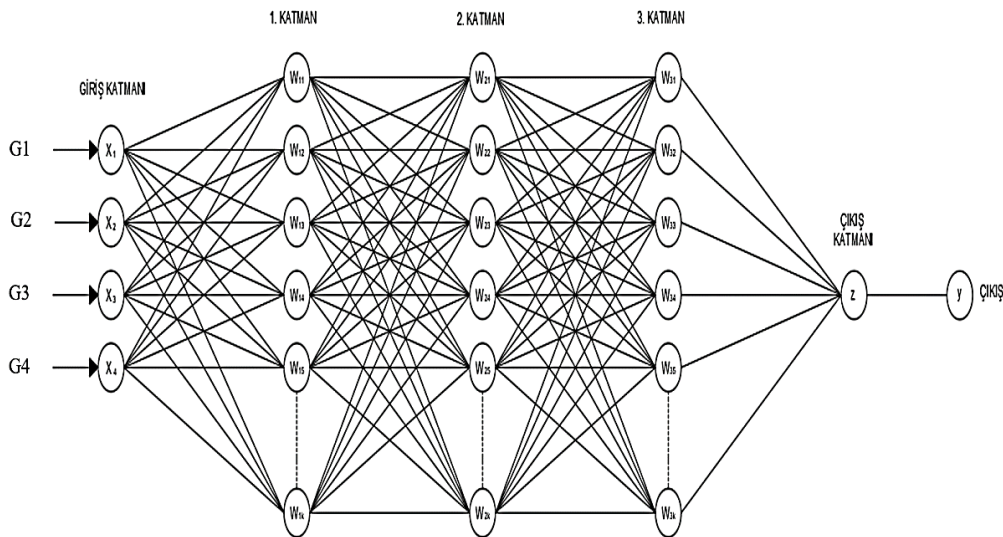
Tablo 3. Eğitimde Kullanılan Veri Seti Örneği

	G1(W/m ²)	G2(W/m ²)	G3(W/m ²)	G4(W/m ²)	ÇIKIŞ(W)
1	100	100	100	100	111,163
2	100	100	100	200	116,317
3	100	100	100	300	117,464
4	100	100	100	400	118,121
5	100	100	100	500	140,207
6	100	100	100	600	168,995
7	100	100	100	700	197,707
8	100	100	100	800	226,301
9	100	100	100	900	254,75
10	100	100	100	1000	283,028
11	100	100	200	100	116,304
12	100	100	200	200	122,094
...
9999	1000	1000	1000	900	1143,872
10000	1000	1000	1000	1000	1201,053

Bu veri setinin %70'i (7000 veri) eğitim için, %15'i (1500 veri) doğrulama için, %15'i (1500 veri) test için kullanılmıştır. Bu verilere ait giriş ve çıkış bilgileri kullanılarak derin öğrenme ağı eğitilmiştir. Çalışmada katman ve nöron sayıları değiştirilerek istatistiksel değerlendirme kriterleri olan MAPE, MAE ve RMSE ile en iyi sonucun hangi katman sayısında ve nöron sayısında elde edileceği incelenmiştir.

Yapılan çalışmanın, eğitim veri setinde hiç olmayan ve ara değerlerden (Ör: 170W/m², 915W/m²) oluşan 100 adet veri ile test edilmesi amaçlanmıştır. Eğitim veri setinde bulunan 7000 verinin sürekli eğitim setinde olması, doğrulama veri setinde bulunan 1500 verinin sürekli doğrulama veri setinde olması ve test veri setinde bulunan 1500 verinin sürekli test veri setinde olması sağlanarak sonuçların tutarlı olması ve hatanın en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan eğitim ve test değerleri tablolar ve grafikler ile gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçların derin öğrenme ile FV sistemlerin eğitilmesi durumunda KGK altında verimlerinin artırılacağı ortaya konulmuştur. Derin öğrenme modelinin tahmin sürecine ilişkin tasarım aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Eğitimde kullanılan derin öğrenme modeline ait mimari Şekil 6'da gösterilmiştir. k değeri (nöron sayısı) 16, 32, 64, 128, 256 ve 512 olarak alınmıştır.

**Şekil 6.** Eğitimde Kullanılan Derin Öğrenme Modeli Mimarisi

İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRME KRİTERLERİ

Derin öğrenme ile yapılan çalışmalarda, uygulanan modelin performansını değerlendirmek için MAPE, MAE, RMSE istatistiksel değerlendirme kriterleri esas alınmıştır. Regresyon ve zaman serileri modellerinde tahmin sonuçlarının doğruluğunu ölçmek için MAPE çok sık kullanılmaktadır. Gerçek değerlerin arasında sıfır bulunanlar olması durumunda, sıfır ile bölünme yapılamayacağından MAPE değeri hesaplanamaz. Çok düşük tahmin değerleri için yüzde hatası %100'ü geçemez. Ancak tahmin değerlerinin çok yüksek olduğu durumda yüzde hatasının üst sınırı yoktur. Eşitlik 1'de MAPE istatistiksel değerlendirme ölçütü verilmiştir.

$$MAPE = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{g_i - t_i}{g_i} \right|}{n} \quad (1)$$

g_i : i-inci birimin gerçek değeri
 t_i : i-inci birimin tahmin edilen değeri
 n : Toplam veri sayısı

Literatürde yapılan çalışmalarda; MAPE (%) değerinin, %10'un altındaki modellerin "çok iyi", %10 ile %20 arasındaki modellerin "iyi", %20 ile %50 arasında olan modellerin "kabul edilebilir" ve %50'nin üzerinde olan modellerin ise "yanlış ve hatalı" olarak sınıflandırıldığı değerlendirilmektedir (Lewis Colin, 1982; Witt & Witt, 1992).

MAE, ortalama mutlak hata iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsü olarak tanımlanır. MAE, her gerçek değer ile veriye en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama dikey mesafedir. Bunun yanı sıra MAE, her veri noktası ile en iyi uyan çizgi arasındaki ortalama yatay mesafedir. MAE değeri kolay yorumlanabilir bir değerdir. Bundan dolayı regresyon ve zaman serisi problemlerinde çoğunlukla kullanılmaktadır. MAE, yönlerine dikkat etmeksizin bir dizi tahmin sonucundaki hataların ortalama büyüklüğünü ölçen ve tüm tekil hataların ortalama eşit olarak ağırlıklandırıldığı doğrusal bir skordur. MAE değeri 0 ile ∞ arasında değer alabilir. Puanların negatif yönelimli olması tahminleyicinin daha iyi bir performans gösterdiğinin işaretidir. Eşitlik 2'de MAE istatistiksel değerlendirme ölçütü verilmiştir (Gültepe, 2019).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [g_i - t_i] \quad (2)$$

g_i : i-inci birimin gerçek değeri
 t_i : i-inci birimin tahmin edilen değeri
 n : Toplam veri sayısı

Diğer bir performans değerlendirme ölçütü ise RMSE'dir. RMSE; tahminleyici tarafından tahmin edilen değer ile gerçek değer arasındaki uzaklığın bulunması için çoğunlukla kullanılan, hatanın büyüklüğünü ölçmek için kuadratik bir metriktir. RMSE tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapmasıdır. Tahmin hataları, regresyon hattının veri noktalarından ne kadar uzakta olduğunun bir ölçüsüdür; RMSE ise bu kalıntıların ne kadar yayıldığını gösteren bir ölçüdür. Özetle RMSE, verilere en iyi uyan çizgi etrafındaki o verilerin ne kadar yoğun olduğunu gösterir. RMSE değeri 0 ile ∞ arasında değer alır. Değerlerin negatif yönelimli olması yani değerinin düşük olması daha iyi bir performansa sahip olduğunu gösterir. RMSE değerinin sıfıra eşit olması uygulanan modelde hiç hata olmadığı anlamına gelir. RMSE, büyük hataları daha fazla cezalandırmanın avantajına sahiptir. Bu yüzden bazı durumlarda kullanılması daha uygun olabilir. Eşitlik 3'te RMSE istatistiksel değerlendirme ölçütü verilmiştir (DANDIL & Gürgen, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (g_i - t_i)^2}{n}} \quad (3)$$

g_i : i-inci birimin gerçek değeri
 t_i : i-inci birimin tahmin edilen değeri
 n : Toplam veri sayısı

R^2 değeri, verilerin doğrusal bir eğriye uygunluk ölçütünü gösterir. 0 ile 1 arasında değer alır. 0'a yakın olması durumunda veriler arasındaki ilişki düşük iken, 1'e yakın olması durumunda veriler arasındaki ilişki kuvvetli

demektir. R^2 değerinin 1 olması veriler arasında kusursuz bir ilişki olduğunu gösterir. Veri sayısının çok olması R^2 değerinin güvenilirliğini artırır.

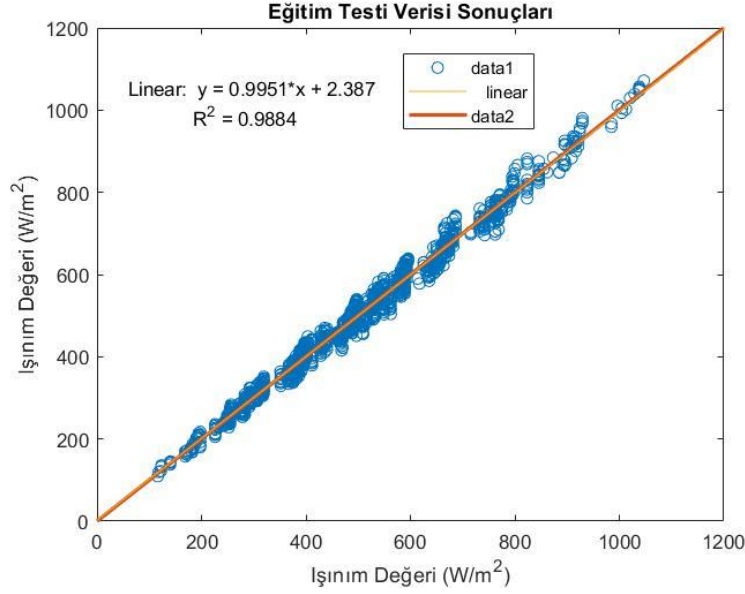
Tablo 4. Eğitim Test Setine Ait 2 Katmanlı ve 16 Nöronlu Sonuçlar

	1. EĞİTİM	2. EĞİTİM	3. EĞİTİM	ORTALAMA
RMSE (kW)	0,027	0,024	0,025	0,025
MAE (kW)	0,021	0,019	0,019	0,020
MAPE	4,370	3,993	4,171	4,178
R^2	0,979	0,981	0,983	0,981
Zaman	2 Dakika 4 Saniye	2 Dakika 5 Saniye	2 Dakika 4 Saniye	2 Dakika 4 Saniye

Tablo 5. Tek Katmanlı Eğitim Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,041	0,032	0,023	0,022	0,019	0,024
MAE (kW)	0,032	0,025	0,019	0,018	0,015	0,019
MAPE	6,749	5,362	3,990	3,730	3,135	4,012
R^2	0,946	0,968	0,984	0,986	0,989	0,987
Zaman	1 Dakika 51 Saniye	1 Dakika 52 Saniye	1 Dakika 53 Saniye	1 Dakika 53 Saniye	2 Dakika 1 Saniye	2 Dakika 4 Saniye

Tablo 4'te eğitim test setine ait 2 katmanlı ve 16 nöronlu yapıya ilişkin sonuçlar örnek olarak gösterilmiştir. Tek katman kullanılarak yapılan eğitim sonucunda Tablo 5'te gösterilen değerler elde edilmiştir. Tek katmanlı eğitim test seti verilerine ait tablo incelendiğinde tek katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin ortalama %6,74, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %5,36, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,99, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,73, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,13, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %4,01 olduğu görülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. Eğitim verileri içerisinde tek katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 256 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 256 nöronlu yapıda MAPE değeri %3,13, MAE değeri 0,015, RMSE değeri 0,019 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 8'de tek katmanlı ve 256 nöronlu eğitim test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R^2 değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %98,8'dir.

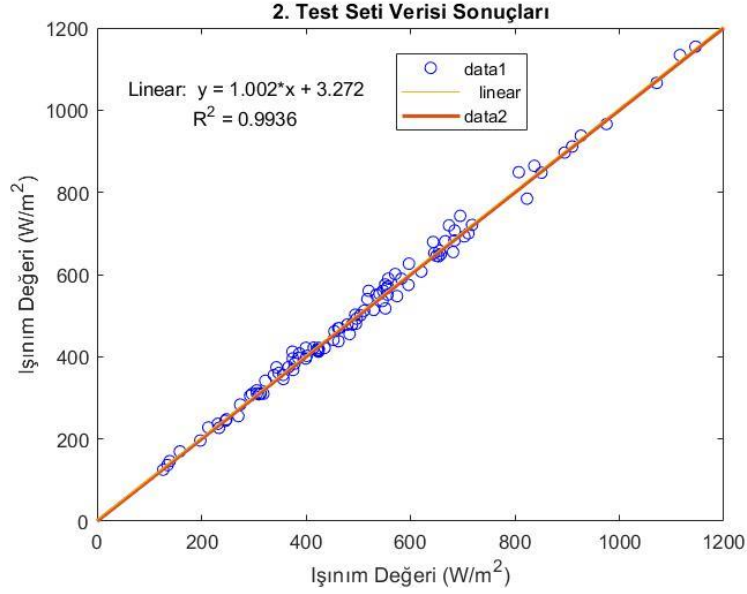


Şekil 8. Tek Katmanlı ve 256 Nöronlu Eğitim Test Seti Grafiği

Tablo 6. Tek Katmanlı 2. Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,041	0,030	0,020	0,019	0,017	0,021
MAE (kW)	0,031	0,024	0,016	0,015	0,013	0,017
MAPE	6,261	4,942	3,509	3,150	2,839	3,380
R ²	0,967	0,983	0,992	0,993	0,994	0,993
Zaman	1 Dakika 51 Saniye	1 Dakika 52 Saniye	1 Dakika 53 Saniye	1 Dakika 53 Saniye	2 Dakika 1 Saniye	2 Dakika 4 Saniye

Tek katman kullanılarak yapılan 2. test sonucunda Tablo 6'da gösterilen değerler elde edilmiştir. Tek katmanlı 2. test seti verilerine ait tablo incelendiğinde tek katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %6,26, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %4,94, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,50, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,15, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,83, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,38, olduğu görülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. 2. test verileri içerisinde tek katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 256 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 256 nöronlu yapıda MAPE değeri %2,83, MAE değeri 0,013, RMSE değeri 0,017 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 9'da tek katmanlı ve 256 nöronlu 2. test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R² değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %99,3'dir.

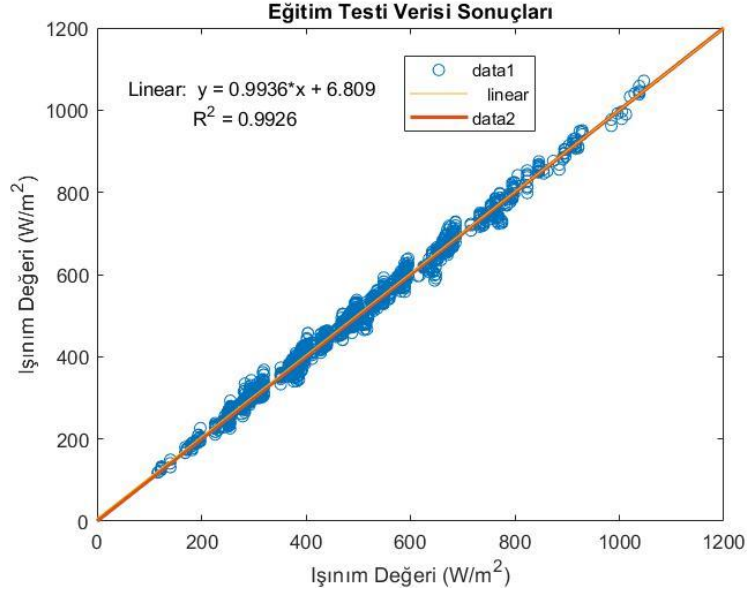


Şekil 9. Tek Katmanlı ve 256 Nöronlu 2. Test Seti Grafiği

Tablo 7. İki Katmanlı Eğitim Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,025	0,021	0,015	0,016	0,016	0,019
MAE (kW)	0,020	0,016	0,012	0,012	0,012	0,015
MAPE	4,178	3,485	2,608	2,602	2,634	3,217
R ²	0,981	0,988	0,993	0,994	0,994	0,994
Zaman	2 Dakika 4 Saniye	2 Dakika 5 Saniye	2 Dakika 17 Saniye	2 Dakika 27 Saniye	2 Dakika 57 Saniye	4 Dakika 19 Saniye

İki katman kullanılarak yapılan eğitim sonucunda Tablo 7'de gösterilen değerler elde edilmiştir. İki katmanlı eğitim test seti verilerine ait tablo incelendiğinde iki katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %4,17, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,48, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,60, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,60, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,63, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,21 olduğu görülmektedir. İki katmanlı 128 nöron bulunan yapıda ortalama MAPE değerinin 64 nöron bulunan yapıya göre daha düşük olmasına rağmen geçen zaman açısından incelendiğinde 64 nöron kullanılan yapının daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. Eğitim test verileri içerisinde iki katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 64 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 64 nöronlu yapıda MAPE değeri %2,60, MAE değeri 0,012, RMSE değeri 0,015 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 10'da iki katmanlı ve 64 nöronlu eğitim test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R² değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %99,2'dir.

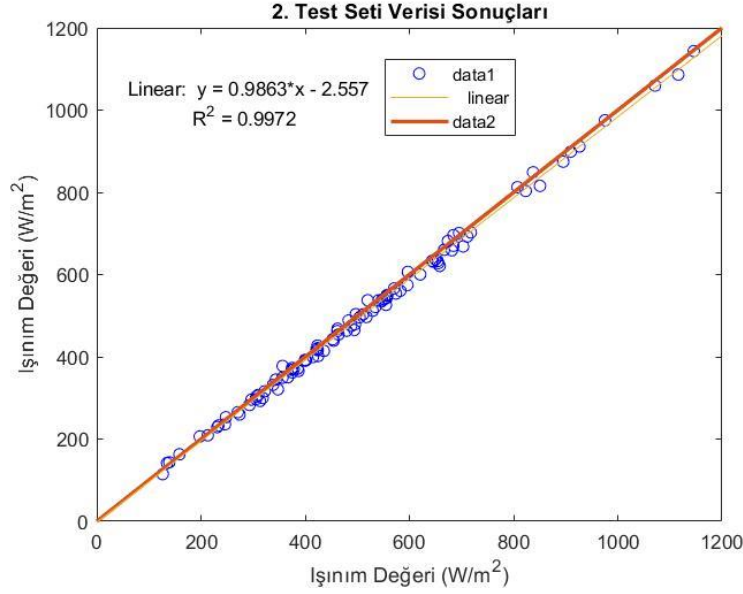


Şekil 10. İki Katmanlı ve 64 Nöronlu Eğitim Test Seti Grafiği

Tablo 8. İki Katmanlı 2. Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,022	0,018	0,014	0,016	0,013	0,020
MAE (kW)	0,017	0,014	0,011	0,012	0,011	0,016
MAPE	3,626	2,893	2,367	2,441	2,250	3,308
R ²	0,990	0,994	0,996	0,996	0,997	0,996
Zaman	2 Dakika 4 Saniye	2 Dakika 5 Saniye	2 Dakika 17 Saniye	2 Dakika 27 Saniye	2 Dakika 57 Saniye	4 Dakika 19 Saniye

İki katman kullanılarak yapılan 2. test sonucunda Tablo 8'de gösterilen değerler elde edilmiştir. İki katmanlı 2. test seti verilerine ait tablo incelendiğinde iki katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,62, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,89, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,36, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,44, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,25, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,30 olduğu görülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. 2. test seti verileri içerisinde iki katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 256 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 256 nöronlu yapıda MAPE değeri %2,25, MAE değeri 0,011, RMSE değeri 0,013 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 11'de iki katmanlı ve 256 nöronlu 2. test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R² değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %99,7'dir.



Şekil 11. İki Katmanlı ve 256 Nöronlu 2. Test Seti Grafiği

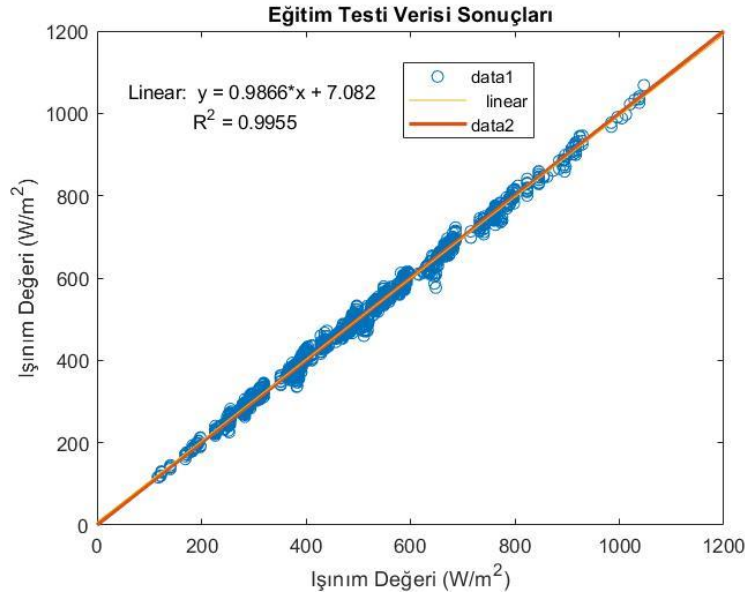
Tablo 9. Üç Katmanlı Eğitim Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,024	0,017	0,012	0,013	0,011	0,011
MAE (kW)	0,018	0,013	0,009	0,010	0,009	0,009
MAPE	3,879	2,831	2,016	2,261	1,931	1,866
R ²	0,982	0,991	0,995	0,996	0,996	0,996
Zaman	2 Dakika 15 Saniye	2 Dakika 17 Saniye	2 Dakika 32 Saniye	2 Dakika 47 Saniye	3 Dakika 36 Saniye	5 Dakika 55 Saniye

Üç katman kullanılarak yapılan eğitim sonucunda Tablo 9'da gösterilen değerler elde edilmiştir. Üç katmanlı eğitim test seti verilerine ait tablo incelendiğinde üç katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,87, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,83, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,01, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,26, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %1,93, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %1,86 olduğu görülmektedir. Üç katmanlı 256 nöron bulunan yapıda ve 512 nöron bulunan yapıda ortalama MAPE değerinin 64 nöron bulunan yapıya göre daha düşük olmasına rağmen geçen zaman açısından incelendiğinde 64 nöron kullanılan yapının daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. Eğitim test verileri içerisinde üç katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 64 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 64 nöronlu yapıda MAPE değeri %2,01, MAE değeri 0,009, RMSE değeri 0,012 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 12'de üç katmanlı ve 64 nöronlu eğitim test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R² değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %99,5'dir.

Üç katman kullanılarak yapılan 2. test sonucunda Tablo 10'da gösterilen değerler elde edilmiştir. Üç katmanlı 2. test seti verilerine ait tablo incelendiğinde üç katman kullanılarak 16 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %3,66, 32 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,49, 64 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %1,71, 128 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %2,19, 256 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %1,95, 512 nöronlu yapıda ortalama MAPE değerinin %1,48 olduğu görülmektedir. Üç katmanlı 512 nöron bulunan yapıda ortalama MAPE değerinin 64 nöron bulunan yapıya göre daha düşük olmasına rağmen geçen zaman açısından incelendiğinde 64 nöron kullanılan yapının daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bu değerler %10'dan küçük olduğundan eğitim başarısının çok yüksek olduğu görülmektedir. 2. test verileri içerisinde üç katman kullanılması durumunda en iyi sonucun 64 nöron kullanılan derin öğrenme yapısı olduğu anlaşılmaktadır. 64 nöronlu yapıda MAPE değeri %1,71,

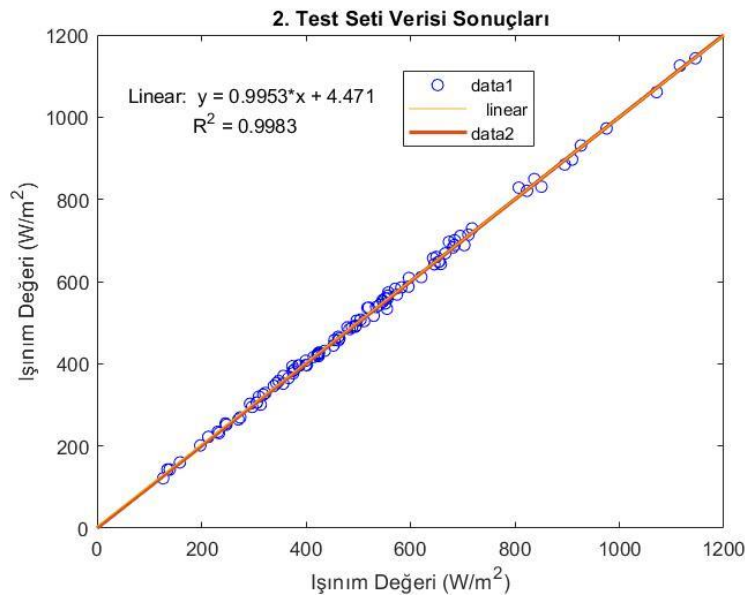
MAE değeri 0,008, RMSE değeri 0,010 olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek doğrulukta tahmin yapıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 13'te üç katmanlı ve 64 nöronlu 2. test seti sonucuna ait grafik verilmiş olup R^2 değerlerine bakıldığında ortalama başarı oranı %99,8'dir.



Şekil 12. Üç Katmanlı ve 64 Nöronlu Eğitim Test Seti Grafiği

Tablo 10. Üç Katmanlı 2. Test Seti Verilerine Ait Değerler

	16 NÖRON	32 NÖRON	64 NÖRON	128 NÖRON	256 NÖRON	512 NÖRON
RMSE (kW)	0,022	0,015	0,010	0,013	0,012	0,009
MAE (kW)	0,017	0,012	0,008	0,010	0,009	0,007
MAPE	3,668	2,492	1,712	2,197	1,953	1,482
R^2	0,990	0,995	0,998	0,998	0,998	0,998
Zaman	2 Dakika 15 Saniye	2 Dakika 17 Saniye	2 Dakika 32 Saniye	2 Dakika 47 Saniye	3 Dakika 36 Saniye	5 Dakika 55 Saniye



Şekil 13. Üç Katmanlı ve 64 Nöronlu 2. Test Seti Grafiği

SONUÇ

Yapılan çalışmada kısmi gölgelenme koşulları altında bulunan FV sitemlerin çıkış gücünün tahmin edilmesi için derin öğrenme kullanılarak eğitilmesi durumunda verimlerinin nasıl artırılacağı araştırılmıştır. Yapılan çalışmada 4 tane seri bağlı FV panelin giriş ışınım değerleri 100'er aralıklarla artırılarak toplam 10000 veri elde edilmiştir. Bu veriler MATLAB/Simulink ile modellenmiş ve çıkış güçleri elde edilmiştir. 7000 veri eğitim, 1500 veri doğrulama, 1500 veride test için ayrılmış ve bu verilerin çalışma boyunca aynı gurubun içinde kalması sağlanarak olası hataların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca eğitime hiç girmemiş 100 veri ile sistem teste tabi tutulmuştur. Derin öğrenme kullanılarak katman sayılarının ve nöron sayılarının eğitim üzerine etkileri incelenmiştir. Her nöron sayısı için eğitim üç defa tekrarlanmış ve ortalama sonuçları alınarak MAPE, MAE, RMSE ve R² istatistiksel değerlendirme kriterleri ile değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda derin öğrenme ile tek katman kullanılması durumunda 256 nöron bulunan yapının hem eğitim test setinde hem de 2. test setinde en iyi sonucu verdiği anlaşılmaktadır. İki katman kullanılması durumunda eğitim test setinde 64 nöron bulunan yapının, 2. test setinde ise 256 nöron bulunan yapının en iyi sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Üç katman kullanılması durumunda 64 nöron bulunan yapının hem eğitim test setinde hem de 2. test setinde en iyi sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Tüm katmanlar içerisinde en iyi sonucun eğitim test setinde MAPE değeri %2,01 ile, 2. test setinde ise MAPE değeri %1,71 ile üç katman ve 64 nöron bulunan sistemden elde edilebileceği gösterilmiştir.

Derin öğrenme yöntemi, FV paneller başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması konusunda ileride yapılacak çalışmalarda kullanılabilir. Çalışmada elde edilen veriler kullanılarak KGK altında çalışan panellerin pratik uygulamalarda panel verimlilikleri artırılabilir. GPU teknolojisindeki gelişmeler KGK altında bulunan FV panellerin GMGN'nın tespit edilmesinde derin öğrenme yönteminin başarı oranını artıracaktır.

KAYNAKLAR

- Alaskar, H., & Saba, T. (2021). Machine Learning and Deep Learning: A Comparative Review. *Proceedings of Integrated Intelligence Enable Networks and Computing*, 143-150.
- Balkan, A. (2022). *Şebeke bağlantılı bir fotovoltaik güç üretim santralinin tasarım aşamaları ve güç boyutlandırma faktörünün önemi*. Yüksek Lisans Tezi, Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çankırı.
- Bassam, A.-H. (2018). *Maximum Power Point Tracking Controlled Boost Converter Desing For Battery Charger*. (MSc. Thesis). Yıldız Technical University,
- Can, Y. (2020). *Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Yöntemleri İle Dizel Motor Turbo Kompresör Sisteminin Modellenmesi*.
- Dandıl, E., & Gürgen, E. (2019). Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Fotovoltaik Panel Güç Çıktılarının Tahmini ve Sezgisel Algoritmalar ile Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(16), 146-158.
- EİGM. (2021). Yenilenebilir Enerji Kaynakları. <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> Accessed 15.05.2021
- Eltez, E. B. (2022). *Otopark üstü fotovoltaik güç sisteminin parametrik tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Gültepe, Y. (2019). Makine öğrenmesi algoritmaları ile hava kirliliği tahmini üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(16), 8-15.
- Karakaya, H. B. (2021). *Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktasının takibi için kullanılan optimizasyon algoritmalarının performansının değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Keçecioglu, Ö. F., Tekin, M., Ahmet, G., Açıkgöz, H., Gemci, A., & Şekkeli, M. (2015). Bir güneş enerji santralinin elektrik şebekesindeki güç kalitesi parametrelerine etkisinin incelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 17-24.
- Keskin, Y. E. (2014). *Fotovoltaik sistemlerde maksimum güç noktası izleme yöntemlerinin karşılaştırılması*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

- Kılıç, E. (2019). DA-DA yükselten dönüştürücü ile elektrikli araç batarya şarj cihazı tasarımı. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 281-287.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- Lewis Colin, D. (1982). Industrial and business forecasting methods. *Butterworth & Co Publishers Ltd*.
- Mathew, A., Amudha, P., & Sivakumari, S. (2020). *Deep learning techniques: an overview*. Paper presented at the International conference on advanced machine learning technologies and applications.
- Mellit, A., Massi Pavan, A., Oglari, E., Leva, S., & Lughi, V. (2020). Advanced methods for photovoltaic output power forecasting: A review. *Applied Sciences*, 10(2), 487.
- Mellit, A., Pavan, A. M., & Lughi, V. (2014). Short-term forecasting of power production in a large-scale photovoltaic plant. *Solar Energy*, 105, 401-413.
- Özçalık, H. R., Yılmaz, S., & Kılıç, E. (2013). Güneş Pilinin Bir Diyotlu Eşdeğer Devre Yardımıyla Matematiksel Modelinin Çıkartılması ve Parametrelerinin İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 23-29.
- Özçelik, M. A. (2015). Fotovoltaik sistemlerde verim ve performansın artırılmasına yönelik maksimum güç noktası izleyicisi tasarımı.
- Qassab, K. S. Q. (2015). *Design and Simulation Of Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Photovoltaic Systems by Perturb and Observe Method*. Yüksek Lisans Tezi, Atılım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural networks*, 61, 85-117.
- Shinde, P. P., & Shah, S. (2018). *A review of machine learning and deep learning applications*. Paper presented at the 2018 Fourth international conference on computing communication control and automation (ICCUBEA).
- Witt, S. F., & Witt, C. A. (1992). *Modeling and forecasting demand in tourism*: Academic Press Ltd.
- Yousefi-Azar, M., & Hamey, L. (2017). Text summarization using unsupervised deep learning. *Expert Systems with Applications*, 68, 93-105.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.12.2022
Kabul Tarihi : 26.07.2023

Received Date : 01.12.2022
Accepted Date : 26.07.2023

DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARI İLE DESTEKLİ YOL DOLGUSUNUN ÜÇ BOYUTLU SAYISAL MODELLEMESİ: PARAMETRİK ÇALIŞMA

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF EMBANKMENT SUPPORTED WITH DEEP MIXING COLUMNS: A PARAMETRIC STUDY

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-4137-9200)
İlknur BOZBEY¹ (ORCID: 0000-0002-1580-8876)

¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN, fatmatugce.cinar@iuc.edu.tr

ÖZET

Derin karıştırma yöntemi (DSM), doğal zeminin bağlayıcı malzemeler ile karıştırılarak zeminin yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Bu çalışma kapsamında literatürde yer alan, Tayland'da derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak bir zemin üzerine inşa edilen dolgu ile ilgili bir makale verileri kullanılarak üç boyutlu (3D) sayısal bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model öncelikle makalede yer alan veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda farklı alan değiştirme oranlarına sahip modeller oluşturulmuş ve sayısal analizler yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda alan değiştirme oranının artması ile dolguda meydana gelen düşey deplasman değerlerinin azaldığı ve aynı alan değiştirme oranına sahip modellerde meydana gelen düşey deplasmanların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolgu yükünün artması ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmüştür. Derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman oluştuğu görülmüştür. DSM kolonları için atanan modül değerlerinin oturma değerlerini önemli seviyede etkilemesi nedeniyle, bu konu ile ilgili değerlendirmeler ve öneriler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: zemin iyileştirmesi, derin karıştırma yöntemi, alan değiştirme oranı, elastisite modülü

ABSTRACT

Deep mixing method (DSM) is the process of improving the soil in situ by mixing natural soil with binder materials. Within the scope of this study, a three-dimensional (3D) numerical model was created using the data of an article in the literature for an embankment constructed on a soft soil improved with deep mixing columns in Thailand. The numerical model created was first verified using the data in the article. Then, a parametric study was carried out on this model. In this context, models with different area replacement ratios were created and analyses were made. For columns of different diameters with the same area replacement ratio, settlements under different embankment loads and stresses on the columns and the soil were investigated. Analyses were also carried out to evaluate the effect of the different elasticity modulus values for DSM columns. It was seen that the vertical displacement values in the system decreased with the increase in the area replacement ratio and the vertical displacements with the same area replacement ratio gave similar results. Vertical stresses on the columns increased significantly with the increase of the embankment load. It was observed that smaller displacement occurred with the increase in the elasticity modulus values of the deep mixing columns. Since the modulus values assigned for DSM columns affected the settlement values, evaluations and recommendations were made.

Keywords: soil improvement, deep mixing method, area replacement ratio, modulus of elasticity

ToCite: ÇINAR ÖZKAN, F. T., & BOZBEY, İ., (2023). DERİN KARIŞTIRMA KOLONLARI İLE DESTEKLİ YOL DOLGUSUNUN ÜÇ BOYUTLU NÜMERİK MODELLEMESİ: PARAMETRİK ÇALIŞMA. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 604-613.

GİRİŞ

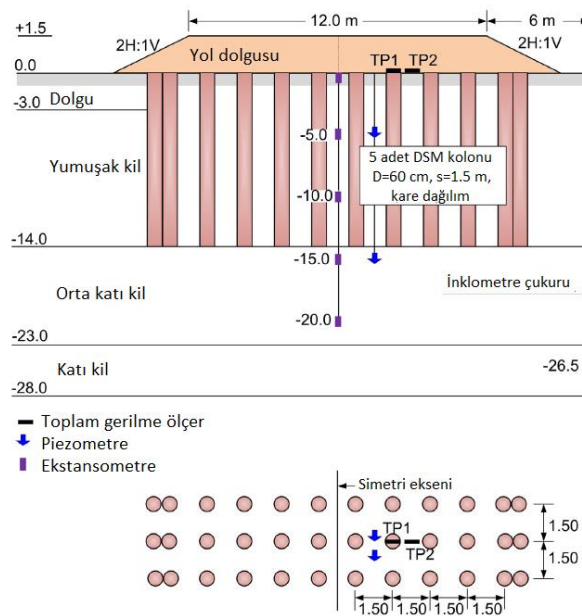
Son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile birçok zemin iyileştirme yöntemi gelişme göstermektedir. Derin karıştırma yöntemi (DSM) de bunlardan biridir. İlk olarak Japonya ve İsveç'te ortaya çıkan bu yöntem, daha sonra Amerika'da ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ülkemizde de derin karıştırma uygulamaları sık olarak kullanılmaktadır. Derin karıştırma yönteminde zemini kazmaya gerek kalmadan çeşitli ekipmanlarla ve bağlayıcılarla zemin yerinde iyileştirilir. Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen zeminler daha yüksek mukavemete, elastisite modülüne ve daha düşük sıkışabilirliğe sahip olmaktadır. Bu özellikler doğal zeminin ve bağlayıcının özelliklerine, kür süresine ve yükleme durumuna bağlı olarak elde edilir (Bruce vd., 2013).

Derin karıştırma kolonları (DSM) yumuşak zeminler üzerinde inşa edilen yapıların deplasman ve stabilite problemlerini bertaraf etmek için kullanılmaktadır. Yumuşak kil zeminlerin hakim olduğu sahalarda inşa edilen mühendislik dolgular nedeniyle oluşacak toplam ve farklı oturmaların azaltılmasında ve taşıma gücünün artırılmasında DSM kolonları sıklıkla kullanılmıştır (Jiang vd., 2014; Chai vd., 2002; Han ve Gabr, 2002; Han vd., 2002). DSM kolonların, Malezya'da demiryolu dolgularında (Arulrajah vd., 2009); Japonya'da karayolu ve demiryolu dolgularında (Pye vd., 2012; Lawson vd., 2005), büyük şehirlerdeki yollarda (Ohdaira vd., 2002); İsveç'te karayolu dolgularında, Polonya'da şehir içi ulaşım yollarında (Topolnicki, 2004) ve ABD'de taşkın setleri veya taşkın duvarlarında (Dahlström, 2013) gibi dünya çapında birçok uygulamada yaygın olarak kullanıldığı vakalar literatürde rapor edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, derin karıştırma kolonlarına ait yapılmış güncel çalışmalardan olan ve çalışmamız kapsamında doğrulama ve ölçümlene analizlerine de örnek teşkil eden ve Jamsawang vd. (2016) tarafından hazırlanmış olan bir makale referans alınmıştır. Bu makale verileri kullanılarak, sonlu elemanlar yöntemi yazılımı Midas GTS-NX programı ile üç boyutlu (3D) sayısal bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model öncelikle makalede yer alan veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda, kolon çapları ve aralıkları değiştirilerek farklı alan değiştirme oranlarında modeller oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır.

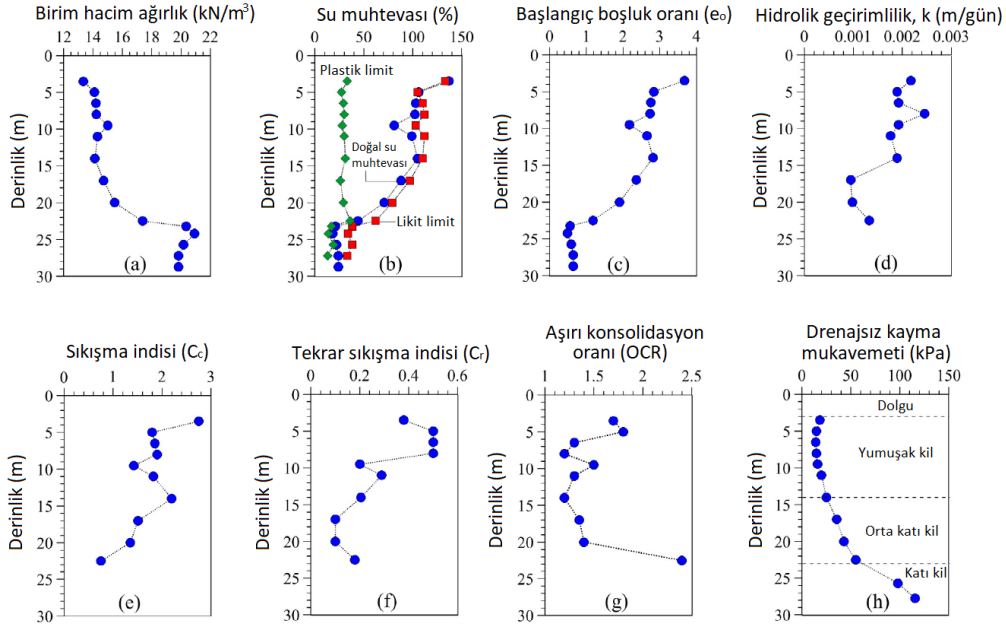
ÇALIŞILAN MAKALE BİLGİLERİ

Tayland'ın Samutprakan eyaletine bağlı Bangbo-Klongdan karayolu boyunca derin karıştırma kolonları ile iyileştirilmiş yumuşak bir zemin üzerine inşa edilen dolgu Jamsawang vd. (2016) tarafından çalışılmıştır. Çalışmada, DSM ile iyileştirme yapılan kesitlerin aletsel gözlemlemeye bağlı saha ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 1. Dolgu ve DSM Kolonlarının Geometrisi, Saha Ölçümünde Kullanılan Ekipmanlar ve Yerleşimleri (Jamsawang vd., 2016)

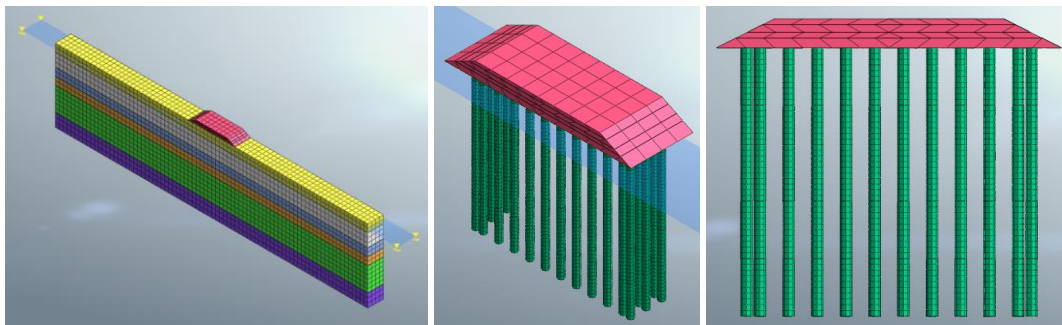
Tekil ve grup kolon davranışını ayrıntılı bir biçimde gözlemleyebilmek için kolonlar arasında yatayda belli aralıklar ile toplam gerilme ölçerler konulmuş; bu sayede dolgudan aktarılan gerilmenin değişimi incelenmiştir. Ayrıca; derinlik boyunca dolgu altındaki düşey deformasyonları izlemek amacıyla 5 m aralıklarla ekstansometreler yerleştirilmiştir. Boşluk suyu basıncı ile dolgudaki yatay deformasyonlar da konulan piezometre ve inklometre ile takip edilmiştir (Şekil 1). Ayrıca, çalışmada kapsamlı bir şekilde geoteknik arazi karakterizasyonu yapılmıştır (Şekil 2). Gerek arazi karakterizasyonunun detaylı olarak yapılmış olması, gerekse üç boyutlu bir model üzerinde çalışılmış olması ve arazide ölçüm yapılmış olması nedeniyle, bu çalışmanın bu makale kapsamında sayısal doğrulama amacıyla kullanılması uygun bulunmuştur.



Şekil 2. Jamsawang vd. (2016) Tarafından Sunulan Saha Karakterizasyonu

ÜÇ BOYUTLU (3D) NÜMERİK MODEL

Çalışmamız kapsamında ilk olarak Jamsawang vd. (2016) tarafından Şekil 1’de verilen geometri ile sonlu elemanlar yöntemi yazılımı olan Midas GTS-NX programı kullanılarak üç boyutlu (3D) sayısal model oluşturulmuştur. Şekil 3’te oluşturulan sayısal model gösterilmektedir. Yumuşak kil tabakası Şekil 3’te görüldüğü gibi üç tabakaya bölünmüştür. Bu tabakaların parametre seçiminde Jamsawang vd. (2016) tarafından verilen arazi karakterizasyonu göz önüne alınmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan zemin, dolgu ve DSM kolonu için parametre değerleri Tablo 1’de verilmektedir.

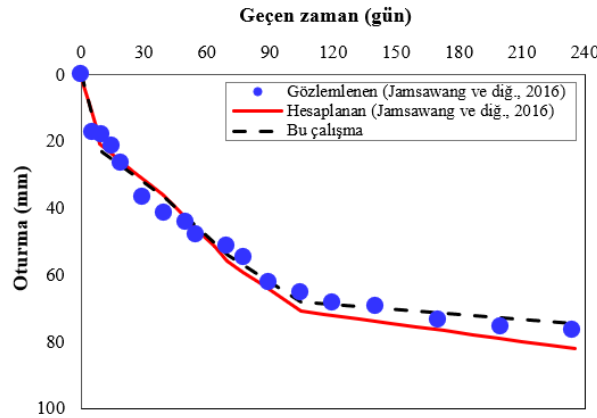


Şekil 3. DSM Kolonlarının Dolgu Yüğü Altında Üç Boyutlu (3D) Modellemesi

Oluşturulan model ile öncelikle konsolidasyon analizleri yapılmıştır ve Jamsawang vd. (2016) tarafından arazide ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada 235 güne kadar sürmüş olan dolgu inşaatının yapımı ve bu süreçte meydana gelen deplasmanlar verilmektedir. Yapılan analizler sonucunda Jamsawang vd. (2016) tarafından yapılan çalışma doğrulanmıştır. Şekil 4’te sistemde oluşan oturmanın zamanla değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi oluşan oturmalar, arazi ölçümleri ile ve Jamsawang vd. (2016) tarafından oluşturulan sayısal model ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 1. Sayısal Modelde Kullanılan Zemin Parametreleri

Parametre	Dolgu	Yumuşak Kil-1	Yumuşak Kil-2	Yumuşak Kil-3	Orta Katı Kil	Katı Kil	Yol dolgusu	DSM Kolon
Bünye modeli	Mohr-Coulomb	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Yumuşak Zemin (Soft Soil)	Pekleşen Zemin (Hardening Soil)	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Drenaj durumu	Drenajlı	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajsız	Drenajlı	Geçirimsiz
Birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³)	20,0	14,0	15,0	14,2	16,0	20,0	20	15
Elastisite Modül, E (Mpa)	30	-	-	-	-	50	20	80
Poisson oranı, ν	0,33	0,35	0,35	0,35	0,15	0,20	0,33	0,33
Başlangıç boşluk oranı, e_0	0,80	2,70	2,20	2,80	1,50	0,58	0,50	0,20
Kohezyon, c (kPa)	1	1	1	1	10	18	1	450
Kayma mukavemeti açısı, ϕ (°)	32	23	23	23	25	25	30	0
Permeabilite katsayısı, k (m/gün)	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	-
Modifiye sıkışma indisi, λ^*	-	0,22	0,20	0,23	0,21	-	-	-
Modifiye şişme indisi, κ^*	-	0,10	0,06	0,05	0,04	-	-	-
Aşırı konsolidasyon oranı (OCR)	-	1,75	1,50	1,25	2,00	2,50	-	-

**Şekil 4.** Oturmanın Zamanla Değişimi

PARAMETRİK ÇALIŞMA

Doğrulama analizleri sonrasında, bu model üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Bu kapsamda, kolon çapları ve aralıkları değiştirilerek farklı alan değiştirme oranlarında modeller oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Ayrıca aynı alan değiştirme oranına sahip farklı çaptaki kolonlar kullanılması durumunda farklı dolgu yükü altında oluşan oturmalar, kolonlara ve zemine gelen gerilmeler incelenmiştir. DSM kolonları için kullanılan elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için de analizler yapılmıştır.

Alan Değiştirme Oranının Etkisinin Değerlendirilmesi

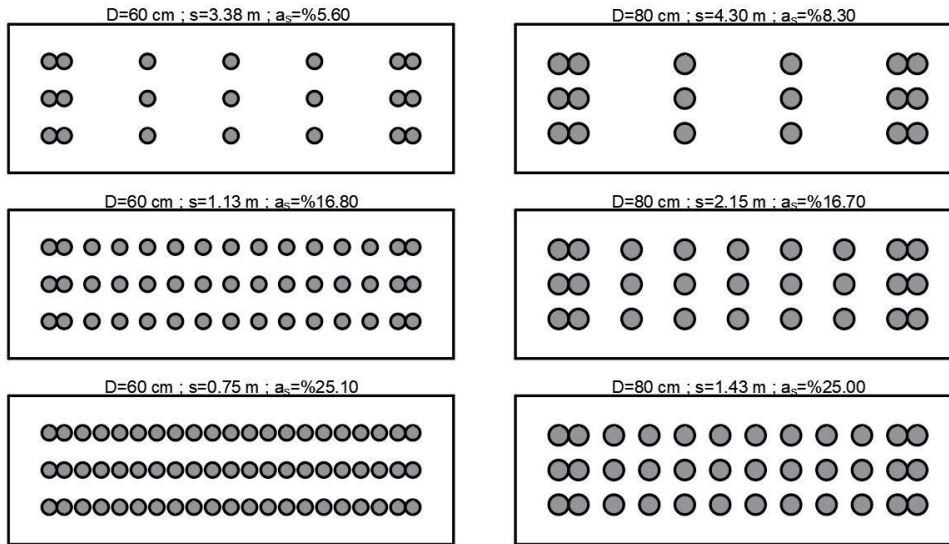
Alan değiştirme oranı, kolon alanının kolonu çevreleyen zemin alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Alan değiştirme oranı, $a_s = A_c / (A_c + A_s)$ olarak verilmektedir. Burada A_c ve A_s sırasıyla kolon ve çevredeki zeminin kesit alanlarıdır (Tan vd., 2008). FHWA (2013) dokümanında, derin karıştırma kolonları ile destekli dolgu uygulamalarında alan değiştirme oranının 0.2 ile 0.4 arasında değişiklik gösterdiği belirtilmektedir (Bruce vd., 2013). Farklı kaynaklarda ise alan değiştirme oranının daha düşük değerlerde olduğu uygulamalarda mevcuttur (Jamsawang vd., 2016; Madhyannapu ve Puppala, 2014).

Bu bölümde kolon aralığına bağlı olarak hesaplanan alan değiştirme oranının düşey deplasmanlar üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Farklı kolon aralıkları ve farklı kolon çapları, yani farklı alan değiştirme oranları kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Kullanılan kolon çapları 60 ve 80 cm'dir. Tablo 2'de oluşturulan modellerde kullanılan kolon

çapları, kolon aralıkları ve alan değiştirme oranları verilmektedir. Oluşturulan kolon yerleşimlerine ait örnekler Şekil 5'te verilmektedir.

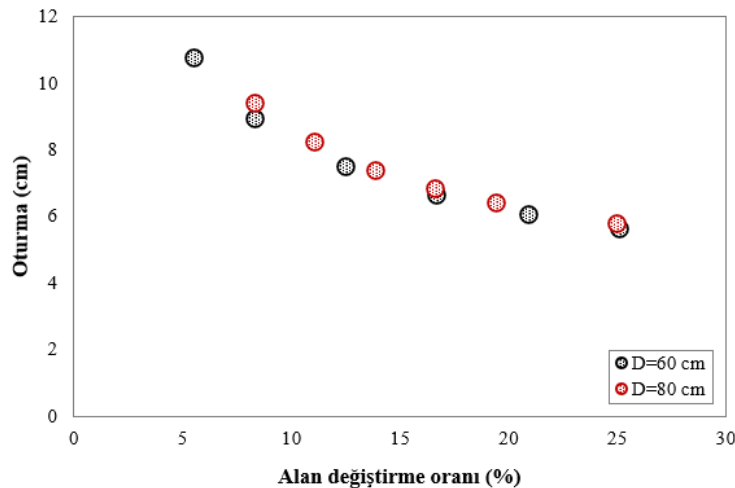
Tablo 2. Oluşturulan Modellerde Kullanılan Alan Değiştirme Oranları

Kolon Çapı (cm)	Kolon Aralığı (m)	Alan Değiştirme Oranı (%)
60	3,38	5,60
60	2,25	8,40
60	1,50	12,60
60	1,13	16,80
60	0,90	20,90
60	0,75	25,10
80	4,30	8,30
80	3,23	11,10
80	2,58	13,90
80	2,15	16,70
80	1,84	19,50
80	1,43	25,00



Şekil 5. Oluşturulan Kolon Yerleşimlerine ait Örnekler

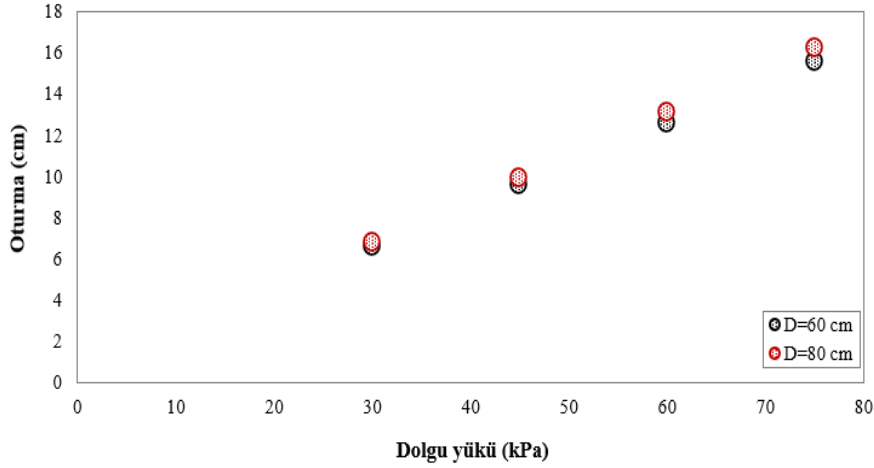
Oluşturulan modellerde “alan değiştirme oranı”nın değişimine bağlı olarak oluşan düşey deplasmanlar Şekil 6’da gösterilmektedir. Kolon aralığının artması ile alan değiştirme oranı azalmakta ve sistemde meydana gelen düşey deplasman değeri beklendiği gibi artmaktadır. Aynı alan değiştirme oranına sahip farklı kolon çaplarında meydana gelen düşey deplasmanların ise birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 6. Alan Değiştirme Oranı Değişimine Bağlı Oluşan Oturmalar

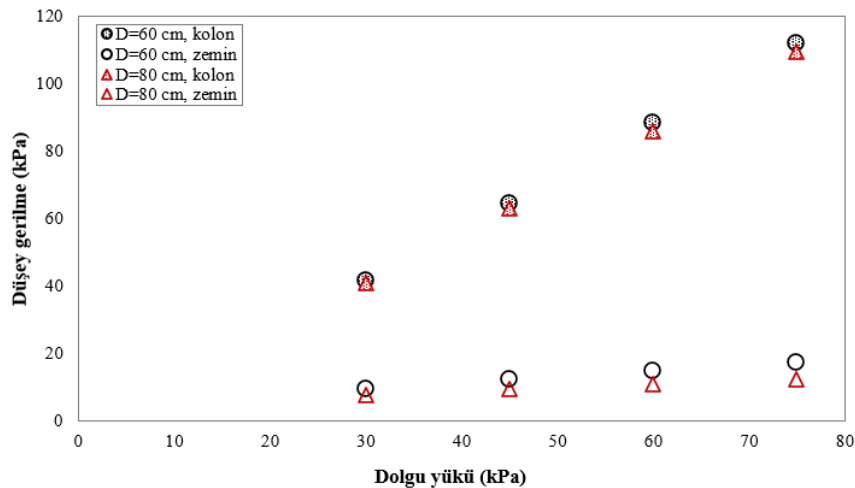
Dolgu Yükü Etkisinin Değerlendirilmesi

Parametrik çalışmalar kapsamında dolgu yükünün etkisi üzerinde de çalışılmıştır. Aynı alan değiştirme oranına sahip ($a_s = \%16$) 60 cm ve 80 cm kolon çapları kullanılarak dolgu yükünün artması ile sistemde meydana gelen düşey deplasmanlar, kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler incelenmiştir. Şekil 7’de dolgu yükünün artışı ile meydana gelen oturmalar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi dolgu yükündeki artış ile oluşan oturmalar artmaktadır. Aynı alan değiştirme oranına sahip ($a_s = \%16$) 60 cm ve 80 cm kolon çaplarında oluşan oturmaların birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 7. Dolgu Yüküne Bağlı Olarak Oluşan Oturmalar

Şekil 8’de ise aynı alan değiştirme oranına sahip ($a_s = \%16$) 60 cm ve 80 cm kolon çapı kullanılarak oluşturulan modellerde dolgu yükü artışı nedeniyle dolgu tabanında kolonlarda ve zeminde oluşan maksimum düşey gerilmelerin değerleri verilmektedir. Dolgu yükü artışı ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil 9’da 30 kPa’lık dolgu yükü altında 60 cm ve 80 cm kolon çaplarının modellendiği analizler için dolgu tabanından alınan kesitlerde kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler gösterilmektedir. Şekil 10’da ise 75 kPa’lık dolgu yükü altında 60 cm ve 80 cm kolon çaplarının modellendiği analizler için dolgu tabanından alınan kesitlerde kolonlara ve zemine gelen düşey gerilmeler gösterilmektedir. Zemine gelen gerilmelerin çok fazla değişmediği, dolgu yükünün büyük oranda kolonlara aktarıldığı görülmektedir.

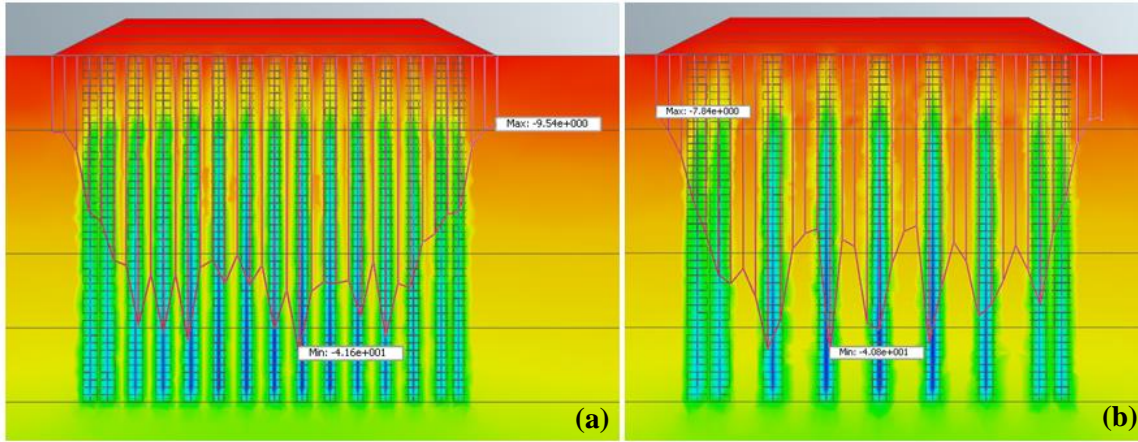


Şekil 8. Dolgu Yüküne Bağlı Olarak Oluşan Maksimum Gerilmeler

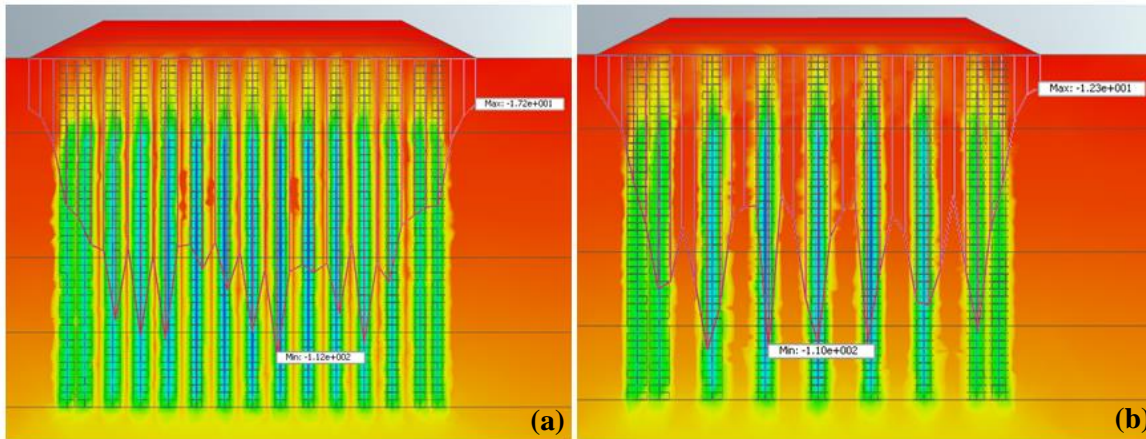
DSM Kolon Elastisite Modül Etkisinin Değerlendirilmesi

Literatür incelendiğinde, birçok araştırmacı tarafından başlangıç elastisite modülünün %50’si olan sekant modülü değerleri, E_{50} , derin karıştırılmış zeminlerin serbest basınç mukavemeti, q_u , ile ilişkilendirilmiştir. FHWA (2013) dokümanında DSM kolonlarının tasarımı için kuru karıştırma yönteminde $E_{50} = 150q_u$, ıslak karıştırma yönteminde ise $E_{50} = 300q_u$ olarak alınabileceği belirtilmektedir (Bruce vd., 2013). Çınar vd. (2017), önceki çalışmalardan

yaralanarak elastisite modülünün serbest basınç dayanımına göre değişimini gösteren değerleri bir araya getirmiştir. Bu değerler Şekil 11’de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi iyileştirilmiş zeminlerin elastisite modülü çok geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Diğer taraftan modülün doğru belirlenmesi çok önemlidir, çünkü kolon-yük arasındaki yük dağılımı ve oturma değerleri modül değerine bağlı olarak değişmektedir.



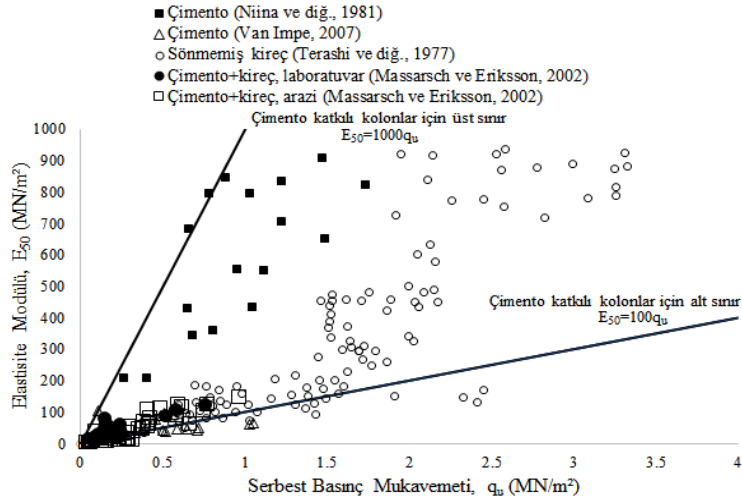
Şekil 9. 30 kPa’lık Dolgu Yüğü Altında Dolgu Tabanında Kolonlarda ve Zeminde Oluşan Düşey Gerilmeler
a. 60 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16 b. 80 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16



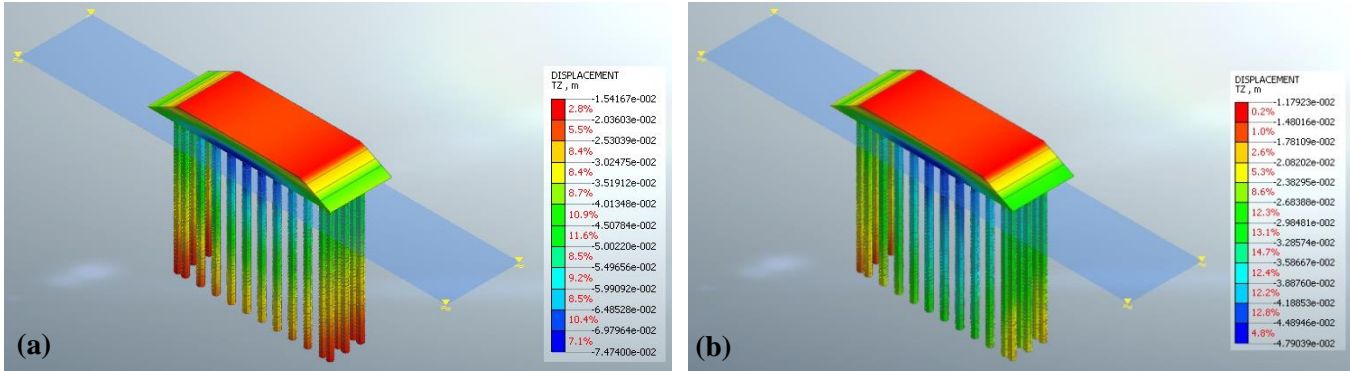
Şekil 10. 75 kPa’lık Dolgu Yüğü Altında Dolgu Tabanında Kolonlarda ve Zeminde Oluşan Düşey Gerilmeler
a. 60 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16 b. 80 cm Kolon Çapı, Alan Oranı % 16

DSM kolonların elastisite modülündeki değişimin iyileştirme üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için ilave analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerde literatürdeki değerlerle uyumlu olacak şekilde DSM kolonların elastisite modülleri, $E=150q_u$, $E=200q_u$ ve $E=300q_u$ olarak üç farklı modül değeri seçilmiştir. Bu üç modül değeri literatürde çimento ile yapılan derin karışırtırmalarda elde edilen modül aralıkları içerisinde kalmaktadır. Yapılan analizlerde sadece yukarıda belirtilen DSM kolonlarının elastisite modülleri değiştirilmiştir, diğer zemin ve kolon parametreleri aynı kalmıştır. Jamsawang vd. (2016) makalesindeki analizlerde DSM kolonları için kullanılan elastisite modülünün kolonların serbest basınç mukavemetinin yaklaşık 90 katı ($E=90q_u$) olarak seçildiği görülmektedir. Bu değerin Şekil 11’de gösterilen alt limit değerin biraz altında olduğu görülmektedir.

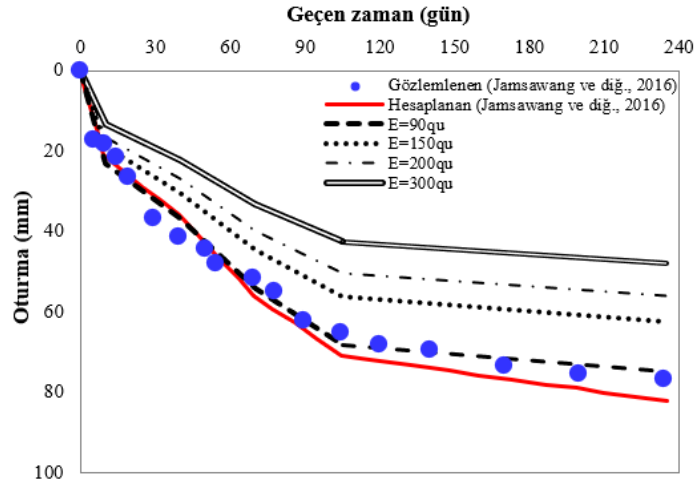
Analizler neticesinde derin karışırtırma kolonlarının elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman olduğu görülmüştür. Şekil 12’de yapılan analizler sonucu kolonlarda oluşan deplasmanlar gösterilmektedir ($E=90q_u$, $E=300q_u$). Şekil 13’te ise yapılan tüm analizlerin zamana bağlı oturma değerlerinin değişimi Jamsawang vd. (2016) tarafından yapılan çalışma verileri ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi DSM kolonları için atanan modül değerleri oturma değerlerini önemli seviyede etkilemektedir. Bu nedenle, bu değerlerin seçiminde zemin tipini dikkate alan değerlerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca sadece mukavemetin değil, modülün laboratuvarında ölçümü veya arazide doğru olarak ölçümü de çok önemlidir. Modül ölçümünün kalite kontrol sisteminin bir parçası haline getirilmesi gerekir.



Şekil 11. Serbest Basınç Mukavemeti-Modül Değerleri Korelasyonları (Çınar vd., 2017)



Şekil 12. Kolonlarda Meydana Gelen Deplasmanlar a. E=90qu b. E=300qu



Şekil 13. DSM Kolonların Elastisite Modülünün Zamana Bağlı Oturma Üzerindeki Etkisi

SONUÇLAR

Literatürde mevcut olan ve DSM kolonları ile destekli yol dolgusu ile ilgili bir çalışma seçilmiş ve üç boyutlu bir sayısal model oluşturularak doğrulama analizleri yapılmıştır. Daha sonra bu model üzerinde parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalar kapsamında, alan değiştirme oranının etkisi ve DSM kolonların elastisite modülünün iyileştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Analizler sonucunda alan değiştirme oranının artması ile düşey deplasmanların azaldığı ve aynı alan değiştirme oranına sahip modellerde meydana gelen düşey deplasmanların birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolgu yükü artışı ile kolonlara gelen düşey gerilmelerin büyük ölçüde arttığı görülmüştür.

Derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerleri sayısal modeller için önemli bir girdidir. Literatürde elastisite modülünün serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi için birçok korelasyon bulunmaktadır. Farklı DSM kolon elastisite modülü değerleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda, derin karıştırma kolonlarına ait elastisite modülü değerlerinin artması ile sistemde daha az deplasman oluştuğu görülmüştür. DSM kolonları için atanan modül değerleri oturma değerlerini önemli seviyede etkilemektedir. Bu nedenle, bu değerlerin seçiminde zemin tipini dikkate alan değerlerin kullanılmasına özen gösterilmelidir. Ayrıca sadece mukavemetin değil, modülün laboratuvarında ölçümü veya arazide doğru olarak ölçümü de çok önemlidir ve kalite kontrol sürecinin bir parçası olarak yer almalıdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN'ın İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde yaptığı doktora tezi kapsamında, Prof. Dr. İlknur BOZBEY'in Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı ile yürüttüğü KGM-ARGE/2019-8 proje numaralı, "Derin Karıştırma Yönteminde Elde Edilen İyileştirilmiş Zemin Özelliklerinin Laboratuvar ve Arazi Şartlarında Tayini ve Derin Karıştırma Şartnamesi Hazırlanması" başlıklı proje kapsamında yapılmıştır. Tüm destekleri için Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı'na teşekkür ederiz. Bu çalışma kapsamında elde edilen veriler Karayolları Genel Müdürlüğü, Ar-Ge Daire Başkanlığı'nın resmi görüşü değildir.

KAYNAKLAR

- Arulrajah, A., Abdullah, A., Bo, M. W. & Bouazza, A. (2009). Ground improvement techniques for railway embankments. *Proc Inst Civil Eng.*
- Bruce, M. E. C., Berg, R. R., Collin, J. G., Filz, G. M., Terashi, M. & Yang, D. S. (2013). Federal Highway Adm. design manual: deep mixing for embankment and foundation support. (No. FHWA-HRT-13-046.)
- Chai, J. C., Liu, S. Y. & Du, Y.J. (2002). Field properties and settlement calculation of soil cement improved soft ground – a case study. *Lowland Technol Int*, 4(2), 51–8.
- Çınar, F. T., Keleşoğlu, M. K., Bozbey, İ. & Gökgöz, A. (2017). Derin karıştırma ile iyileştirme seviyesini etkileyen faktörlerin nümerik olarak incelenmesi. 3. International Soil-Structure Interaction Symposium, İzmir, 519-530.
- Dahlström, M. (2013). Dry soil mixing. In: Kirsch K, Bell A, editors, Ground improvement, London, UK: CRC Press Taylor & Francis Group, 482–5.
- FHWA (2013). Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support, FHWA-HRt-13-046.
- Han, J. & Gabr, M. A. (2002). Numerical analysis of geosynthetic reinforced and pile supported earth platforms over soft soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (1), 44–53.
- Han, J., Zhou, H. T. & Ye, F. (2002). State of practice review of deep soil mixing techniques in China. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1808(1), Washington, DC, 49–57.
- Jamsawang, P., Yoobanpot, N., Thanasisathit, N., Voottipruex, P., & Jongpradist, P. (2016). Three-dimensional numerical analysis of a DCM column-supported highway embankment. *Computers and Geotechnics*, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.006>
- Jiang, Y., Han, J. & Zheng, G. (2014). Numerical analysis of a pile-slab-supported railway embankment. *Acta Geotech*, 9:499–511.
- Lawson, C. H., Spink, T. W., Crawshaw, J. S., & Essler, R. D. (2005). Verification of dry soil mixing at Port of Tilbury, UK. In: Proceedings of the international conference on deep mixing best practice and recent advances, May 23-25, Stockholm, Sweden, 453–462.
- Madhyannapu, R. S. & Puppala, A. J. (2014). Design and Construction Guidelines for Deep Soil Mixing to Stabilize Expansive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 10.1061/ (ASCE)GT.1943-5606.0001149, 01-15.

Ohdaira, H., Hashimoto, H., Gotoh, K. & Nozu, M. (2002). Observation results for the embankment on soft ground improved by DJM, *Tsuchi-to-kiso*, 31–3 [in Japanese].

Pye, N., O' Brien, A., Essler, R. D. & Adams, D. (2012). Deep dry soil mixing to stabilize a live railway embankment across Thrandestone Bog. In: Proceedings from the international conference on grouting and deep mixing, February 16–18, New Orleans, Louisiana, United States.

Tan, S. A., Tjahyono, S. & Oo, K. K. (2008). Simplified plane-strain modelling of stone-column reinforced ground, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134 (2), 185-194.

Topolnicki, M. (2004). In situ soil mixing. In: Moseley MP, Kirsch K, editors. Ground Improvement, New York, USA: Spon Press, 331–423.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2023
Kabul Tarihi : 02.08.2023

Received Date : 03.01.2023
Accepted Date : 02.08.2023

DOĞALTAŞ TOZ ATIKLARINDAN İNCE TANE BOYUTLU KALSİYUM KARBONATIN HİDROSİKLOKON İLE KAZANILMASI

RECYCLING OF FINE SIZE CALCIUM CARBONATE FROM NATURAL STONE DUST WASTE BY HYDROCYCLONE

Zehra Ebru SAYIN^{1*} (ORCID: 0000-0003-1949-3127)

Hakan ÇİFTÇİ¹ (ORCID: 0000-0001-7910-7350)

Mustafa GÜRSOY¹ (ORCID: 0000-0002-2894-8616)

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Zehra Ebru SAYIN, zerkan@aku.edu.tr

ÖZET

Kalsiyum karbonat (kalsit, CaCO_3) içindeki safsızlıkların uzaklaştırılması ve tane boyutunun 10 mikronun altına alınması ile endüstride katma değeri yüksek ürün olarak kullanılabilir. Bu amaçla çalışmada, doğaltaş işleme fabrikalarından çıkan toz atıklarıyla endüstriyel hammadde olarak değerlendirmek üzere hidrosiklon ile bir dizi zenginleştirme deneyleri yapılmıştır. Hidrosiklon çalışmalarında; besleme numunesinin katı/sıvı oranı (% 10, 15, 20), pulp giriş basıncı (0.5-1-1.5-2 bar), alt (apex çapı – 4.5 ve 6.4 mm) ve üst (vortex çapı – 14.3, 11.1 ve 8 mm) çıkış çapı ayarları değiştirilerek kademeli zenginleştirme yapılmıştır. Elde edilen nihai ürünlerin beyazlık (L) değerinin %96.80, parlaklık (Z) değerinin %86.72, CaCO_3 oranının yaklaşık %94, yağ emme değerinin 26.01 mL/100 g olduğu saptanmıştır. Hidrosiklon üst akımından elde edilen ve ana malzemenin ağırlıkça %51'ini teşkil eden Ürün 1'in tane boyut dağılım değerleri olan d_{10} , d_{50} , d_{90} sırasıyla 0.815 μm , 3.744 μm ve 9.865 μm olarak tespit edilmiştir. Böylece, doğaltaş işleme fabrikalarının sayıca ve hacimce fazla olduğu Afyonkarahisar ili için önemli bir potansiyel kaynak olan toz atıklardan elde edilecek ince ürünlerin çeşitli sektörlerde kullanımının mümkün olduğu, atık oluşumunun azaltılabilme imkânı nedeniyle çevresel sorunun da giderilmesine katkı sağlayacağı yönleriyle bu çalışma önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kalsit, hidrosiklon, atık, kalsiyum karbonat

ABSTRACT

Calcium carbonate can be used as a product with high added value in the industry by removing impurities and reducing the particle size below 10 microns. A series of experiments with hydrocyclone was carried out in order to use the dust wastes from factories as industrial raw materials. The solid/liquid ratio of the feed sample (10, 15, 20 %), pulp inlet pressure (0.5-1-1.5-2 bar), lower (apex diameter - 4.5 and 6.4 mm), and upper (vortex diameter-14.3, 11.1 and 8 mm) outlets of diameter settings were changed gradually. Determined that the average glowloss of the final products obtained was 44%, the whiteness (L) value was 96.80%, the brightness (Z) value was 86.72%, the CaCO_3 ratio was approximately 94%, and the oil-absorption value was 26.01 mL/100g. The grain size distribution values of Product 1 obtained from the hydrocyclone overflow and constituting 51% by weight of the base material, were detected as 0.815 μm , 3.744 μm , and 9.865 μm , respectively. Thus, this study is essential as it is possible to use the products obtained from dust wastes for Afyonkarahisar province being crucial on natural stone industry. It will contribute to the elimination of environmental problems due to the possibility of reducing waste generation.

Keywords: Calcite, hydrocyclone, waste, calcium carbonate

GİRİŞ

Ülkemizin yapı ve inşaat sektörlerinde doğaltaş kullanımının gittikçe yaygınlaşması; doğaltaş üretimini ve üretim sırasında ortaya çıkan atık miktarını arttırmaktadır. Afyonkarahisar ili, çevresinde yoğun doğaltaş madenciliği yapıldığından dolayı Türkiye'nin en önemli doğaltaş endüstri merkezlerinden biri olmuştur. Bu üretim yoğunluğundan ötürü bölgedeki doğaltaş üretim faaliyetleri ile ocaklardan pasalar, fabrikalardan paledyenler ve toz atıklar normalden fazla oluşmaktadır. Doğaltaşlar, ocaklardan blok üretimi ile çıkarıldıktan sonra fabrikalarda işlenmesi ile plaka, yer karosu, fayans gibi çeşitli ürünlere dönüştürülmektedir. Bu süreç içerisinde geriye çeşitli boyutlarda ve miktarlarda agrega ve toz boyutlarında atık kalmaktadır. Bu atıkların tane boyutlarına, kimyasal içeriklerine ve şekillerine göre çeşitli amaçlarla kullanılması mümkün olabilir (Ersoy vd., 2015; Bilensoy, 2010). Ancak, asıl katma değeri yüksek ürün toz atıkların içindeki safsızlıkların uzaklaştırılması ve tane boyutunun 10 mikronun altına düşürülmesi ile mümkün olmaktadır. Bu şekilde zenginleştirilen toz ürünlerin özellikle boya ve kâğıt endüstrisinde kullanım yeri olabilir.

Doğaltaş tozlarının tane boyut dağılımı, renk karakteristiği, kimyasal içeriği, beyazlık değeri, yağ absorplama kapasitesi vb. özellikleri hangi sektörde kullanılacağını gösterir. Doğaltaş işleme fabrikasındaki toz atıkların sektörde kullanılmasında, tane boyutu uygun olsa bile farklı doğaltaş türlerinin kesimi nedeniyle ortaya çıkan renk değişiminin sorun olduğu/olacağı düşünülmektedir. Kavas vd. (2003) refrakter çimento üretiminde, kalker kaynağı olarak toz doğaltaş atıklarını kullanmışlar, teknik kalitede çimento elde etmişlerdir. Seramik sektöründe CaO'in kullanılması ise mermer atık tozlarının kalsinasyonu ile mümkün olmaktadır. Böylece CaO'in seramiklerde plastikliği ve dayanımı arttırdığı belirtilmektedir (Kavas ve Kibici, 2001; Yıldız ve Eskikaya, 1995). Bir çalışmada kâğıt ve boya sektörüne yönelik yapılan araştırmalarda mermer tozunun 100 µm tane boyutu altında kalan (%90'ı 38 µm altı) kısmının kullanılabilirliği incelenmiştir. Sonuç olarak, öğütme ile yapılan boyut küçültme işleminin ardından, toz ürünlerin kâğıt ve boya sektöründe kullanılabilir olduğu rapor edilmiştir (Sayın ve Aksoy, 2013). Kalsitin, boya sektöründe kullanılan hammaddelerden TiO₂ ile ikame olanaklarının araştırıldığı bir çalışmada, iri kristallenmiş beyaz doğaltaşlar kullanılmıştır. Sonuç olarak öğütülmüş kalsitin standart boyuya göre TiO₂ kullanımı %4 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Karakaş ve Çelik, 2012). Başka bir çalışmada ise mermer atık tozlarının tuğla üretiminde kullanılabilmesine ve hazırlanan ürünün mukavemetinin kabul edilebilir derecede olduğu belirtilmiştir (Bilgin vd., 2012; Yeşilkaya vd., 2010). Toprağın Ca ihtiyacının karşılanması amacıyla asidik özellikteki topraklara karıştırılan kalsit tozlarının ağaç ve bitkilerin kalitesini arttırdığı ve daha fazla miktarda ürün alınabildiği bilinmektedir (Şahin, 1999). Ceylan (2000), yapmış olduğu çalışmada tane boyutu düşürülmüş ve CaCO₃ içeriği en az %95 seviyesinde olan toz atıkların derz dolgu maddesi olarak kullanılacağını belirtmiştir. Yine doğaltaş atıklarının öğütülerek balata dolgu malzemesi olarak kullanılmasının frenleme performansında olumlu sonuçlar verdiği de gözlemlenmiştir (Kılıç, 2010).

Hidrosiklon, katı-sıvı süspansiyonlardaki tanecikleri boyutuna ve yoğunluğuna göre etkili bir şekilde ayıran ekipmandır. Gravite ve santrifüj kuvvetlerin etkili olduğu hidrosiklon ile çok ince boyutlarda bile ayırım yapmak mümkündür. Klasik hidrosiklon çalışma prensibinde hidrosiklon içinde oluşan akış yörüngesinde partiküller çepere doğru bir santrifüj kuvvetin ve merkeze doğru bir direnç kuvvetinin etkisi altında kalmaktadır. Meydana gelen santrifüj kuvvet partiküllerin çökme hızlarını arttırmaktadır ve böylece taneler hidrosiklonun yapısına bağlı olarak boyut veya özgül ağırlıklarına göre ayrılmaktadırlar. Hızlı çöken partiküller (iri/ağır taneler) siklon duvarına doğru itilirler ve bu kısımda akış az olduğundan partiküller alt çıkış yönünde hareket ederler. Yavaş çöken taneler (ince/hafif taneler) ise direnç kuvveti nedeniyle siklon merkezi civarındaki düşük basınç zonundan üst çıkış borusuna doğru hareket ederek ortamdan ayrılırlar (Yıldız, 2010; Emrullahoğlu, 1985). Konik bölgenin en küçük kesitli kısmı hidrosiklon alt çıkış açıklığı (apex) oluşturmaktadır ve ayarlanabilir çapta imal edilir. Girdap bulucu ise ayırma mekanizmasında etkindir çapı büyüdükçe (vortex) üst akım tane boyutu irileşir. Siklon gövdesi çapı, besleme borusu çapı, üst ve alt çıkış çapları hidrosiklon ile çalışmada etkindir (Şekil 1).

Doğaltaş fabrika işletmecileri toz atıkları değerlendirememekle birlikte bertarafında da güçlük çekmektedirler. Ayrıca, atıkların farklı bir sektörde kullanılması çevresel bir sorunun giderilmesine de katkı sağlayacaktır. Bu nedenle doğaltaş üretim fabrikalarından çıkan toz atıkların değerlendirilebilmesinin sektöre ve ülke ekonomisine katkı sağlayacağı açıktır. Bu çalışmada, bir doğaltaş işleme fabrikasından üretim atığı olarak çıkan ince boyuttaki toz atıkların hidrosiklon ile safsızlıklarından ve nispeten iri boyuttaki tanelerden ayrılması incelenmiştir. Böylece doğaltaş toz atıklarının öğütülmeksizin mevcut hali sınıflandırılarak 10 µm tane boyutu altında kalan kısmının başka sektörlerde değerli bir endüstriyel hammadde olarak kullanılabilmesine dikkat çekilmiştir.



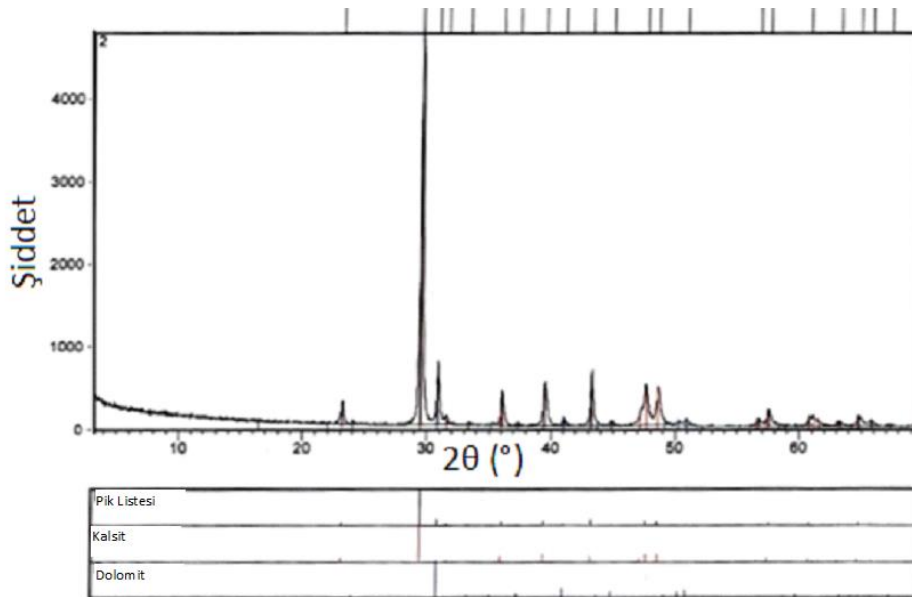
Şekil 1. a. Hidrosiklon Düzeneği, b. Genel Görüntüsü, c. Alt Çıkış (Apex) d. Üst Çıkış (Vortex) Parçaları

MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan doğaltaş atığı (toz atık) Afyonkarahisar ili içerisinde faaliyet gösteren bir fabrikadan temin edilmiştir. Tikiner çıkışının filtreden geçirilmesi ile kek haline getirilen atıktan alınan numunenin yaklaşık %16 neme sahip olduğu ve %100'ünün 138 µm tane boyutunun altında kaldığı tespit edilmiştir. Kek halindeki toz atıklar gri ve bej olarak renk tayini yapılmış olan iki farklı doğaltaş bloğunun kesimi esnasında oluşmuştur.

Numunenin kimyasal analizi X-ışınları Floresan (XRF) spektroskopisi ile ve tane boyut dağılım analizleri de Lazer kırınım parçacık boyutu analizör sisteminin kullanıldığı MALVERN Mastersizer 2000 cihazında yaş yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Mineralojik analizler Shimatzu X Işını Difraktometre (XRD) cihazında yapılmıştır ($2\theta=2^{\circ}-70^{\circ}$). Beyazlık değeri Hunterlab Colorflex (CFLX 45-2 Model Colorimeter) cihazında tespit edilmiştir. Yağ absorpsiyonu testleri ISO 787/5 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Nem tayini ise $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ etüvde sabit tartıma gelene kadar kurutulmak suretiyle yapılmıştır.

Doğaltaş toz atığının XRD piklerinden yaklaşık %90 oranında kalsit minerali (CaCO_3) içerdiği, %9 oranında dolomit minerali ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) içerdiği ve %1 oranında ise diğer minerallerden ibaret olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2).



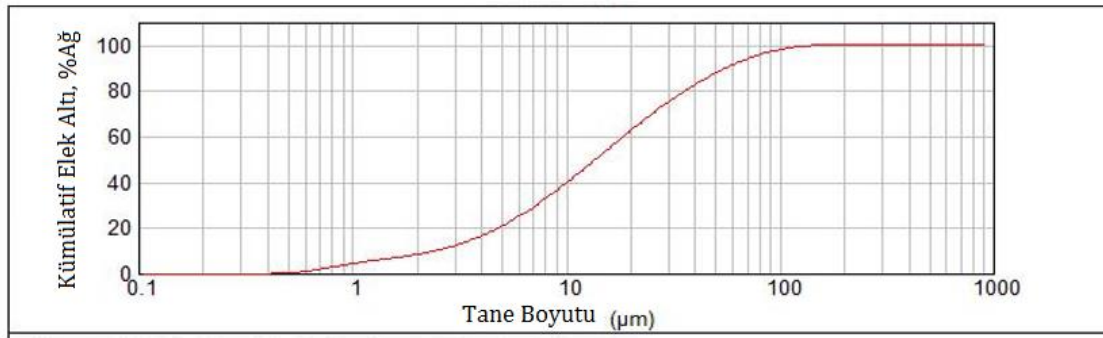
Şekil 2. Doğaltaş Toz Atığının XRD Grafiği (Sayın ve Aksoy, 2012)

XRF spektroskopisi ile numunenin kimyasal bileşimi tespit edilmiştir (Tablo 1). Tablo 1'den numuneye ait kızdırma kaybının %44.1 olduğu görülmektedir. CaO miktarı ise %52.6 olarak analiz edilmiştir. Teorik olarak değerlendirildiğinde toz atığın kalsit (CaCO_3) oranı %94.10 olarak hesap edilmiştir. Numuneye ait yapılan diğer testlerde ise 23 mL/100g yağ emme, %93.86 beyazlık, %80.60 parlaklık ve $2.5-2.7\text{ g/cm}^3$ yoğunluk değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Sayın ve Aksoy, 2012).

Numuneye yapılan tane boyut dağılımı analizinde d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla $1.674\ \mu\text{m}$, $11.524\ \mu\text{m}$, $48.524\ \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 3). Bununla birlikte numunenin %100'ünün yaklaşık 138 µm altında olduğu ve minimum tane boyutunun ise yaklaşık 0.5 µm olduğu belirlendi.

Tablo 1. Numunenin Kimyasal İçeriği (Sayın ve Aksoy, 2012)

İçerik	%-M
CaO	52,6
F	0,10
MgO	2,75
Al ₂ O ₃	0,07
SiO ₂	0,19
P ₂ O ₅	0,06
SO ₃	0,03
Cl	0,01
K ₂ O	0,01
Na ₂ O	0,02
MnO	0,01
Fe ₂ O ₃	0,05
Kızdırma Kaybı	44,1

**Şekil 3.** Numunenin Tane Boyut Analizi

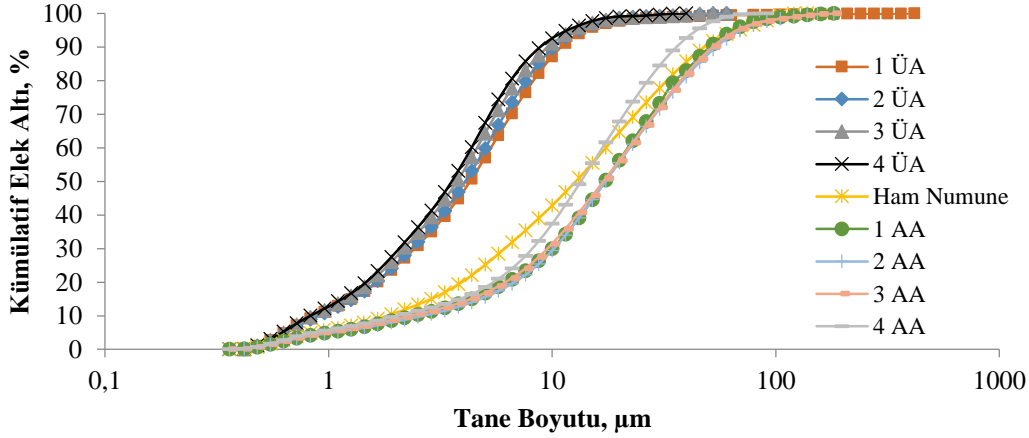
Hidrosiklon ile zenginleştirme deneylerinde önce kek halindeki numune %30 katı/sıvı oranında mekanik karıştırıcıda açma işlemine tabi tutulmuştur. Açma işleminin ardından hidrosiklon çalışmalarına geçilmiştir. Hidrosiklon çalışmalarında 44 mm çaplı Mozley tip hidrosiklon gövdesi kullanılmıştır. Giriş basınç ayarı 0.5-1-1.5-2 bar olarak tercih edilmiştir. Hidrosiklon alt (apex çapı – 4.5 ve 6.4 mm) ve üst (vortex çapı – 14.3, 11.1 ve 8 mm) çıkış çapları değiştirilerek ayarlanabilir özellikte olan çıkışlar kullanılmıştır. Hidrosiklonunda yapılacak her bir deney için yaklaşık 3 kg katı numune kullanılmıştır. Yapılan her bir deneyin çalışma şartları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Çalışmanın İlk Aşamasında Değerlendirilen Parametreler

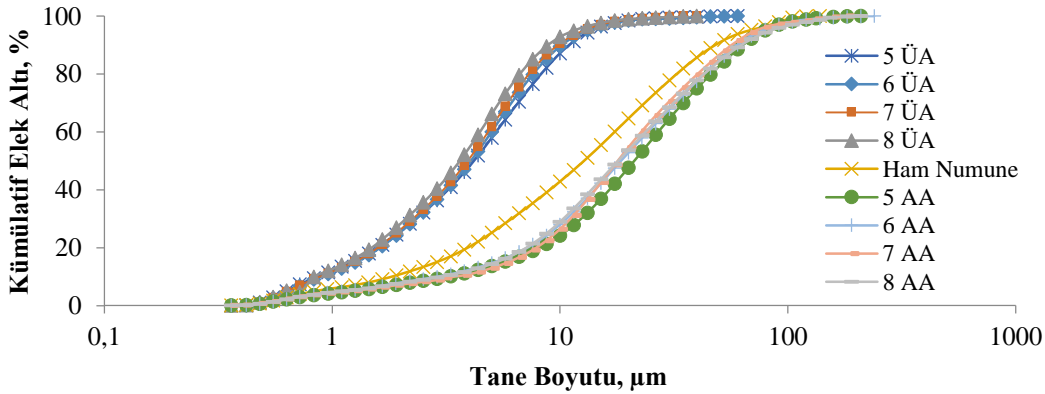
Deney Kodu	% Katı/Sıvı Oranı	Apex Çapı, mm	Vortex Çapı, mm	Bar
1				0,5
2				1
3	10	6,4	11,1	1,5
4				2
5				0,5
6				1
7	15	6,4	11,1	1,5
8				2
9				0,5
10				1
11	20	6,4	11,1	1,5
12				2
13				0,5
14				1
15	20	6,4	14,3	1,5
16				2
17	20	4,5	14,3	1,5

BULGULAR

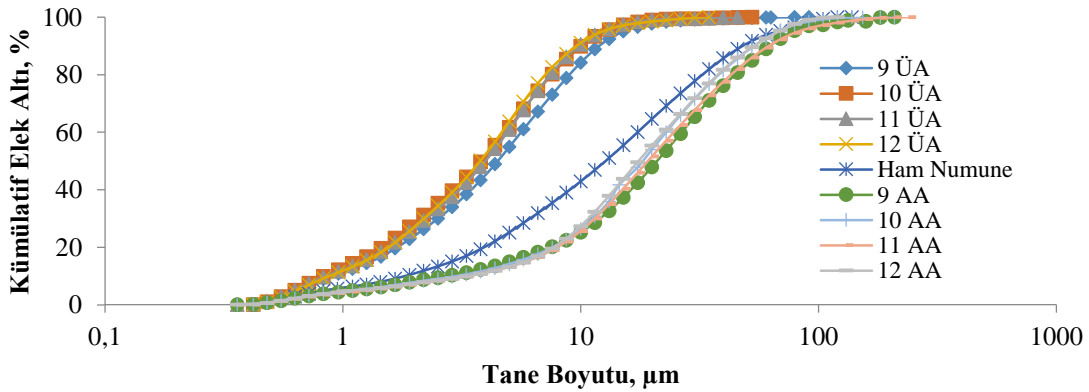
Hidrosiklon çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada ön konsantre ve nihai atık elde edilmiştir. İkinci aşamada ise ön konsantreye temizleme uygulanarak nihai ürün elde edilmiştir. Araştırmanın ilk aşamasında, %10, %15 ve %20 katı/sıvı oranında hazırlanan eş numuneler Tablo 2’de verilen parametrelerde hidrosiklona ayrı ayrı beslenmiştir. Çalışma sonuçlarının ifade edilmesini kolaylaştırmak amacıyla deney kodları kullanılmıştır. Elde edilen ürünlerin tane boyut analizleri yapılmıştır. Şekil 4’de %10 katı/sıvı oranına, Şekil 5’de %15 katı/sıvı oranına, Şekil 6’da ise %20 katı/sıvı oranına göre elde edilen ürünlerin grafikleri verilmiştir. Grafiklerde hidrosiklon üst akımı ÜA, hidrosiklon alt akımı ise AA şeklinde kodlanmıştır.



Şekil 4. %10 Katı/Sıvı Oranına Göre Elde Edilen Ürünlerin Kümülatif Elek Altı Grafiği (6.4 mm Apex Çapı, 11.1 mm Vortex Çapı)



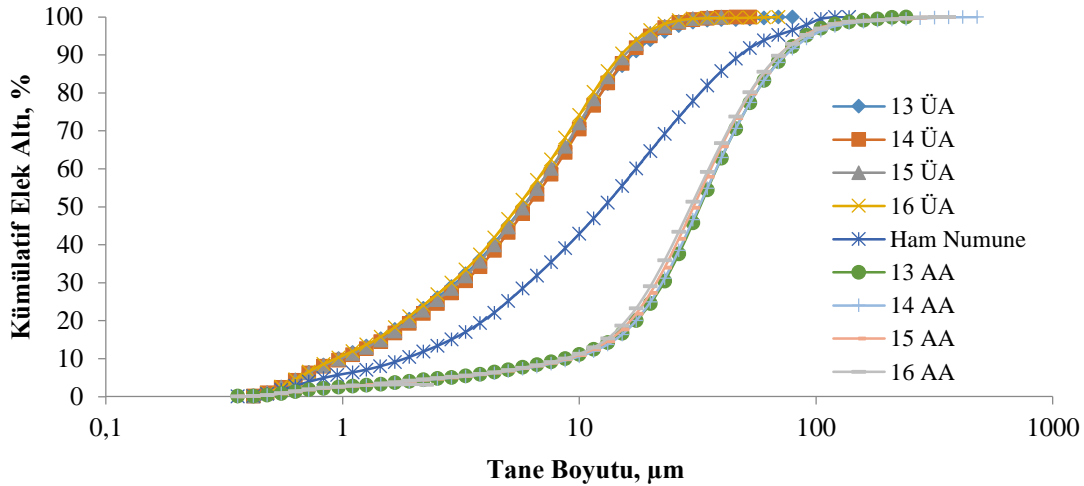
Şekil 5. %15 Katı/Sıvı Oranına Göre Elde Edilen Ürünlerin Kümülatif Elek Altı Grafiği (6.4 mm Apex Çapı, 11.1 mm Vortex Çapı)



Şekil 6. %20 Katı/Sıvı Oranına Göre Elde Edilen Ürünlerin Kümülatif Elek Altı Grafiği (6.4 mm Apex Çapı, 11.1 mm Vortex Çapı)

Bulgular değerlendirildiğinde tane boyut dağılımlarının birbirine çok yakın olması nedeniyle tesis kapasitesi dikkate alınarak, %20 katı/sıvı oranında 1.5 bar pülp besleme basıncının (deney 11) en iyi yaklaşım olduğuna karar verilmiştir. Bu şartlarda üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.852 μm , 3.977 μm ve 9.792 μm olarak elde edilmiştir. Bu parametrelere göre malzemenin yaklaşık %40'ı ince ürün olarak sınıflandırılmıştır.

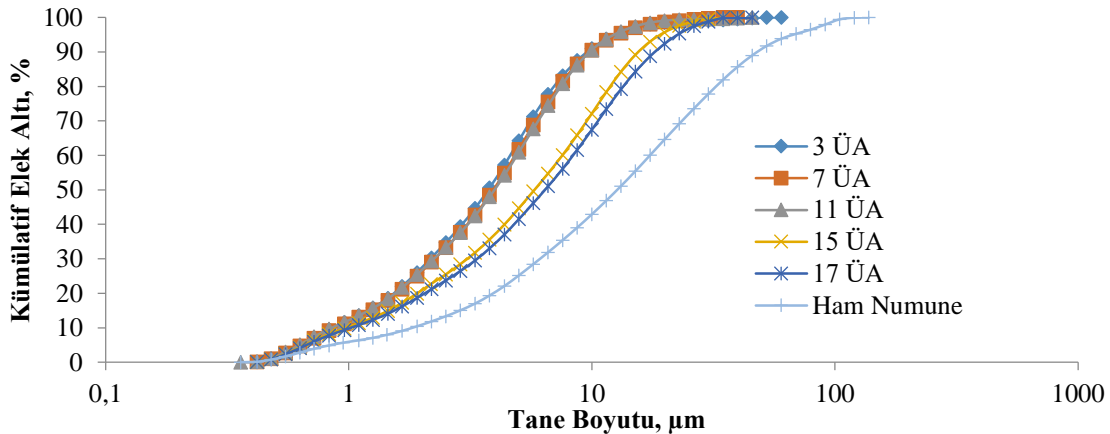
Elde edilen veriler ışığında ikinci grup deneyler için %20 katı/sıvı oranında hazırlanan numune 6.4 mm apex ve 14.3 mm vortex çapına ayarlanan hidrosiklona 0.5, 1, 1.5 ve 2 bar basınçlarında beslenmiştir. Elde edilen ürünlerin tane boyut dağılım eğrileri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. %20 Katı/Sıvı Oranına Göre Elde Edilen Ürünlerin Kümülatif Elek Altı Grafiği (6.4 mm Apex Çapı, 14.3 mm Vortex Çapı)

Şekil 7'de verilen sonuçlara göre en iyi çalışma koşullarına 1.5 bar besleme basıncında (deney 15) ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu şartlarda üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.972 μm , 5.817 μm ve 15.538 μm olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelere göre malzemenin yaklaşık %66'sı ince ürün olarak sınıflandırılmıştır. Üst akımdan alınan malzeme miktarının %40'tan %66'ya yükselmesinin sebebi vortex çapının artırılmasıdır. Vortex çapı büyüdükçe üst akım miktarı artarken apex çapı büyüdükünde alt akımdan alınan malzeme miktarı artar.

Elde edilen veriler ışığında üçüncü grup deneyler için %20 katı/sıvı oranında ana malzemedan hazırlanan numune, 4.5 mm apex ve 14.3 mm vortex çıkış çaplarında ayarlanmış hidrosiklona 1.5 bar basınç değerinde beslenmiştir (deney 17). Çalışma sonucunda, üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 1.015 μm , 6.414 μm ve 18.134 μm olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelere göre malzemenin yaklaşık %73'ü ince ürün olarak sınıflandırılmıştır. Bu deneyde de vortex çapı sabit tutulup apex çapı düşürüldüğü için üst akımdan alınan malzeme miktarı %66'dan %73'e kadar yükselmiştir. Çalışmaya ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. 1.5 Bar'da Elde Edilen Hidrosiklon Üst Akım Ürünlerinin Karşılaştırmalı Grafiği

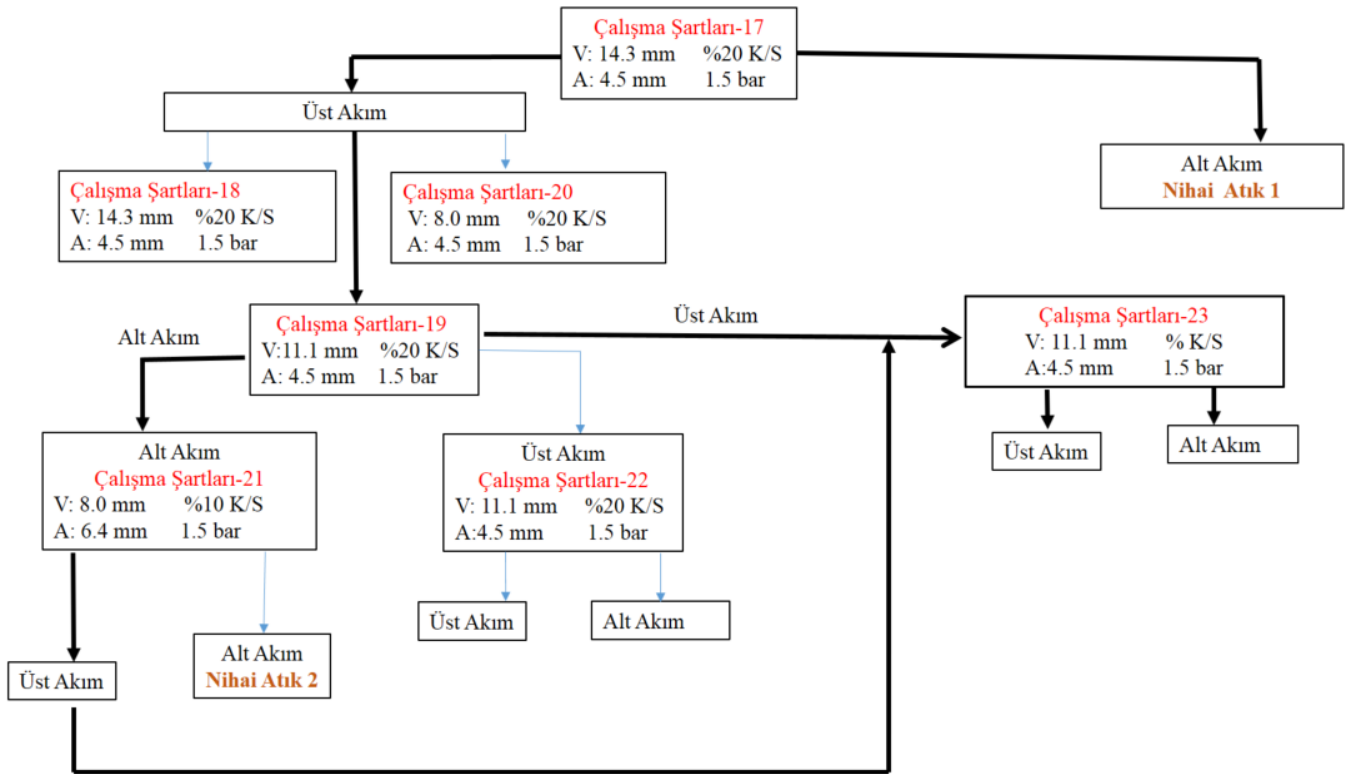
Elde edilen tane boyut dağılımı ile üst akım % ağırlık verileri değerlendirildiğinde çalışmaya ana malzemenin %20 katı/sıvı oranında hazırlanarak 4.5 mm apex ve 14.3 mm vortex çaplarında ayarlanan hidrosiklona 1.5 bar basınç değerinde beslenmesine karar verilmiştir (deney 17). Elde edilen hidrosiklon alt akımı Nihai Atık 1 olarak değerlendirilmiş, üst akım ürünü ise temizlenmeye tabi tutulan ön konsantre olarak nitelendirilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise elde edilen ön konsantrenin tekrar safsızlıklardan ve iri tanelerden temizlenerek zenginleştirilmesi ve tane boyutunun düşürülmesi hedeflenmiştir. Ön konsantrenin hidrosiklona beslenerek yapıldığı deneylerin çalışma parametreleri Tablo 3’de verilmiştir. Zenginleştirme çalışmaları ile elde edilen ürünlere ait akım şeması ise Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 3. Çalışmanın İkinci Aşamasında Değerlendirilen Parametreler

Deney Kodu	%Katı/Sıvı Oranı	Apex Çapı, mm	Vortex Çapı, mm	Bar
18	20	4,5	14,3	1,5
19	20	4,5	11,1	1,5
20	20	4,5	8,0	1,5
21	10	6,4	8,0	1,5
22	20	4,5	11,1	1,5
23	-	4,5	11,1	1,5

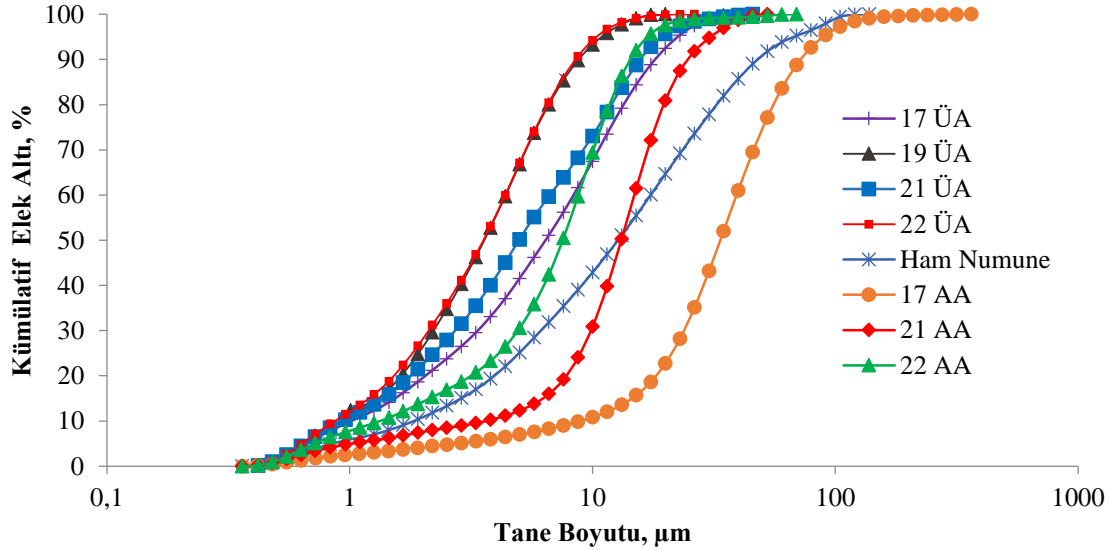
18, 19 ve 20 no’lu deney sonuçları incelendiğinde 19 no’lu deney parametrelerinin en uygun sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Bu şartlarda üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.844 μm , 3.997 μm ve 10.471 μm olarak tespit edilmiştir. Bu parametreler ile ana malzemenin yaklaşık %48’i ince ürün olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 9. İkinci Grup Zenginleştirme Çalışmaları İle Elde Edilen Ürünlere Ait Akım Şeması

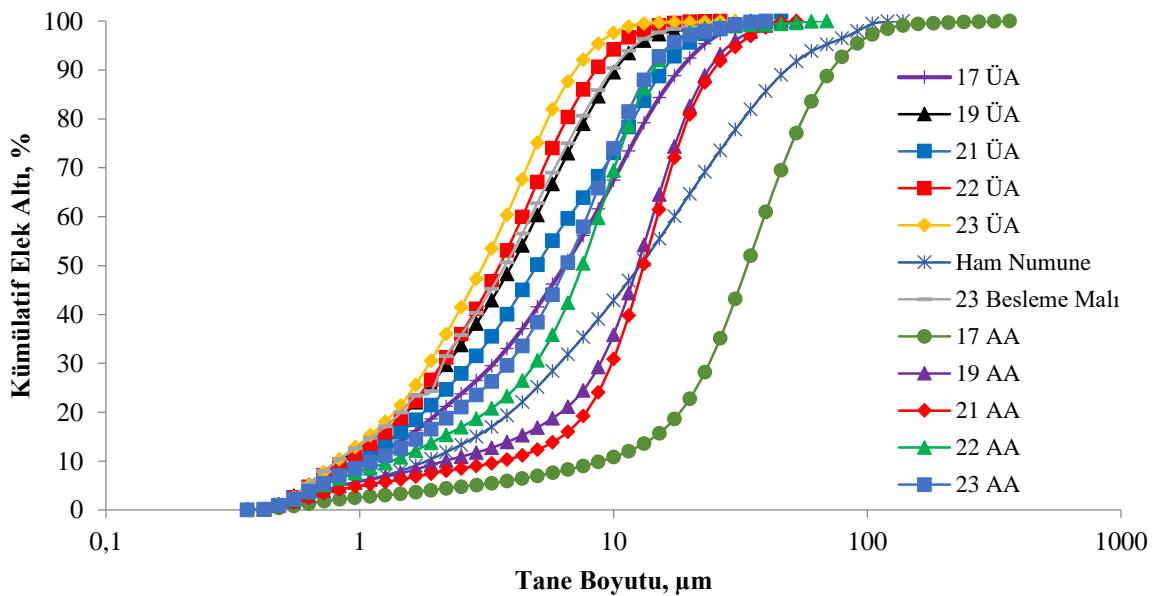
19 no’lu deney parametreleri ile gerçekleştirilen çalışmada alt akım 21 no’lu deney numunesi, üst akımı ise 22 no’lu deney numunesi olarak hazırlanmıştır. 21 no’lu deney numunesi %10 katı/sıvı oranında, 6.4 mm apex ve 8 mm vortex çaplarında hazırlanmış hidrosiklona 1.5 bar basınç değerinde beslenmiştir. Elde edilen alt akım Nihai Atık 2 olarak değerlendirilmiştir. Belirtilen şartlarda üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.937 μm , 4.987 μm ve 15.729 μm olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma ile ana malzemenin yaklaşık %3’ü ince ürün olarak sınıflandırılmıştır. Temizleme sonrası elde edilen hidrosiklon ürünlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 10’da verilmiştir. 22 no’lu çalışma elde edilen sonuçlar içerisinde fark yaratmadığından iptal edilmiştir.

Deney sonuçları değerlendirilerek 19 no'lu deneyin üst akımı ile 21 no'lu deneyin üst akımı birleştirilerek (ana malzemeye göre %51 oranındadır) 23 no'lu deney numunesi oluşturulmuştur. Çizelge 3'de verilen şartlarda tekrar hidrosiklonla beslenmiştir. Bu şartlarda 23 no'lu deney numunesinin tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.815 μm , 3.744 μm ve 9.865 μm olarak tespit edilmiştir (Ürün 1). 23 no'lu deneyin gerçekleştirilmesi ile üst akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 0.812 μm , 3.132 μm ve 7.302 μm olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelere göre malzemenin yaklaşık %40'ı ince ürün (Ürün 2) olarak sınıflandırılmıştır. Alt akım tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 1.144 μm , 6.583 μm ve 9.865 μm olarak tespit edilmiştir. Bu parametrelere göre malzemenin yaklaşık %11'i ince ürün (Ürün 3) olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 10. Temizleme Sonrası Elde Edilen Hidrosiklon Ürünlerinin Karşılaştırmalı Grafiği

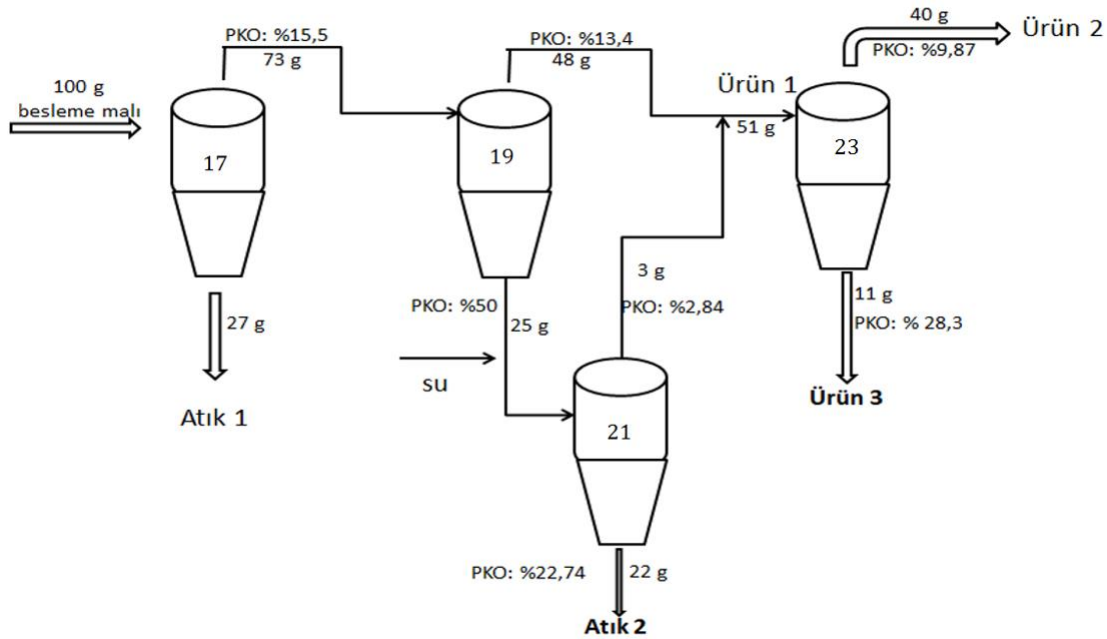
Şekil 11'de nihai zenginleştirme ile elde edilen hidrosiklon ürünlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Şekilden de incelenebileceği gibi en ince ürün 23 no'lu deneyin üst akım çıkışından alınmıştır. Tablo 4'de hidrosiklon ürünlerinin bazılarının kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ürünler arasında kimyasal içerik olarak belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Şekil 12'de elde edilen alt ve üst akım değerleri referans alınarak örnek bir materyal balans akışı verilmiştir.



Şekil 11. Nihai Zenginleştirme ile Elde Edilen Hidrosiklon Ürünlerinin Karşılaştırmalı Grafiği

Tablo 4. Ürünlerin Bazılarının Kimyasal Analiz Sonuçları

Analiz	Birim	17AA	21ÜA	21 AA	23 AA
SiO ₂	%	0,239	0,231	0,236	0,203
Fe ₂ O ₃	%	0,046	0,060	0,046	0,053
Al ₂ O ₃	%	0,149	0,114	0,122	0,081
CaO	%	52,566	51,827	52,993	52,394
MgO	%	2,526	2,955	2,272	2,690
SrO	%	0,025	0,028	0,029	0,028
SO ₃	%	0,032	0,042	0,023	0,042
K ₂ O	%	0,011	0,017	0,011	0,012
P ₂ O ₅	%	0,029	0,054	0,020	0,037
Cl	%	-	0,024	0,015	-
Na ₂ O	%	-	-	-	0,082
Kızdırma Kaybı	%	44,377	44,648	44,231	44,380

**Şekil 12.** Zenginleştirme Çalışmaları Sonucu Elde Edilen Ürünlere Ait Örnek Bir Materyal Balansı Akım Şeması

TARTIŞMA VE SONUÇ

Doğaltaş işleme fabrikalarında çeşitli boyut ve ebatta ürünler üretilirken ortaya çıkan ince boyuttaki doğaltaş tozlarından hidrosiklon kullanılarak çok ince tane boyutlu (10 µm altı) kalsiyum karbonat kazanılmaya çalışılmıştır. Çalışmaya konu olan malzemenin tamamının 138 µm tane boyutu altında kaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada atık malzemeden safsızlıkların ve iri tanelerin uzaklaştırılması hedeflenerek hammaddeyi geliştirmek amaçlanmıştır. Hidrosiklon çalışması ile elde edilen ürünler incelendiğinde, kimyasal içerikte ana malzemeye göre belirgin bir fark olmadığı lakin tane sınıflandırması açısından cihazın etkin bir şekilde çalıştığı, beklenen performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Karakterizasyon çalışmaları ile doğaltaş atık numunesinin %94.10 CaCO₃, 23 mL/100g yağ absorplama kapasitesi, %93.86 beyazlık, %80.60 parlaklık, piknometre ile 2.5-2.7 g/cm³ yoğunluk değerlerine sahip olduğu saptanmıştır (Sayın ve Aksoy, 2012). Besleme malı tane boyu dağılımı d₁₀, d₅₀, d₉₀ değerleri ise sırasıyla 1.674 µm, 11.524 µm, 48.524 µm olarak analiz edilmiştir.

Hidrosiklon çalışması ile elde edilen ürünler değerlendirildiğinde kızdırma kaybının ortalama %44, beyazlık (L) değerinin %96.80, parlaklık (Z) değerinin %86.72, CaCO₃ oranının yaklaşık %94, yağ absorplama kapasitesinin 26.01 ml/100g ve 2.5-2.7 g/cm³ yoğunluk değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ana malzemenin %51'i 10 µm altında kalmıştır ve Ürün 1 olarak isimlendirilmiştir. Ürün 1'in tane boyut dağılımı d₁₀, d₅₀, d₉₀ değerleri sırasıyla 0.815 µm, 3.744 µm ve 9.865 µm olduğu, Ürün 1 ile çalışılması sonucu oluşan Ürün 2'nin tane boyut dağılımı değerleri sırasıyla ise 0.812 µm, 3.132 µm ve 7.302 µm olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma parametrelerine göre

malzemenin yaklaşık %40'ı Ürün 2'de yer almaktadır. Ürün 1 ile çalışılması sonucu elde edilen Ürün 3'ün tane boyut dağılımı d_{10} , d_{50} , d_{90} değerleri sırasıyla 1,144 μm , 6.583 μm ve 9.865 μm olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre malzemenin yaklaşık %11'i Ürün 3'de sınıflandırılmıştır.

Kesim esnasında ürünlerin renk olarak sürekliliğinin sağlanması kağıt gibi bazı uygulama alanlarında sorun teşkil edebilir. Ancak Türkiye'de fiyatının 100-200 TL/ton arasında olduğu bilinen CaCO_3 'ün öğütülüp belirli fiziksel özellikler kazandırıldıktan sonraki fiyatları Nisan-Mayıs-Haziran 2022 verilerine göre tane boyutu bazında incelenmiştir. 50-22 mikron arası 30-35 \$/s.ton, 22-10 mikron arası 65-120 \$/s.ton, 3 mikron altının ise 195-220 \$/s.ton olduğu bilinmektedir. Böylece, basit bir üretim planlaması, günümüz teknolojisi ve pülün taşınacağı boru hatları ile aşılamayacak bir sorun olmadığı anlaşılmaktadır (Anonim, 2022).

Sonuç olarak, ürün geliştirme ve atık miktarının azaltılmasına yönelik yapılan bu çalışmada, numunenin alındığı tesis bazında genelleme yapıldığında; doğaltaş ürünleri üretimi esnasında %16.5 neme sahip, %99'a yakın bir kısmı 100 μm tane boyutu altında kalan, günlük yaklaşık 150 ton ince atık oluşmaktadır. Parça cevher olarak kalsiti ocaktan alıp 100 mikron tane boyutu altına getirdiğimiz süreçteki maliyetler ile ince doğaltaş atıklarının maliyetini karşılaştırdığımızda tesis ince atıklarının ve çalışmanın önemi dikkat çekici olmaktadır. Hâlihazırda atık içerisindeki ince boyutlu kalsit hidrosiklon vasıtasıyla iri ve yoğun partiküllerden ayrılarak kullanım alanı bulabilmektedir ve katma değeri olan ürünlere dönüştürülebilmektedir. Kullanım alanı oluşturularak atık miktarının azaltılması hususunun çevre koruma açısından da oldukça değerli olduğu tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 17.MUH.ALTY.05 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Anonim, (2022). Metal - Maden Fiyatları, Madencilik Bülteni, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, <http://www.maden.org.tr>, 16.12.2022, Nisan Mayıs Haziran 2022, Sayı 141, Ankara, (s.58-59).
- Bilensoy, M. (2010). Mermer Fabrikaları Toz Atıklarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 69s.
- Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. & Marşoğlu, M. (2012). *Construction and Building Materials*, 29, (s. 449–457).
- Ceylan, H. (2000). Mermer Fabrikalarındaki Toz Mermer Artıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, S. D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 43s.
- Currie, J.M. (1973). *Classification, Unit Operations In Mineral Processing*. Columbia.
- Emrullahoğlu Ö.F. (1985) Cevher Hazırlamada Koyulaştırma, Klasifikasyon, Kömür Hazırlama ve Çözümlü Problemler Anadolu Üniversitesi M.M.F. 28, Eskişehir.
- Ersoy B., Sayın Z.E., Sayın Ü. ve Arsoy Z. (2015). Yeterince Farkında Olmadığımız Atıl Kaynağımız: Doğaltaş Ocak ve Fabrika Atıkları. *Maden Ocak Teknolojileri* (27), (s. 92-100).
- Karakaş, F. ve Çelik, M. Y. (2012, Aralık). İri Kristalli Mermer Artıklarının Su Bazlı Boyalarda Dolgu Maddesi Olarak Kullanımı, Türkiye 8. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, Afyonkarahisar, (s. 111-119).
- Kavas, T. ve Kibici, Y. (2001, Mayıs). Afyon bölgesi mermer atıklarının portland kompoze çimentosu üretiminde katkı maddesi olarak kullanım olanakları, Türkiye 3. Mermer Sempozyumu, Afyonkarahisar, (s. 327-355).
- Kılıç, H. (2010). Mermer atıklarının otomotiv fren balata üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 95 s.
- Sayın Z. E. ve Aksoy, U. (2012). Mermer Toz Artıkları Özelliklerinin İyileştirilmesine Falcon Gravite Konsantratörün Etkisi, *Madencilik, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi*, 4(51) Ankara (s.23-29).
- Şahin, N. (2008). Kalsit hakkında bazı bilgiler, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Bülteni, 2, (s.48-51).

Yeşilkaya, L., Çetin, O., Abi, E. ve Ersoy, M. (2010). Korkuteli Bej Mermer Tozunun Tuğla Yapımında Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Türkiye 7. Uluslararası Mermer ve Doğaltaş Kongresi, Afyonkarahisar, (s. 323-330).

Yıldız N. (2010). Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme, Ankara: ERTEM Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. (s. 293-412).



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.01.2023
Kabul Tarihi : 12.06.2023

Received Date : 31.01.2023
Accepted Date : 12.06.2023

BORU DEMETİ ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE FARKLI BORU ÇAPI KULLANIMININ AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRMEYE ETKİSİ

THE EFFECT OF USE OF DIFFERENT DIAMETER ON IMPROVEMENT OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN TUBE BANK HEAT EXCHANGERS

Muhammet Nasıf KURU^{1*} (ORCID: 0000-0002-5941-1221)

Mehmet Tahir ERDİNÇ² (ORCID: 0000-0003-2201-2937)

İlyas KARASU³ (ORCID: 0000-0003-3118-6236)

Şaban ÜNAL⁴ (ORCID: 0000-0002-4276-2412)

¹ Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tarsus, Mersin, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

³ Samsun Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

⁴ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet Nasıf KURU, mnasifkuru@tarsus.edu.tr

ÖZET

Boru demeti ısı değiştiricilerinde, boruların içindeki akışkana çapraz yönde etrafından geçirilen başka bir akışkan ile ısı transferi gerçekleştirilir. Boru dışından çapraz yönde geçirilen akışkan çoğunlukla gaz akışkanlardır. Art arda yerleştirilen borularda, en fazla ısı transferi çoğu kez birinci boruda elde edilmektedir. Birinci borudan sonra ısı ve akış karakteristiği birbirine benzer hal almaktadır. Bu durumda, hız ve sıcaklık konturlarının tekrarlanması ile periyodik akış elde edilmiş olur. Ardışık olarak gelen borularda sınır tabakanın sürekli olarak yenilenmesini sağlamak, diğer borularda birinci borudaki gibi yüksek ısı transferi elde edilmesine imkân tanyacaktır. Isı transferi iyileştirilirken en önemli sorun basınç düşümünün de artmasıdır. Bu çalışmada düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetinde, art arda yerleştirilen dört farklı çaptaki borular kullanılarak, ısı transferinin artırılması ve basınç düşümünün azaltılması amaçlarıyla sayısal optimizasyon yapılmıştır. Karşılaştırmalar, ısı transferi yüzey alanının sabit, borular arasındaki boyuna ve enine mesafelerin aynı olduğu varsayılarak yapılmıştır. Düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetinde ardışık olarak yerleştirilen dört adet borunun çaplarının $D_1 = 5 \text{ mm}$, $D_2 = 15 \text{ mm}$, $D_3 = 6 \text{ mm}$, $D_4 = 14 \text{ mm}$ olması durumunda ısı transferi %14.5 oranında artarken, basınç düşümü de %377 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boru demeti, farklı çaplarda borular, ısı transferi, basınç düşümü, optimizasyon

ABSTRACT

In tube bank heat exchangers, heat transfer is carried out with another fluid which is passed around in the cross direction to the fluid inside the tubes. The fluid that passes through the outside of the tube in the cross direction is also mostly gas fluids. In tubes placed one after another, the highest heat transfer is usually obtained in the first tube. The heat and flow characteristics become similar to each other after the first tube. In this case, periodic flow is obtained by repeating the velocity and temperature contours. Ensuring that the boundary layer is constantly renewed in successive tubes allows obtaining high heat transfer in the other tubes, as in the first tube. While improving heat transfer, the most important problem is the increase in pressure drop. In this study, a numerical optimization was carried out in order to increase the heat transfer and reduce the pressure drop by using tubes of four different diameters placed in an in-line arrangement. Comparisons are made assuming that the heat transfer surface area is constant and the longitudinal and transversal distances between the tubes are the same. If the diameters of four tubes are placed successively where $D_1 = 5 \text{ mm}$, $D_2 = 15 \text{ mm}$, $D_3 = 6 \text{ mm}$, $D_4 = 14 \text{ mm}$, the heat transfer increases by 14.5% and the pressure drop increases by 377%.

Keywords: Tube bank, tubes in different diameters, heat transfer, pressure drop, optimization

ToCite: KURU, M. N., ERDİNÇ, M. T., KARASU, İ., ÜNAL, Ş. (2023). BORU DEMETİ ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE FARKLI BORU ÇAPI KULLANIMININ AKIŞ VE ISI TRANSFERİNİ İYİLEŞTİRMEYE ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 625-636.

GİRİŞ

Boru demeti ısı değiştiricileri endüstride ısıtma, soğutma, iklimlendirme gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Etkin bir tasarım için boru demetinin ağırlığının azaltılması, hacminin küçültülmesi ve maliyetinin düşürülmesi çok önemlidir. Bu nedenle, boru demetlerinde dairesel ve dairesel olmayan (kam şekilli, elmas dilimli, eliptik vb.) boru geometrileri çalışılmaya devam etmektedir. Ayrıca, boru demetlerinde girdap üreticileri, farklı tipteki kanatlar (eksenel, düz, dalgalı, oluklu) gibi birçok yöntem araştırmacılar tarafından ısı veriminin artırılması için kullanılmaktadır.

Literatürde, dairesel geometriye sahip boru demetlerinde en önemli ve kapsamlı sonuçlar Zukauskas (1972), Zukauskas ve Ulinskas (1985) tarafından bir çok boyutsuz sayının etkisine bağlı olarak, düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı dizilişler için verilmiştir. Buyruk (1999) dairesel geometri ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde ısı ve akış karakteristiklerini incelemiştir. Khan vd. (2006) karmaşık değişen teorisini kullanarak temel korunum denklemlerini analitik olarak çözmüşler, düzgün sıralı ve kaydırılmış sıralı boru demetleri için analitik bağıntılar sunmuşlardır.

Dairesel geometriler üretilmesi kolay olduğundan sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat akım şekline uygun hale getirilen geometrilerde (oval, eliptik, kanat, kama, elmas vb.) sürtünme direnci azaltılabilir, böylece boru demetinin ısı verimi artırılabilir. Boru demetlerinin ısı veriminin iyileştirilebilmesi için, akış karışması, girdap oluşumu ve sınır tabaka yenilenmesi kontrol edilmelidir. Bu nedenle, dairesel olmayan geometrilerin incelenmesi önem arz etmektedir. Bahaidarah vd. (2005) dairesel ve yassı geometriye sahip boru demetlerini ısı verim açısından incelemişlerdir ve yassı geometrinin daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Horvat ve Mavko (2006) silindirik ve kanat şekilli boru geometrisine sahip boru demetlerinde sürtünme katsayısı ve Stanton sayısını kullanarak sayısal çalışmalar yapmışlardır. Kanat şekilli boru demetlerinde, düşük Reynolds sayısında sürtünme katsayısı ve Stanton sayısının daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Ibrahim ve Gomaa (2009) eliptik geometriye sahip boru demetindeki akış karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Reynolds sayısı 5600 ile 40000 aralığında değişmektedir, eliptik geometrinin küçük-büyük eksen oranı 0,25, 0,33, 0,5 ve 1 olarak alınmıştır, hücum açısı ise 0 ile 150° arasında değişmektedir. Sonuç olarak, hücum açısının saat yönünde 90° döndürülmesi, ısı transferini kayda değer bir şekilde arttırmıştır. Sabit kütleli debide, en iyi ısı verim hücum açısının 0° olduğu durumda, en düşük ısı verim ise hücum açısının 90° olması durumunda elde edilmiştir.

Lavasani vd. (2014) kama şekilli boruların kullanıldığı ve düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Burada iki farklı boyutsuz boyuna aralık oranı $s_L^* = 1,5$ ve $s_L^* = 2$ ve sabit boyutsuz enine aralık oranı $s_T^* = 1,25$ için sonuçlar sunulmuştur. Reynolds sayısı eşdeğer çap kullanılarak tanımlanmış ve 27000 ile 42500 aralığında değişmektedir. Birinci ve ikinci sütündeki boruların sırasıyla maksimum ve minimum sürüklenme katsayılarına sahip olduğunu bulmuşlardır. Sonuç olarak, kam şekilli boruların dairesel boruya göre ısı-hidrolik verimi yaklaşık olarak 6 kat arttırdığını belirtmişlerdir. Bayat vd. (2014) kaydırılmış sıralı diziliş ve kam şekilli boru geometrisine sahip boru demetlerinin ısı-hidrolik verimini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, kama şekilli boruların dairesel borulara göre yaklaşık %92-93 daha az basınç düşümüne neden olduğu sonucuna varılmıştır. Mangrulkar vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, kam şekilli boruya sahip boru demetlerinin dairesel boru demetlerine göre daha verimli olduğu ve üretim aşamasındaki zorluklardan dolayı, Reynolds sayısının 30000'den küçük olması gerektiği belirtilmiştir.

Sayed Ahmed vd. (2014), kanat şekilli boru geometrisine sahip boru demetlerinin ısı transferi karakteristiklerini ve etkinliğini, kaydırılmış sıralı diziliş için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada kanat şekilli borular içerisinden $Re = 500$ olacak şekilde su geçirilmiştir. Hava tarafında ise Reynolds sayısı 1800 ve 9700 aralığında değiştirilmiştir. Hücum açısı 0° ile 330° arasındadır. En iyi ısı verim ve etkinlik değerleri, hücum açısı ve Reynolds sayısının en düşük olduğu durum için elde edilmiştir. Çalışmada, kanat şekilli boruların etkinliğinin, eliptik ve dairesel şekilli borulara göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Boru demetinde farklı boru profillerinin aynı anda kullanıldığı çalışmalar son zamanlarda artmıştır. Abolfathi vd. (2021) boru demetlerinde, kam şekilli ve silindirik boruların karışık olarak kullanılmasının boru demetinin ısı verimine etkisini incelemişlerdir.

Boru demetinin veriminin artırılması yanında, en düşük basınç kaybı, en az ısı transfer yüzey alanı, en küçük hacim gibi parametrelerin de istenmesi sebebiyle, boru demetlerinin optimizasyonu araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Enerji maliyetlerinin zamanla artması nedeniyle, ısı değiştiricilerindeki ısı transferinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Böylece daha düşük enerji maliyeti ve daha hafif tasarımlar elde edilebilecektir. Jayavel ve Tiwari (2008) etkin bir ısı değiştiricisi tasarımında, ısı transferinin artırılması ve basınç düşümünün azaltılmasının amaçlanmasının

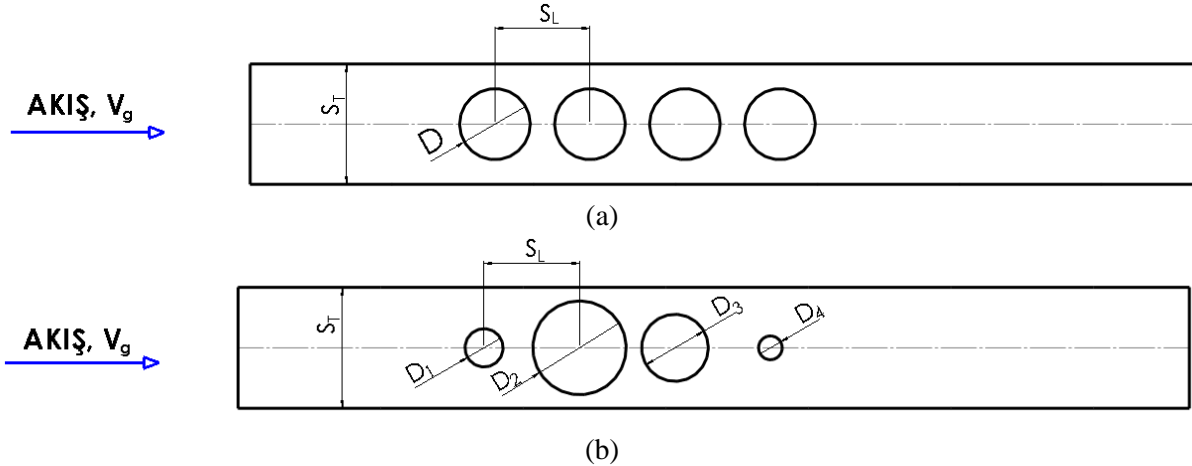
gerektiğini belirtmişlerdir. Yılmaz ve Yılmaz (2016) ve Yılmaz vd. (2017), verilen basınç düşümü ve boru demetinin etkinliği için maksimum ısı transferi ve minimum hacmin elde edildiği optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Kuru vd. (2020), dairesel geometriye sahip boru demetlerinin, kaydırılmış sıralı diziliş için, aksel kanatlı ve kanatsız durumunda, ısı ve akışın sayısal optimizasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, verilen kütleli debi, müsaade edilebilir basınç düşümü ve boru demeti etkinliği için, boru demetinden maksimum ısı transferi ve minimum hacim elde edilmiştir. Sonuçta, aksel kanatların ısı transferini iyileştirdiği ve boru demeti hacminin aksel kanat kullanılarak %42,7 küçültülebildiği sonucuna varılmıştır. Erdinc vd. (2021) elmas dilimli geometrilerin sayısal optimizasyonunu yaparak dairesel geometriyle karşılaştırmışlardır.

Ardışık olarak yerleştirilen silindirik boruların kullanıldığı düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde, borular arasındaki girdap bölgesinin ısı transferini azalttığı literatürdeki çalışmalardan görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada farklı çapta dairesel borular kullanarak, girdap bölgesinde ısı transferinin ve basınç düşümünün sayısal optimizasyon çalışmaları neticesinde iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Isı ve akış analizleri ANSYS programı yardımıyla, optimizasyon çalışması ise ModeFRONTIER programı ile yapılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Parametrik Model

Boruların eşit ve farklı çaptaki şematik gösterimleri düzgün sıralı dizilişe sahip boru demeti için Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada ısı transferi yüzey alanının, enine ve boyuna uzunlukların sabit ($s_L = s_T = 19.05 \text{ mm}$) olduğu kabul edilmiştir. Eşit çap durumu için $D = 10 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.



Şekil 1. (a) Eşit (b) farklı çaptaki borudan oluşan düzgün sıralı dizilişe sahip boru demeti

Korunum Denklemleri

Sayısal çalışmalarda akış ve ısı transferinin iki boyutlu, sürekli, sıkıştırılamaz ve türbülanslı olduğu varsayılmıştır. Yapılan çalışmalarda RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Korunum denklemleri ve türbülans denklemleri aşağıda Eş. (1), (2) ve (3)'te görüldüğü gibi verilmektedir (Ansys, 2021, Erdinc, 2023).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu}{Pr_t} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

Türbülans kinetik enerjisi (k) ve enerji yayılım oranı (ϵ) diferansiyel denklemleri kararlı durumda Eş. (4) ve Eş. (5)'te görüldüğü gibi yazılır.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

k ve ε 'un ters efektif Prandtl sayısı α_k ve α_ε olarak gösterilmektedir. G_k , ise türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu göstermektedir ve Eş. (6)'da görüldüğü gibi ifade edilebilir.

$$G_k = -\mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] \quad (6)$$

μ_{eff} , efektif türbülans vizkozitedir ve Eş. (7)'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Eş. (7)'deki μ_t değeri ise Eş. (8) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Burada, $C_\mu = 0,0845$ olarak alınmıştır (Ansys, 2021). RNG teorisi kullanılarak türetilen $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ sabitleri ise 1,42 ve 1,68'dir.

Veri Analizi

Reynolds sayısı, Re akış kesitinin minimum olduğu alandaki maksimum ortalama hıza V_{max} bağlı olarak Eş. (9)'da görüldüğü gibi tanımlanır.

$$Re = \frac{V_{max} D}{\nu} \quad (9)$$

Maksimum ortalama hız Eş. (10) ile hesaplanır.

$$V_{max} = \frac{s_T}{s_T - D} V_g \quad (10)$$

Ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}) ise aşağıdaki Eş. (11) kullanılarak hesaplanır.

$$\overline{Nu} = \frac{q'' D}{k_{hava} \Delta T_{LM}} \quad (11)$$

Burada, q'' boru yüzeyindeki ısı akısı [W/m^2], k_{hava} havanın ısı iletim katsayısı [$W/m.K$], ΔT_{LM} logaritmik sıcaklık farkıdır [K]. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı için aşağıdaki Eş. (12) yazılabilir.

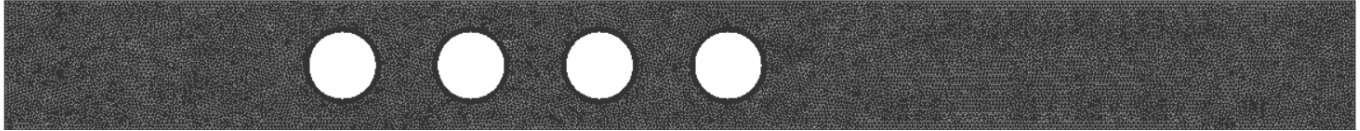
$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{duvar} - T_{giriş}) - (T_{duvar} - T_{çıkış})}{\ln \frac{T_{duvar} - T_{giriş}}{T_{duvar} - T_{çıkış}}} \quad (12)$$

Burada, T_{duvar} [K] boru yüzey sıcaklığını, $T_{giriş}$ [K] giriş sıcaklığını ve $T_{çıkış}$ [K] çıkış sıcaklığı ifade etmektedir.

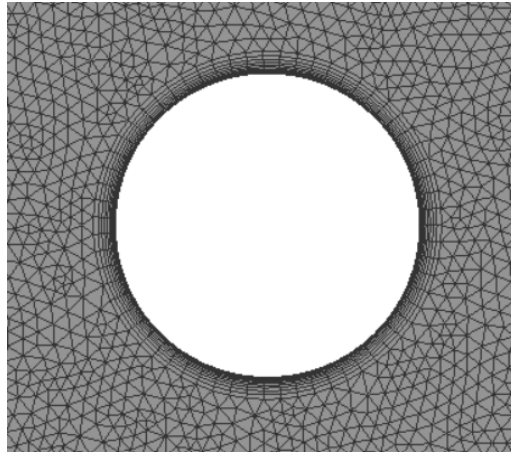
Sayısal Yöntem ve Optimizasyon

Momentum ve türbülanslı kinetik enerjinin ana denklemleri, ikinci mertebeden ayrıklaştırma şeması kullanılarak çözülmüştür. Hız-basınç bağlantısı, COUPLED algoritması ile yapılmıştır. Yakınsama kriteri enerji denklemleri için

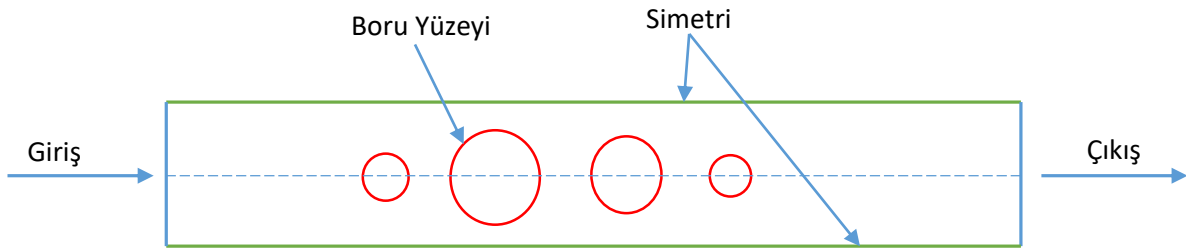
10^{-8} , akış denklemleri için ise 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Şekil 2a'da gösterilen ağ yapısı için üçgenel elemanlar kullanılmıştır. Duvarlara komşu ağ noktaları dörtgenel elemanlar kullanılarak sıklaştırılmıştır (Şekil 2b), böylece y^+ değerleri 1 ile 5 arasında değişmektedir. Akışkan olarak havanın kullanıldığı çalışmalarda havanın sabit termofiziksel özelliklere sahip olduğu kabul edilmiştir. Farklı çaptaki borudan oluşan düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetine ait sınır yüzeyleri Şekil 2c'de gösterilmektedir. Burada, sınır koşulu olarak, girişte hız girişi, çıkışta basınç çıkışı, yan yüzeylerde simetri, boru yüzeyi için sabit duvar sıcaklığı kullanılmıştır. Doğrulama çalışmasında kullanılan model için ağdan bağımsızlık çalışması $Re = 1000$ için yapılmıştır ve dört farklı eleman sayısı için sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de 3 numaralı ağ yapısı ile 4 numaralı ağ yapısının arasındaki fark Nu ve f açısından sırasıyla 0.2% ve 0.3%'dir. Hesaplama zamanından kazanmak için 3 numaralı ağ yapısı optimizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.



(a)



(b)



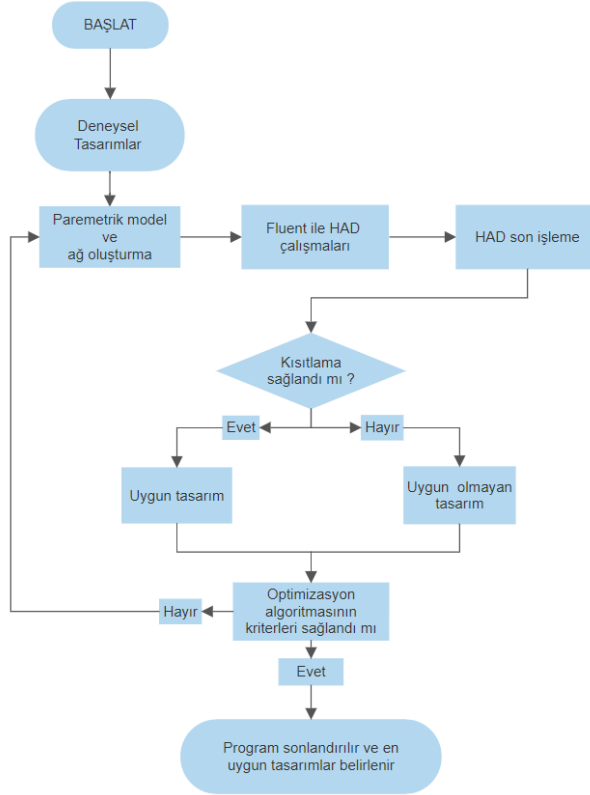
(c)

Şekil 2. Düzgün sıralı dizilişe sahip boru demeti için (a) ağ yapısı (b) tek bir boru etrafındaki ağ yapısı (c) sınır koşulları

Tablo 1. Farklı eleman sayıları için $Re = 1000$ 'de ağdan bağımsızlık çalışması

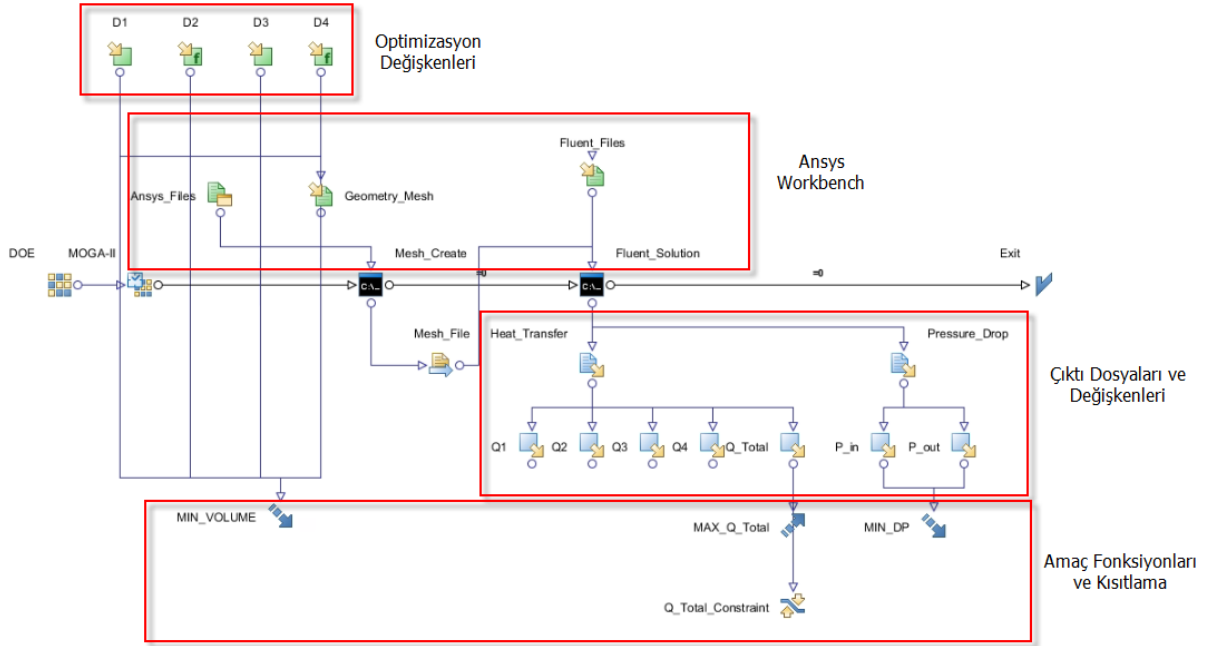
Eleman Sayısı	\overline{Nu}	f
9664	13,06	0,351
21202	14,05	0,362
30604	15,20	0,380
102308	15,23	0,381

Sayısal optimizasyon çalışmalarında çok amaçlı genetik algoritma kullanılmıştır. Şekil 3'te bu çalışmada oluşturulan optimizasyon iş akışına ait akış şeması görülmektedir. İlk olarak, başlangıç tasarımları belirlenir ve en uygun tasarımlar bu değerlerin etrafında aranır. Kullanılacak optimizasyon algoritması, optimizasyon değişkenleri, amaç fonksiyonları, kısıtlamalar, girdi ve çıktı değişkenleri (alt ve üst sınırları ile birlikte) belirtilir. Optimizasyon değişkenlerinin her bir farklı değeri için parametrik model güncellenip çözdürülerek, çıktı değerleri amaç ve kısıtlamalarda kullanılır. Böylece, optimizasyon algoritması maksimum yineleme sayısına kadar en uygun tasarımı bulmaya çalışır.



Şekil 3. Optimizasyon iş akış şeması

Şekil 4'te ModeFRONTIER ile kurulan optimizasyon iş akışı ile parametrik model ve optimizasyon algoritması bütünleştirilir ve optimum boru demeti tasarımları elde edilir. Optimizasyon algoritmasında, optimum tasarımları bulmaya başlamadan önce, deneylerin tasarımı (DOE) olarak tanımlanan başlangıç tasarımları belirtilmelidir. Bu deneylerin tasarımı, optimizasyon problemi için başlangıç noktasını oluşturur. İlk olarak, optimizasyon probleminin girdi değişkenleri tanımlanır ve buna göre daha önceden ANSYS ortamında oluşturulan parametrik model kullanılarak tasarım gerçekleştirilir. Bu tasarım için ANSYS Fluent programı kullanılarak sonuçlar elde edilir ve çıktı dosyalarına sonuçlar yazılır. Eğer kısıtlama sağlandı ise, bu tasarım uygun tasarım olarak kaydedilir, sağlanmadıysa uygun olmayan tasarım olarak kaydedilir. Optimizasyon algoritması, yakınsama kriteri sağlanana kadar devam eder. Böylece bütün tasarımlar elde edilir. ModeFRONTIER programı, optimum tasarımları bu uygun tasarımlardan seçer ve bunları Pareto tasarımlar olarak listeler. Pareto tasarımlar, optimum tasarımları göstermektedir. Pareto tasarımlarda, bir amaç fonksiyonu daha iyi olurken diğeri kötüleşir. Tasarımcı, kendi amacına uygun olarak bu Pareto tasarımlardan birine optimum tasarım olarak karar verebilir.



Şekil 4. Boru demeti optimizasyon çalışmaları için ModeFRONTIER'da kurulan iş akış şeması

Doğrulama

Sayısal çalışmaların doğruluğunun ispatlanması gerekir. Bunun için, yapılan hesaplamalar deneysel veriler/analitik sonuçlar ile karşılaştırılmalıdır. Zukauskas (1972) tarafından boru demetleri üzerindeki çapraz akış detaylı olarak incelenmiş, geniş bir Reynolds sayısı ve Prandtl sayısı aralığında deneysel ilişkiler ve grafikler sunulmuştur. Sunulan veriler, literatürde boru demetini inceleyen araştırmacıların doğrulama çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sayısal çalışmanın doğrulamasında da, Zukauskas (1972) tarafından düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetleri için sunulan deneysel veriler kullanılmıştır. Ortalama Nusselt sayıları (\overline{Nu}) ve sürtünme faktörü (f), dört farklı Reynolds sayısı için (1000, 2000, 3000, 4000) elde edilmiştir. Doğrulama çalışmasında, akışkan olarak hava kullanılmış ve havanın termofiziksel özellikleri Prandtl sayısının 0,707 olduğu değerde seçilmiştir. Reynolds sayısının $10^3 - 2 \times 10^5$ arasında olduğu durumda, Zukauskas (1972) tarafından sunulan bağıntı Eş. (13)'te verilmiştir.

$$\overline{Nu} = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (13)$$

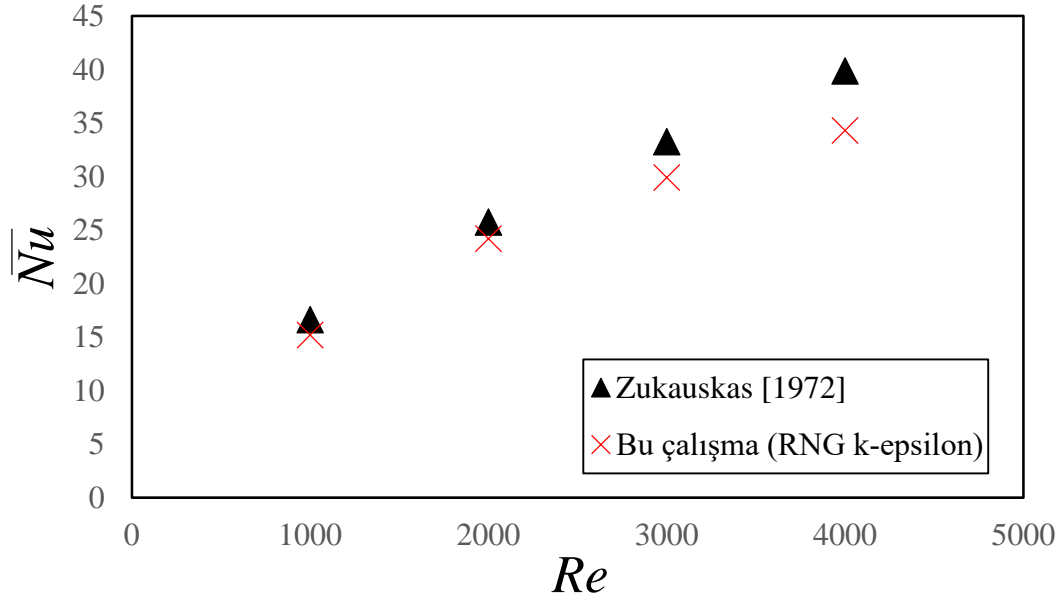
Bu denklemde akış boyunca olan boru sayısının (N_L) 16'dan fazla olduğu kabul edilmiştir. Fakat bizim çalışmamızda, boru sayısının dört olması dolayısıyla, yine Zukauskas (1972) tarafından sunulan düzeltme katsayısı olarak 0,9 değeri kullanılmıştır. Sonuç olarak, ısı transferinin göstergesi olan ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırmasında Eş. (14) kullanılmıştır.

$$\overline{Nu} = 0.9 \cdot 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (14)$$

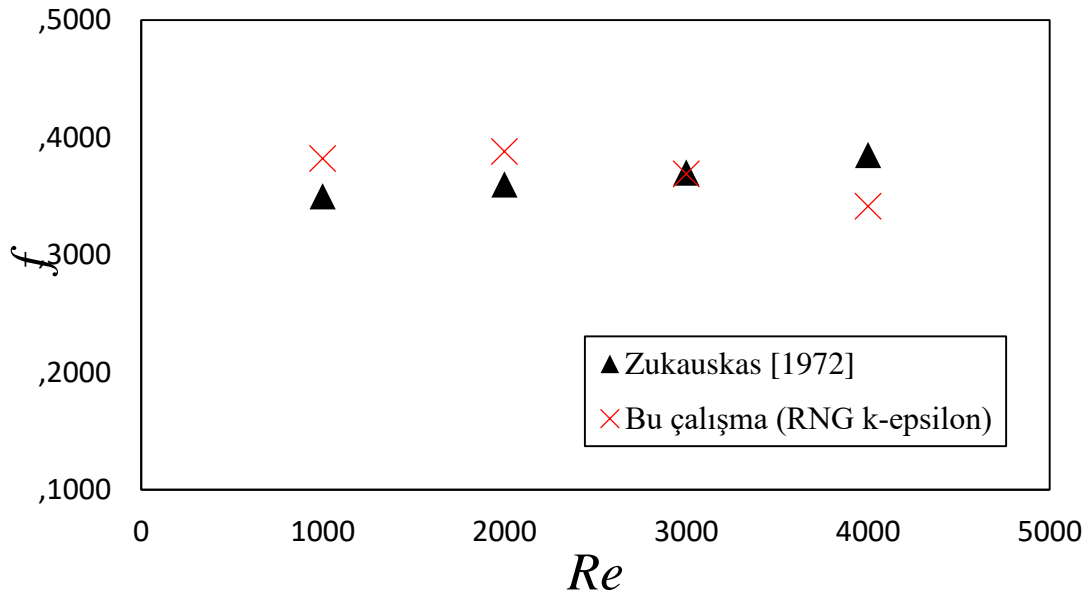
Benzer şekilde, sürtünme faktörünün doğrulanmasında da yine Zukauskas (1972) tarafından verilen aşağıdaki Eş. (15) kullanılmıştır.

$$\Delta P = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f \quad (15)$$

Buradaki, düzeltme katsayısı χ ve sürtünme faktörü f , Zukauskas (1972) tarafından sunulan grafiklerden elde edilmiştir. Ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}) Reynolds sayısına göre değişimi Şekil 5'te, sürtünme faktörünün (f) Reynolds sayısı ile değişimi ise Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Ortalama Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi



Şekil 6. Sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

DeneySEL veriler ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış olup, elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilere göre farkları Tablo 2’de sunulmuştur. Zukauskas (1972) tarafından verilen deneysel sonuçların $\pm\%15$ belirsizliği bulunmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında, RNG k- ϵ modelinin sonuçlarının kabul edilebilir olduğu kanaatine varılmış olup bundan sonraki çalışmalarda bu modelin doğru sonuçlar vereceği kabul edilmiştir.

Tablo 2. Doğrulama çalışmasının deneysel sonuçlara göre farkı

Re	Nu	f
	Fark (%)	
1000	-8,70	9,15
2000	-6,08	7,84
3000	-10,12	-0,23
4000	-13,95	-11,30

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon sürecindeki amaç, boru demetinde sabit ısı transferi yüzeyi kabul ederek, ısı transferini arttırmak ve basınç düşümünü azaltmaktır. Optimizasyon probleminde dört adet boru kullanılmıştır, bu boruların çapları optimizasyon değişkeni olarak atanmıştır. Toplam ısı transferi yüzey alanı sabit olacak şekilde boru çapları değişmektedir. Örneğin $D_1 = 5 \text{ mm}$ iken $D_2 = 15 \text{ mm}$ olmaktadır, benzer şekilde $D_3 = 8 \text{ mm}$ iken $D_4 = 12 \text{ mm}$ olmaktadır. Ayrıca, dört borunun da çapının $D = 10 \text{ mm}$ olduğu durumda elde edilen ısı transferi en az olacak şekilde kısıtlama eklenmiştir. Böylece, farklı çap kullanımı durumunda elde edilen ısı transferinin aynı çapa göre artıp artmayacağını belirlemek amaçlanmıştır. Çok amaçlı optimizasyon problemi Tablo 3’de görüldüğü gibi formüle edilmiştir.

Tablo 3. Çok amaçlı optimizasyon tanımlaması

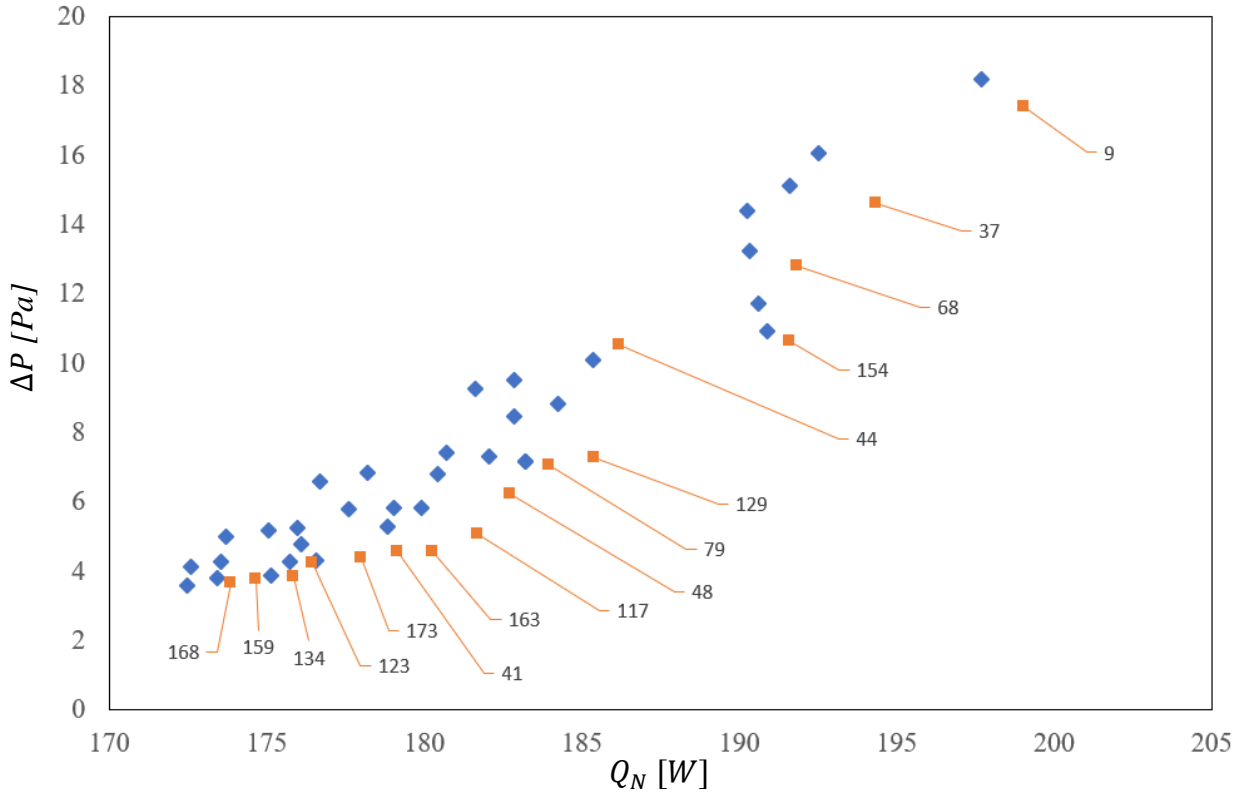
Amaç Fonksiyonu	\dot{Q}_N arttırma, ΔP_N azaltma
Kısıtlama	$\dot{Q}_{N, \text{eşit çap}} = 172.5 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \leq \dot{Q}_N$
Sınırları ve adımları ile optimizasyon değişkenleri	$5 \text{ mm} \leq D_1 \leq 15 \text{ mm}$, adım = 1 mm $5 \text{ mm} \leq D_2 \leq 15 \text{ mm}$, adım = 1 mm $5 \text{ mm} \leq D_3 \leq 15 \text{ mm}$, adım = 1 mm $5 \text{ mm} \leq D_4 \leq 15 \text{ mm}$, adım = 1 mm
Veriler	$V_g = 1.25 \text{ kg/s}$, $T_g = 298.15 \text{ K}$, $T_{\text{duvar}} = 328.15 \text{ K}$

Bu çalışmada hava için kullanılan termo fiziksel özellikler, $T = 300 \text{ K}$ ’de hesap edilmiştir ve Tablo 4’te listelenmiştir.

Tablo 4. Hava için termo fiziksel özellikler

$\rho = 1,1614 \text{ kg / m}^3$
$c_p = 1,007 \text{ kJ/(kg K)}$
$\mu = 1,846 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
$k_{\text{hava}} = 0,0263 \text{ W/(m K)}$
$\text{Pr} = 0,707$

Optimizasyon iş akışı rastgele oluşturulan 11 deneysel tasarım ile çalıştırılmıştır. Çok Amaçlı Genetik Algoritmasının optimizasyon algoritması olarak kullanıldığı bu çalışmada, toplam olarak 49 tasarım elde edilmiştir. Elde edilen tasarımlardan 16 tanesi Pareto tasarım olup, her iki amaç fonksiyonunu da sağlayan en uygun tasarımlardır. Şekil 7’de bütün tasarımlar amaç fonksiyonları cinsinden gösterilmiştir. Pareto tasarımlara ait farklı çap değerleri ve eşit çap durumundaki ($D = 10 \text{ mm}$) \dot{Q}_N ve ΔP değerleri Tablo 5’te verilmektedir. Ayrıca, Pareto tasarımların eşit çap durumuna göre \dot{Q}_N ve ΔP değişimleri Tablo 5’te yüzdesel olarak belirtilmiştir.



Şekil 7. Optimizasyon probleminde elde edilen tüm tasarımlar için toplam ısı transferinin basınç düşümü ile değişimi (Numaralı tasarımlar Pareto tasarımları göstermektedir.)

Tablo 5. Optimizasyon çalışmasında elde edilen Pareto tasarımlar

Pareto No	D_1 [mm]	D_2 [mm]	D_3 [mm]	D_4 [mm]	Q_N [W]	Q_N değişimi (%)	ΔP [Pa]	ΔP değişimi (%)
Eşit Çap	10	10	10	10	172,50	-	3,642	-
168	10	10	11	9	173,83	0,77	3,64	-0,06
159	9	11	11	9	174,70	1,28	3,78	3,79
134	11	9	11	9	175,84	1,94	3,85	5,71
123	8	12	11	9	176,46	2,30	4,24	16,42
173	11	9	12	8	177,94	3,15	4,36	19,71
41	12	8	10	10	179,16	3,86	4,53	24,38
163	12	8	11	9	180,24	4,49	4,54	24,66
117	12	8	12	8	181,68	5,32	5,03	38,11
48	13	7	9	11	182,73	5,93	6,22	70,78
79	6	14	11	9	183,95	6,64	6,98	91,65
129	6	14	12	8	185,40	7,48	7,29	100,16
44	6	14	7	13	186,16	7,92	10,50	188,30
154	5	15	11	9	191,55	11,04	10,68	193,24
68	5	15	8	12	191,80	11,19	12,78	250,91
37	5	15	7	13	194,30	12,64	14,57	300,05
9	5	15	6	14	199,02	15,37	17,37	376,94

Şekil 7'den görüldüğü gibi toplam ısı transferi arttıkça basınç düşümü de artmaktadır. Tablo 5'teki herhangi bir tasarım optimum tasarım olarak seçilebilir. Bu çalışmada, ısı transferinin ve basınç düşümünün en düşük olduğu Tablo 5'teki 168 no'lu tasarım en uygun tasarım olarak seçilmiştir. Bu durum, tüm boruların eşit çapta olduğu $D = 10$ mm ile karşılaştırıldığında ısı transferinde %0.77 artış ve basınç düşümünde %0.06 azalma göstermiştir. Her ne kadar çok düşük fark olsa da bu durum, eşit çap kullanılmamasının ısı transferi ve basınç düşümüne olumlu katkı yaptığının göstergesidir. İlerleyen çalışmalarda farklı geometrik profillerin kullanılmasıyla ısı transferi ve basınç düşümünde iyileşmenin artacağı öngörülmektedir. Ayrıca eşit hacimde ısı transferi yüzeylerinin sabit kaldığı düşünülürse, 9 numaralı tasarımın maksimum ısı transferi değerini verdiği Şekil 7'den görülmektedir. Fakat bu

durumda basınç düşümü de en uygun tasarıma göre %377 artış göstermiştir. Sonuç olarak ısı transferi verilen sabit bir hacimde, ısı transferi yüzey alanının sabit kabul edildiği durum için %14.5 arttırılabilir. Bu değer, Tablo 4'teki, 168 ve 9 numaralı tasarımların karşılaştırılması ile elde edilmiştir. Eşit çap kullanımı durumuna göre artış ise %15.37 olmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, düzgün sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde, ardışık olarak yerleştirilen 4 farklı çaptaki boru kullanılarak ısı transferinin ve basınç düşümünün sayısal optimizasyon çalışmaları neticesinde iyileştirilmesi incelenmiştir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Toplam ısı transferinin artması ile basınç düşümünün de beklenildiği gibi arttığı görülmüştür.
- En uygun tasarım olarak seçilen tasarımda birinci ve ikinci boru çapı aynı olurken ($D_1 = D_2 = 10 \text{ mm}$), üçüncü ve dördüncü boru çapları sırasıyla $D_3 = 11 \text{ mm}$ ve $D_4 = 9 \text{ mm}$ olmaktadır. Bu durumda ısı transferinde çok az artış olurken (%0.77), basınç düşümü hemen hemen aynı kalmaktadır.
- Maksimum ısı transferi değeri 199,02 W olarak $D_1 = 5 \text{ mm}$, $D_2 = 15 \text{ mm}$, $D_3 = 6 \text{ mm}$, $D_4 = 14 \text{ mm}$ olduğu durumda elde edilmiştir. Bu durumda ısı transferi 173.83 W'dan 199.02 W'a çıkarılmıştır. Basınç düşümü ise 3.64 Pa değerinden 17.37 Pa değerine artmıştır. Bu durumda ısı transferi %14.5 arttırılırken, basınç düşümü de %377 oranında artmıştır.

SEMBOLLER

c_p	özgül ısı, $kJ/kg.K$
D	boru çapı, mm
f	sürtünme katsayısı
k_{hava}	havanın ısı iletim katsayısı, $W/m.K$
N_L	boyuna doğrultudaki boru sayısı
\overline{Nu}	ortalama Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
\dot{Q}_N	ısı transferi, W
q''	boru yüzeyindeki ısı akısı, W/m^2
s_L	enine uzunluk, mm
s_T	boyuna uzunluk, mm
T_{duvar}	boru yüzey sıcaklığı, K
T_g	giriş sıcaklığı, K
$T_{çıkış}$	çıkış sıcaklığı, K
Re	Reynolds sayısı
V_{max}	maksimum ortalama hız, m/s
V_g	ortalama giriş hızı, m/s
ρ	yoğunluk, kg/m^3
χ	düzeltilme katsayısı
ν	kinematik vizkozite, $N.s / m^2$
ΔP	basınç düşümü, Pa
ΔT_{LM}	logaritmik ortalama sıcaklık farkı, K

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 Yurtiçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından 121C377 proje numarası ile ve Tarsus Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından OSB.21.001 proje numarası ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

Abolfathi, S., Mirabdollah Lavasani, A., Mobedi, P., & Salehi Afshar, K. (2021). Experimental study on flow around a tube in mixed tube bundles comprising cam-shaped and circular cylinders in in-line arrangement. *International Journal of Thermal Sciences*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106812>

ANSYS Fluent User's Guide. (2019). ANSYS Inc. (No. 2019).

Bahaidarah, H. M. S., Anand, N. K., & Chen, H. C. (2005). A numerical study of fluid flow and heat transfer over a

- bank of flat tubes. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 48(4), 359–385. <https://doi.org/10.1080/10407780590957134>
- Bayat, H., Lavasani, A. M., & Maarefdoost, T. (2014). Experimental study of thermal-hydraulic performance of cam-shaped tube bundle with staggered arrangement. *Energy Conversion and Management*, 85, 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.009>
- Buyruk, E. (1999). Heat transfer and flow structures around circular cylinders in cross-flow. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 23(5), 299–315.
- Erdinc, M. T. (2023). Computational thermal-hydraulic analysis and geometric optimization of elliptic and circular wavy fin and tube heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 140, 106518. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106518>
- Erdinc, M. T., Aktas, A. E., Kuru, M. N., Bilgili, M., & Aydin, O. (2021). An optimization study on thermo-hydraulic performance arrays of circular and diamond shaped cross-sections in periodic flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 129, 105706. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105706>
- Fluent, A. (2021). Ansys fluent theory guide. In ANSYS Inc., USA.
- Horvat, A., Leskovic, M., & Mavko, B. (2006). Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(5–6), 1027–1038. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030>
- Ibrahim, T. A., & Gomma, A. (2009). Thermal performance criteria of elliptic tube bundle in crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(11), 2148–2158. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.011>
- Jayavel, S., & Tiwari, S. (2008). Numerical study of flow and heat transfer for flow past inline circular tubes built in a rectangular channel in the presence of vortex generators. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 54(8), 777–797. <https://doi.org/10.1080/10407780802359120>
- Khan, W. A., Culham, J. R., & Yovanovich, M. M. (2006). Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(25–26), 4831–4838. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.042>
- Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Deshmukh, A. R., & Mandavgane, S. A. (2017). Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics from in-line cam shaped tube bank in crossflow. *Applied Thermal Engineering*, 110, 521–538. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.174>
- Mirabdollah Lavasani, A., Bayat, H., & Maarefdoost, T. (2014). Experimental study of convective heat transfer from in-line cam shaped tube bank in crossflow. *Applied Thermal Engineering*, 65(1–2), 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.078>
- Nasif Kuru, M., Erdinc, M. T., & Yilmaz, A. (2020). Optimization of Heat Transfer and Pressure Drop in Axially Finned Staggered Tube Banks. *Heat Transfer Engineering*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1785696>
- Sayed Ahmed, S. A. E., Ibrahiem, E. Z., Mesalhy, O. M., & Abdelatif, M. A. (2014). Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack. *Heat and Mass Transfer*, 50(8), 1091–1102. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1323-3>
- Yilmaz, A., Erdinç, M. T., & Yilmaz, T. (2017). Optimization of crossflow staggered tube banks for prescribed pressure loss and effectiveness. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 31(4), 878–888. <https://doi.org/10.2514/1.T5033>
- Yilmaz, A., & Yilmaz, T. (2016). Optimum Design of Cross-Flow In-Line Tube Banks at Constant Wall Temperature. *Heat Transfer Engineering*, 37(6), 523–534. <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1060753>
- Žukauskas, A. (1972). Heat Transfer from Tubes in Crossflow. *Advances in Heat Transfer*, 8(C), 93–160. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70038-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70038-8)
- Žukauskas, A., & Ulinskas, R. (1985). Efficiency parameters for heat transfer in tube banks. *Heat Transfer Engineering*, 6(1), 19–25. <https://doi.org/10.1080/01457638508939614>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.01.2023
Kabul Tarihi : 30.07.2023

Received Date : 31.01.2023
Accepted Date : 30.07.2023

KİRİŞ VE SAC PLAKA YAPILARDA YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MESNET KONUM OPTİMİZASYONLARI

SUPPORT LOCATION OPTIMIZATIONS IN BEAM AND SHEET PLATE STRUCTURES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Onur ÜNLÜ^{1*} (ORCID: 0000-0001-8154-8104)
Hakan DEMİR¹ (ORCID: 0000-0001-9819-2167)
Necmettin KAYA² (ORCID: 0000-0002-8297-0777)

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği A.B.D., Bursa, Türkiye
² Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Onur ÜNLÜ, onurunlu@uludag.edu.tr

ÖZET

Kiriş ve sac plaka yapılar otomotiv, havacılık, inşaat ve mimarlık gibi birçok alanda çeşitli amaçlarla kullanılırlar. Yük taşıyan kirişte eğilme ile deformasyon meydana gelir. Kirişlere benzer şekilde sac veya levha şeklindeki yapılarda kendi ağırlıkları ile veya yüzeylerine dik yönde kuvvet taşırken deforme olurlar. Bu tür yapılarda yükün emniyetle taşınmasının yanında, en az deformasyonun oluşması istenir. Bu çalışmada, giriş ve sac parçalarının kesiti, uzunluğu ve yükleme durumu sabit alınarak minimum deformasyonun elde edilmesi için mesnet noktalarının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Mesnet konumları parametre olarak alınmış ve geliştirilen yazılım ile mesnet noktalarının konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Parametrik sonlu elemanlar modelinden farklı mesnet konumlarına karşılık gelen deformasyon değerleri elde edilmiştir. Python kodu ile yapay sinir ağı ve optimizasyon kodu geliştirilmiş ve deformasyon değerleri verilen mesnet konumlarına göre hesaplanmıştır. Geliştirilen yöntem iki ve üç mesnetli girişler ile sac levha ve kaynakla birleştirilecek iki sac levha örnekleri üzerinde deneyerek optimizasyon sonuçları elde edilmiştir. Her bir giriş ve sac levha probleminde yayılı yük altında minimum deformasyon için mesnetlerin birbirlerine simetrik konumlandırılmaları gerektiği bulunmuştur. Optimum mesnet noktaları; iki mesnetli girişte kenarlardan %21.89, üç mesnetli girişte %13.57, sac levhada %19.13, kaynakla birleştirilecek iki sac levhada ise %14.42 uzaklıkta hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kiriş, optimizasyon, sac plaka, yapay sinir ağları

ABSTRACT

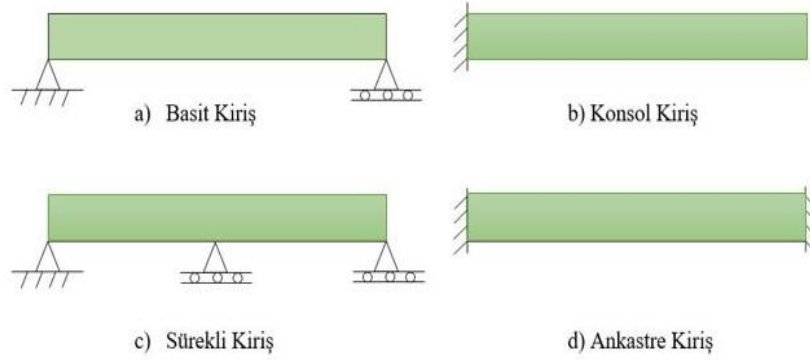
Beam and sheet plate structures are used for various purposes in many fields. Deformation occurs on a load carrying beam by bending. Similar to beams, sheet and plate structures deform with their own weights or by carrying forces perpendicular to their surfaces. In such structures, besides carrying load safely, minimum deformation is desired. In this study, to obtain minimum deformation, cross-section, length and loading conditions of beam and sheet structures were taken constant and support location optimization were performed. Locations of supports were parameterized, and deformation values correspond to different support locations were obtained from parametric finite element model. Artificial neural networks and optimization code were developed in Python and deformation values were predicted by given support locations. Method was used on two and three supported beams, sheet plate and welded two sheet plates examples and optimization results were obtained. It was found that supports should be positioned symmetrically for minimum deformation under distributed load in each beam and sheet plate problem. It was found that optimum support locations should be at a distance of 21.89%, 13.57%, 19.13% and 14.42% from the edges for two supported beam, three supported beam, sheet plate and welded two sheet plates examples respectively.

Keywords: Beam, optimization, sheet plate, artificial neural networks

ToCite: ÜNLÜ, O., DEMİR, H. & KAYA, N., (2023). KİRİŞ VE SAC PLAKA YAPILARDA YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MESNET KONUM OPTİMİZASYONLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 637-652.

GİRİŞ

Kiriş, kesiti uzunluğu yanında çok küçük olan ve eksenine dik doğrultudaki kuvvetleri taşıyan taşıyıcı sistemlere denir. Kiriş yapılar bina, köprü, otomobil ve havacılık endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla tasarımları son derece önemlidir ve emniyetli olacak şekilde tasarlanmaları gerekmektedir. Kiriş yapılar üzerinde uygulanan yükler altında kesme kuvveti ve eğilme momenti meydana gelir. Kirişler geometriye bağlı, denge koşullarına bağlı ve mesnet noktalarına bağlı olmak üzere gruplandırılabilir. Mesnet noktalarına göre kirişler Şekil 1 'de görüldüğü gibi çeşitlendirilebilir.



Şekil 1. Mesnet Noktalarına Göre Kiriş Çeşitleri

Cisimler eksenlerine dik uygulanan kuvvetler ve eğilme momentleri altında eğilme deformasyonuna uğrarlar. Yapıların bütünlüğü ve kararlılığının sağlanması amacıyla deformasyonlar, emniyetli değerler ile sınırlandırılmaktadır. Kirişler ve tasarım ve analiz aşamasında kiriş olarak kabul edilen elemanlarda deformasyonun minimum olması arzulanır. Yüksek deformasyonun yapı üzerinde olumsuz etkileri olabilmektedir. Örneğin bir güç iletim sisteminde dişlileri taşıyan milde deformasyonun yüksek olması istenmez. Eğer mil çok fazla deformasyona uğrarsa dişliler birbirleriyle eşleşemez ve darbe, ses, aşınma ve erken hasar meydana getirmektedir. Yapıdaki deformasyonun azaltılması amacıyla farklı malzeme kullanılması, eleman geometrisi ve tasarımda değişiklikler gerçekleştirilebilir (Darshan vd., 2013). Mesnet yerlerinin farklı pozisyonlarda konumlandırılması, yapı elemanının kuvvet ve moment taşıyan uzunluklarını değiştirerek deformasyon miktarını azaltabilen tasarımsal bir değişikliktir.

Sac ve levha şeklindeki parçalar otomotiv ve havacılık sektörlerinde en sık kullanılan bileşenlerdendir. Sac parçaların boyutsal düzgünlükleri nihai ürün kalitesini doğrudan etkilediğinden oldukça önem arz etmektedir (Li vd., 2006). Sac plakalar, işleme ve montaj aşamalarında oldukça kolay deforme olduklarından fikstürler kullanılarak yüksek deformasyona uğramaları engellenmeye çalışılır. Sac parçaların kaynakla birleştirilmesi bu parçaların montajında en sık rastlanan yöntemlerden birisidir. Yüksek kaliteli bir kaynak bağlantısı elde edilebilmesi için parçaların kaynak edilecek kenarlarındaki deformasyonun mümkün olduğunca az olması gerekmektedir. Bu nedenle mesnet pozisyonları arzulan montaj bağlantısının elde edilmesinde en önemli parametrelerden bir tanesidir (Aderiani vd., 2020). Özellikle sac parçaların kendi ağırlıkları altında en az deformasyon miktarı gösterecek pozisyonda kaynak edilmesi parçaların geometrik doğruluğunu arttıracaktır.

Literatürde parça mesnet mesafelerinin optimizasyonu ile maksimum deformasyonun minimizasyonu konulu çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Selvakumar vd. (2013), talaşlı imalatta bağlama ve kesme kuvvetleri neticesinde iş parçasında meydana gelen deformasyonu minimize edecek optimum fikstür yerleşimini araştırmıştır. İş parçası üzerindeki deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmış ve yapay sinir ağları temelli bir algoritma ile minimize edilmiştir. Jang vd. (2009) kiriş ve sac yapılarda optimum mesnet yerlerinin tespiti için gradyan temelli bir algoritma geliştirmiştir. Li ve Melkote (1999) talaşlı imalatta iş parçasında yerel elastik deformasyonlar nedeniyle meydana gelen konum hatalarını en aza indirmek adına en uygun fikstür düzenini doğrusal olmayan problem çözümü ile hesaplamıştır. Kaya (2006) talaşlı imalatta iş parçası için minimum deformasyonun elde edileceği optimum fikstür konumlarını tespit etmek amacıyla sonlu elemanlar modeli ile entegre genetik algoritmanın kullanıldığı bir yöntem geliştirmiştir. Prabhakaran vd. (2007) talaşlı işleme ile üretilecek iş parçasında optimum fikstür düzenini sonlu elemanlar modeli ile hesaplanan deformasyonlar üzerinde genetik algoritma ve karınca kolonisi algoritmaları ile incelemiştir. Karınca kolonisi algoritmasının daha tutarlı ve daha hızlı sonuç verdiğini belirtmiştir. Yang vd. (2017) sac metal parçalarda fikstür düzenini sonlu elemanlar modeli ile birlikte çalışan guguk kuşu arama algoritması ile incelemiştir. Sonuçlar genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu yöntemleri ile

bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve guguk kuşu arama algoritması ile daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Lu ve Zhao (2015) 4-2-1 yerleşimindeki sac metal parçada ilk üç fikstür, rijit model üzerinde genetik algoritma yardımı ile konumlandırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve yapay sinir ağları ile farklı fikstür düzenlerinde sac parçanın deformasyonları tahmin edilmiş ve genetik algoritma ile yapay sinir ağları optimize edilerek dördüncü fikstür konumu belirlenmiştir. Ahmad vd. (2018) birden fazla noktadan respot kaynakla birleştirilecek sac metal parçalarda minimum deformasyonu veren fikstür konumları sonlu elemanlar modeli ile entegre genetik algoritma ile hesaplanmıştır.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde genellikle talaşlı imalat ile işlenecek parçalar üzerinde fikstür konumlarının optimize edildiği çalışmaların gerçekleştirildiği gözlenmiştir. (Lu ve Zhao, 2015; Prabhakaran vd., 2007; Li ve Melkote, 1999). Yapısal elemanlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar konusunda bir eksiklik bulunmaktadır. Literatürde mesnet konum optimizasyonları için analitik çözümlerin mevcut olmadığı görülmüştür. Deformasyon değerlerinin analitik olarak elde edilmeleri güç olduğundan sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme tercih edilmektedir. Ayrıca deformasyon değerlerini mesnet konumlarına bağlı bir fonksiyon olarak ifade etmek zor olduğundan analitik yöntem ile optimizasyon yerine vekil modellerin kullanıldığı gözlemlenmiştir (Yang vd., 2017; Selvakumar vd., 2013). Çalışmaların çoğunda sonlu elemanlar modeli ile entegre çalışan optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak deney tasarımı yöntemi ile yapılan örneklemeler sonlu elemanlar modeline girdi olarak sağlanmıştır ve sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiştir. Vekil model olarak yapay sinir ağları algoritması kullanılmıştır. Kiriş ve sac yapılarında optimum mesnet noktalarının bulunmasında bir optimizasyon algoritması ile vekil model çıktılarının minimize edilmesi yeni bir yaklaşım olarak sunulmuştur. Literatüre katkı olarak bu çalışmada kiriş ve sac plaka benzeri yapıların taşıdıkları yükler altında en az deforme olmaları için bir yöntem sunulmuştur. En az deformasyonu ele alan çalışmalar oldukça sınırlıdır ve daha çok ürün hafifletme çalışmalarında tasarım parametreleri olarak ürün boyutları ele alınmaktadır (Alteyeb ve Jolgef, 2017). Bu çalışmada ise mesnet noktalarının konumları optimize edilmek istenen parametreler olarak seçilmiştir. Mesnet noktalarının tasarım parametresi olarak ele alındığı çalışmalar oldukça azdır. (Jang vd., 2009). Bu çalışmanın amacı kiriş ve sac parçalarda minimum deformasyonu elde edilmesi hedefi doğrultusunda optimum mesnet yerlerinin belirlenmesinde kullanılabilecek yeni bir yöntem ortaya koymaktır.

Bu çalışmada örnek olarak iki mesnetli kiriş, üç mesnetli kiriş, sac parça ve kaynakla birleştirilecek iki sac parçada minimum deformasyonun elde edilmesini sağlayan mesnet pozisyonları araştırılmıştır. Kiriş ve sac parçaların kesiti, uzunluğu ve uygulanacak kuvvetler belirlendikten sonra mesnet yerlerinin kenarlara olan uzaklıkları birer optimizasyon parametresi olarak alınıp problemler sonlu elemanlar yöntemi ile statik olarak çözülmüştür. Latin Hiperküp örnekleme metodu ile mesnet uzaklıkları için örnek değerler türetilmiş ve türetilen değerler parametrik sonlu elemanlar modelinde ilgili yerlere atanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonrasında her bir mesnet uzaklığı değerine karşılık gelen maksimum deformasyon değeri hesaplanarak mesnet mesafe ve sehim değerleri tablosu oluşturulmuştur. Mesnet uzaklıkları giriş, deformasyon değerleri ise hedef veri seçilerek yapay sinir ağlarına gönderilmiş ve öğrenme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğitilmiş model üzerinde bir optimizasyon algoritması kullanılarak yapay sinir ağları modellerinden elde edilen minimum deformasyon değerleri hesaplanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Mesnet Yerleri için Optimizasyon Problemi Algoritması

Optimizasyon, kısıtlara bağlı kalarak amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerlerini sağlayan tasarım parametrelerinin bulunması işlemidir (Arora, 2017). Yapısal optimizasyon yöntemleri, parça geometrik modeli üzerinde gerçekleştirilen optimizasyon yöntemleridir. Tanımlanan tasarım uzayında belirlenen kısıtları sağlamak şartı ile amaç fonksiyonu doğrultusunda optimizasyon gerçekleştirilir. Amaç fonksiyonu olarak ağırlık, kompians ve şekil değişimi gibi çıktılarının minimizasyonu veya maksimizasyonu hedeflenir. Topoloji, topografya, şekil ve boyut olmak üzere dört farklı yapısal optimizasyon yöntemi bulunmaktadır.

Standart bir optimizasyon problemi

$$\text{Amaç: } \min/\max f(x) \quad (1)$$

$$\text{Kısıtlar: } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, \dots, p \quad (3)$$

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, n, \quad x=(x_1, \dots, x_n) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. (1) x_i tasarım değişkenlerine bağlı amaç fonksiyonunu, (2) ve (3) eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarını, (4) ise tasarım değişkenleri için alt ve üst sınır değerlerini ifade etmektedir. Tanımlanan bu optimizasyon problemi uygun bir çözüm algoritması seçilerek çözülebilir (Arora, 2017).

Tanımlanan optimizasyon problemlerinin çözülüp optimum değerlerin bulunmasında kısıt içeren algoritmalar veya kısıt içermeyen algoritmalar kullanılabilir. Bu çalışmada Python'da yer alan Scipy kütüphanesi içerisinde bulunan SLSQP algoritması kullanılmıştır. Kısıt içeren algoritmalar, SLSQP algoritması doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan gradyan tabanlı bir yöntemdir. Sıralı en küçük kareler programlama anlamına gelmekte olup, farklı değişkenlerden oluşan fonksiyonların minimize edilmesinde, değişken sınır değerleri ile eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını kullanarak çözüme giden bir metottur (Scipy, 2022).

SLSQP algoritması, çözüme x_0 başlangıç parametreleri üzerinden iterasyon ile ulaşmaktadır. x_{k+1} değerinin hesaplanmasında (5) bağıntısını kullanır. Bağıntıda a_k adım büyüklüğünü, d_k ise arama yönünü ifade eder.

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (5)$$

Arama yönünün belirlenmesinde problemin Lagrange fonksiyonunun ikinci dereceden yaklaşımı ile formüle edilen bir ikinci dereceden programlama alt probleminden yararlanılır. (6) bağıntısında λ Lagrange sabiti, g_j ise kısıtları belirtir.

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j \quad (6)$$

İkinci dereceden programlama probleminin standart formu

$$\min = \frac{1}{2} d^t B^k d + \Delta f(x_{(k)}) d \quad (7)$$

$$\Delta_{g_j}(x_{(k)})d + g_j(x_{(k)}) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (8)$$

$$\Delta_{g_j}(x_{(k)})d + g_j(x_{(k)}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$B = \Delta_{xx}^2 L(x, \lambda) \quad (10)$$

(7), (8), (9) ve (10) bağıntıları ile tanımlanmaktadır.

Arama yönü, çoğu doğrusal olmayan fonksiyonlar için lokal optimum nokta yakınlarında adım büyüklüğü $\alpha=1$ için optimaldir. Ancak optimum noktadan uzak x_k değerleri için yakınsamanın garanti olması adına adım büyüklüğünün güncellenmesi gerekir. Bu sebeple (11) ile verilen penaltı fonksiyonu kısıt içeren optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır.

$$\varphi(x, \lambda; \rho) = f(x) - \sum_{j=1}^{m_e} (\lambda_j g_j(x) - \frac{1}{2} \rho_j g_j(x)^2) - \sum_{j=m_e+1}^m \begin{cases} \lambda_j g_j(x) - \frac{1}{2} \rho_j g_j(x)^2, & \text{eğer } g_j(x) \leq \frac{\lambda_j}{\rho_j} \\ \frac{1}{2} \frac{\lambda_j^2}{\rho_j}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (11)$$

Pratik uygulamalarda hesaplama verimliliği açısından B_k matrisini her iterasyonda hesaplamak yerine Hessian matrisini yaklaşık hesaplayan Quasi-Newton yöntemleri kullanılmaktadır. BFGS metodunda B_k (12), (13), (14) ve (15) formülleri ile hesaplanır.

$$B_{k+1} = B_k + \frac{q_k(q_k)^T}{(q_k)^T s_k} - \frac{B_k s_k (s_k)^T B_k}{(s_k)^T B_k s_k} \quad (12)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k = a^k d^k \quad (13)$$

$$q_k = \theta_k \eta_k + (1 - \theta_k) B_k s_k \quad (14)$$

$$\eta_k = \Delta_x L(x_{k+1}, \lambda_k) - \Delta_x L(x_k, \lambda_k) \quad (15)$$

B_{k+1} matrisinin pozitif tanımlı olmasını (16) şarta bağlı hesaplanan θ_k , sağlamaktadır.

$$\theta_k = \begin{cases} 1, & \text{eğer } (s_k)^t \eta_k \geq 0.2 (s_k)^t B_k s_k \\ \frac{0.8(s_k)^t B_k s_k}{(s_k)^t B_k s_k - (s_k)^t \eta_k}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (16)$$

En küçük kareler alt problemlerinin oluşturulması için (17) numaralı bağıntıda verilen kompozit-t yöntemi kullanılmaktadır.

$$B_k = L_k D_k (L_k)^T \quad (17)$$

$L = [l_1, \dots, l_n]$ olmak üzere birim köşegen elemanlı alt üçgen matris ve $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ olmak üzere köşegen matristir. Bu yöntem ile B_k yerine faktörler güncellenmektedir. Elde edilen en küçük kareler alt problemi (18), (19) ve (20) formülleri ile verilmektedir (Kraft, 1998).

$$\min \|D_k^{1/2} L_k^T d + D_k^{-1/2} L_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (18)$$

$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (19)$$

$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m_e \quad (20)$$

Yapay Sinir Ağları ile Modelleme

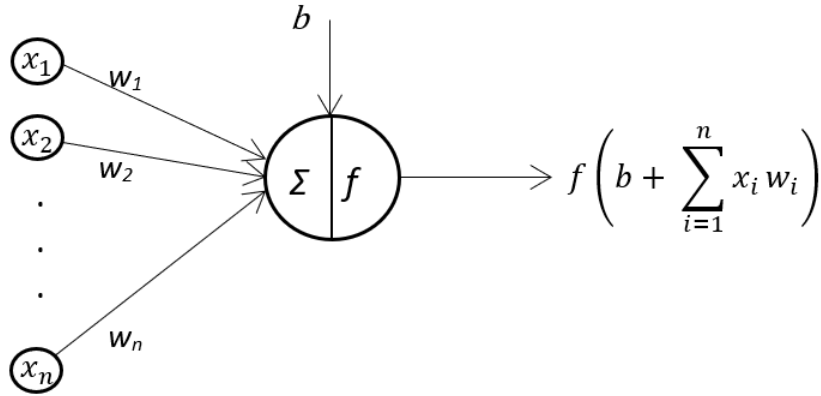
Optimizasyon, kısıtlara bağlı kalarak amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerlerini sağlayan tasarım parametrelerinin bulunması işlemidir (Arora, 2017) Optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu ve kısıt fonksiyonları tanımlı için karmaşık problemlerde polinom şeklinde tasarım değişkenlerine bağlı olarak fonksiyon üretmek zor ve bazen imkansızdır (Abbasi ve Mahlooji, 2012). Bu amaçla yanıt yüzeyi yöntemi veya vekil modeller kullanılır. Bu modeller yaklaşık modeller olup bunlara alternatif olarak iyi sonuçlar veren yapay sinir ağları son yıllarda önem kazanmaya başlamıştır. Doğrusal olmayan ve hesaplama maliyeti yüksek olan problemlerde yapay sinir ağları başarılı sonuçlar vermektedir (Simpson vd., 2001). Bu nedenle bu çalışmada yapay sinir ağları optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu yerine kullanılmıştır. Böylece her amaç fonksiyonu için sonlu elemanlar modeline ihtiyaç olmayacaktır, bu sayede hızlı çözümler elde edilebilmektedir.

Yapay sinir ağları beyin çalışma prensibi örnek alınarak geliştirilen bir yapay zekâ algoritmasıdır (Arslan, 2019). En sık kullanılan yapay sinir ağı algoritmalarından bir tanesi ileri beslemeli yapay sinir ağlardır. Ağ katmanlardan meydana gelmektedir ve ilk katman giriş katmanı, son katman çıktı katmanı ve aradaki diğer katmanlar ise gizli katmanlar olarak isimlendirilmektedir. Katmanlar nöronlardan oluşmaktadır ve her nöron bağlı olduğu diğer nöronlar ile matematiksel olarak ilişki içerisindedir. Şekil 2’de bir nörondan elde edilen çıktı değerinin kendisinden önce gelen nöronlar ile arasındaki bağlantısı gösterilmektedir. Doğrusal olmayan problemlerin çözülebilmesi, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve daha başarılı tahminler yapılabilmesi ve hata toleransı olması yapay sinir ağlarının avantajlarından. Başarılı bir şekilde eğitilen yapay sinir ağları ile giriş ve çıkış verileri üzerine oluşturulan model sayesinde, farklı bir veri için düşük hata oranlarında tahminler yapılabilmektedir (Arslan, 2019). Yapay sinir ağlarında eğitim sonucu türetilen fonksiyon üzerinde optimizasyon algoritmaları kullanılarak, fonksiyonların global minimum değerleri bulunabilmektedir.

Veri setinin eğitim ve test verileri olarak ayrılması yapay sinir ağlarında önemli bir konudur. Verilerin daha büyük bir kısmı eğitim verisi olarak ayrılmaktadır ve öğrenme bu veriler üzerinde gerçekleştirilmektedir. Test verileri üzerinde ise tahminler gerçekleştirilerek kurulan algoritmanın performansı ölçülmektedir. Yapay sinir ağları ile deney tasarımı örnekleme yöntemlerinden elde edilen bir veri seti üzerinde eğitim gerçekleştirildikten ve modelin doğruluğu kabul edildikten sonra optimizasyon algoritmaları kullanılarak yapay sinir ağlarında optimizasyon gerçekleştirilebilir. Eğitim işleminden sonra giriş ve çıkış verileri optimizasyon algoritmasına bağlanarak hangi giriş verisine karşılık minimum çıkış değerinin hesaplandığı bulunabilir.

Bu çalışmada yapay sinir ağı modelleri Keras kullanılarak oluşturulmuştur. Keras, Python dilinde yazılmış açık kaynaklı bir kütüphanedir. Basit, esnek ve güçlü bir yapıya sahip olması, hesaplamanın yüksek ölçeklenebilirliği, hem CPU hem de GPU üzerinde çalışabilmesi gibi nitelikleri nedeniyle oldukça popüler olduğundan bu çalışmada

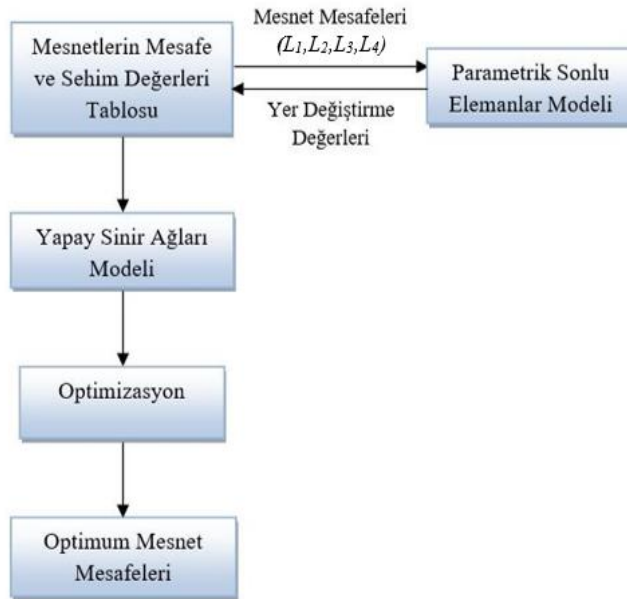
Keras kütüphanesi tercih edilmiştir. Her bir problem için ayrı ayrı çok katmanlı yapay sinir ağları oluşturulmuştur. Her bir problemde çıkış nöronu için aktivasyon fonksiyonu olarak regresyon problemlerinde tercih edilen linear fonksiyonu seçilmiştir. Optimizer olarak ise hesaplama verimliliği, düşük bellek isteri ve yüksek sayıda veri içeren problemlere uygunluğu nedenleriyle adam algoritması seçilmiştir. (Keras, 2022).



Şekil 2. Bir Nöronun Çıktı Elde Edilmesi

Yöntem

İki mesnetli kiriş, üç mesnetli kiriş, sac parça ve kaynakla birleştirilecek sac parça problemleri için dört adet parametrik sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Her bir sonlu elemanlar modelinde tasarım değişkeni mesnet pozisyonları olduğundan mesnet mesafeleri parametrik olarak ayarlanmıştır. Analiz türü statik olarak belirlenmiş, kiriş ve sac parçaların malzemesi yapı çeliği olarak kabul edilmiştir. Her bir problem için mesh yakınsama çalışması gerçekleştirilmiş ve en uygun eleman sayısı bulunarak model hazırlanmıştır.



Şekil 3. Python Kodu Akış Diyagramı

Parametrik mesnet mesafe değerleri, deney tasarımı yöntemlerinden Latin Hiperküp kullanılarak örneklendirilmiştir. Çok sayıda parametre ve yüksek sayıda seviye için uygun olduğundan bu yöntem tercih edilmiştir (Viana, 2015). Her bir problem için 200 adet örnek mesnet mesafe değerleri, geometriye uygun olarak türetilmiştir.

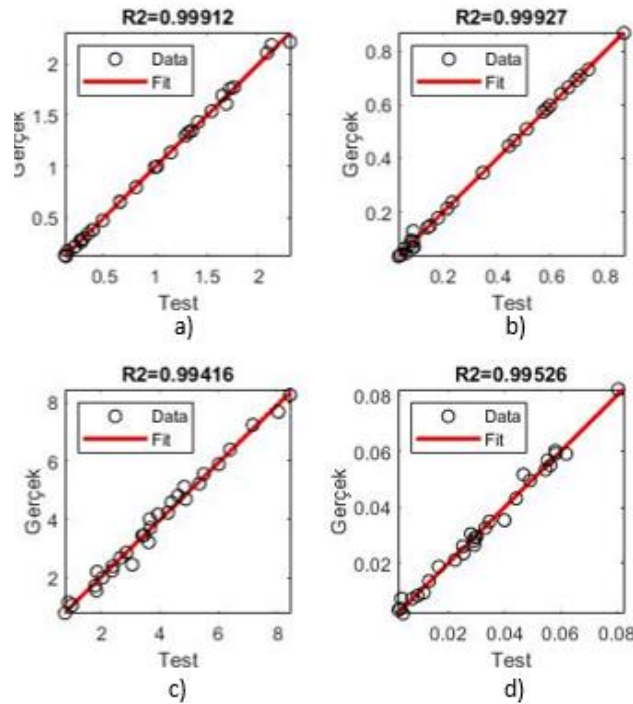
Bu çalışmada mesnet konumlarının optimizasyonu için Python dilinde bir program yazılmıştır. Bu programda, hazırlanan script dosyası ile Ansys yazılımında ilgili probleme ait sonlu elemanlar modelinin açılması, deney tasarımı ile örneklenen mesnet mesafe değerlerinin uygun parametrelere atanması, analizin gerçekleştirilmesi ve analiz sonucunda maksimum deformasyon değerlerinin hesaplanması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Python kodu komut

satırında çalıştırılarak sonlu elemanlar analizleri yığın modda koşuturulmuştur. Bu sayede yazılım arayüzüne girilmeden sonlu elemanlar modelinde değişiklikler yapılabilen ve analizler çok daha hızlı bir şekilde koşuturulabilmektedir. Python kodu iş akış şeması Şekil 3'te görülmektedir. Komut satırında çalıştırılan ilgili kod aşağıdaki gibidir.

```
wb_path = r"C:\... " #Ansys Workbench yazılımının dizindeki yeri
script = 'script.wbjn'
try:
    os.system('{} -B -R {}'.format(wb_path, script))
except Exception:
    print('ANSYS Workbench Başlatılmadı')
    sys.exit(0)
```

Python kodu ile koşuturulan analizler sonrası her bir problem için deney tasarımı ile örneklenen mesnet mesafe değerleri ve karşılık gelen deformasyonlar veri tablosu halinde elde edilmiştir.

Her bir kiriş ve sac parça problemi için ayrı ayrı ileri beslemeli yapay sinir ağı modelleri hazırlanmıştır. Deney tasarımı yöntemi ile türetilen mesnet mesafe değerleri yapay sinir ağlarına giriş verisi olarak gönderilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden her bir örnek mesnet mesafesi değerine karşılık elde edilen deformasyon verileri ise yapay sinir ağlarında hedef veri olarak belirlenmiştir. Giriş ve hedef verileri yapay sinir ağlarında öğrenme işlemi gerçekleştirilmeden önce eğitim ve test verilerine sırasıyla %80 ve %20 oranlarında ayrılmıştır (Lipovetsky, 2009). Yapay sinir ağları ile öğrenme sonucunda kurulan algoritmanın performansı test verileri üzerinde yapılan tahminler ve gerçek değerleri arasındaki farklar incelenerek ölçülmüştür. Şekil 4'te her bir yapay sinir ağı için test verileri üzerinde yapılan tahminlerin performansları görülebilir.



Şekil 4. Yapay Sinir Ağlarının Test Verileri Üzerindeki Performansı (a) İki Mesnetli Kiriş b) Üç Mesnetli Kiriş c) Sac Levha d) Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Levha)

Yapay sinir ağları modeli üzerinden elde edilen deformasyon tahminlerini minimize edecek optimizasyon algoritması, Python Scipy kütüphanesi içerisindeki SLSQP metodu temel alınarak oluşturulmuştur. Optimizasyon algoritması içerisinde mesnet mesafe değerleri tasarım değişkeni, amaç fonksiyonu yapay sinir ağları ile elde edilen tahmin değeri ve sınırlar ve kısıtlar ise daha önce belirlenen geometriye uygun olarak belirlenmiştir. Bu sayede yapay sinir ağları modeli çıktıları minimize edilebilmekte ve deformasyon değerlerine karşılık gelen mesnet pozisyonları

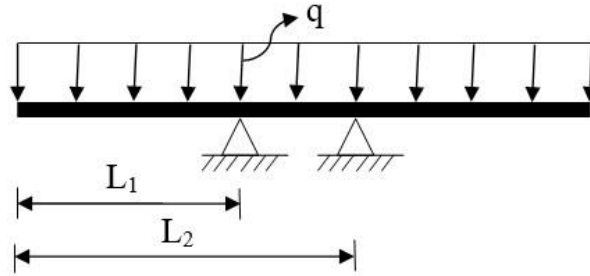
hesaplanabilmektedir. Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet mesafeleri ve karşılık gelen deformasyon değerleri parametrik sonlu elemanlar modeli üzerinde çalıştırılarak bulunan sonuçların tutarlılığı ölçülmüştür.

BULGULAR

Bu bölümde yük taşıyan kiriş yapılarda farklı mesnet durumları için mesnet konum optimizasyonları ve sac plaka şeklinde yük taşıyan yapıların yine benzer şekilde mesnet konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir. Kiriş geometrisi Ansys Design Modeler kullanılarak, mesnet noktaları referans noktasına göre uzaklıkları parametrik olarak tasarlanmıştır. Sonlu elemanlar modeli ise Ansys sonlu elemanlar yazılımında analizleri gerçekleştirilmek üzere 1D çubuk elemanlar kullanılarak hazırlanmıştır. Tasarımlarının kolay, hesaplama sürelerinin kısa, daha kararlı sonuç vermeleri ve yüksek sistem gereksinimlerine ihtiyaç duymamaları özelliklerinden dolayı 1D elemanlar kullanılmıştır (Waia vd., 2013).

Benzer şekilde sac metal yapıların sonlu elemanlar modellemelerinde de iki boyutlu (2D) elemanlar kullanılmıştır. Plane stress seçeneği ile kullanılan iki boyutlu elemanlar sayesinde hem zamandan hem de hafıza kullanımı açısından avantajlar elde edilmiştir. Aşağıda, dört farklı yapının mesnet konumlarının optimizasyonları, geliştirilen yöntemin uygulanması olarak ele alınmıştır.

İki Mesnetli Kirişte Mesnet Yerleri Optimizasyonu



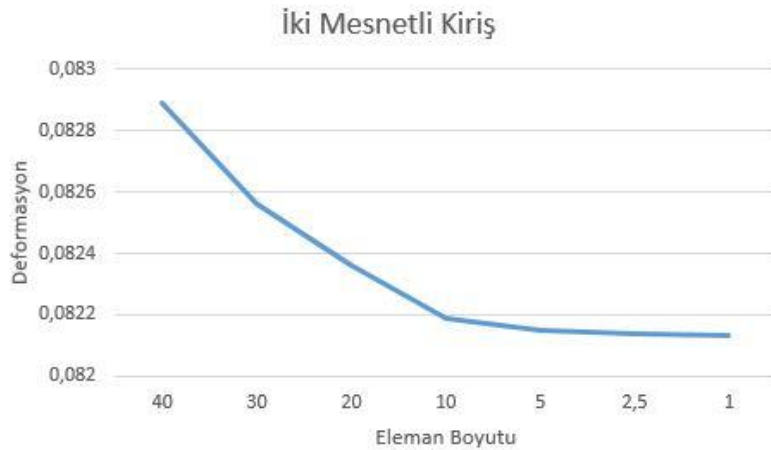
Şekil 5. Yayılı Yük Uygulanan İki Mesnetli Kiriş Problemi

Yayılı yük altındaki iki mesnetli kiriş Şekil 5' te görülmektedir. Amaç mesnet konumlarının en az maksimum deformasyonun elde edilmesi için bulunmasıdır. Bu nedenle her bir mesnetin referans noktasına olan uzaklıkları:

$$0 < L_1 < 499$$

$$501 < L_2 < 1000$$

olarak sınırlandırılmıştır. Kiriş kesiti 10 mm kenar uzunluğuna sahip kare olarak alınmıştır. Mesh yakınsama çalışması yapılmış ve en uygun eleman boyutu 5 mm olarak bulunarak model hazırlanmıştır. İki mesnetli kiriş problemine uygulanan mesh yakınsama işlemi Şekil 6'da verilmiştir. Modellenen iki mesnetli kirişin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 6. İki Mesnetli Kiriş Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 1. İki Mesnetli Kirişin Özellikleri

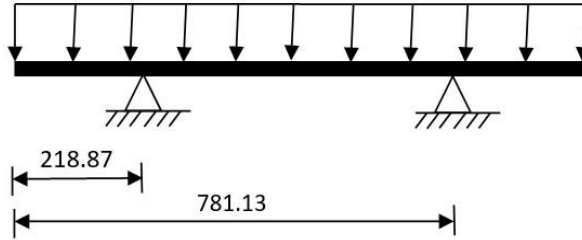
Toplam Uzunluk (mm)	1000
q (N/m)	50
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	100
I (mm ⁴)	883,33

Yapay sınır ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Optimizasyon Sonuçları

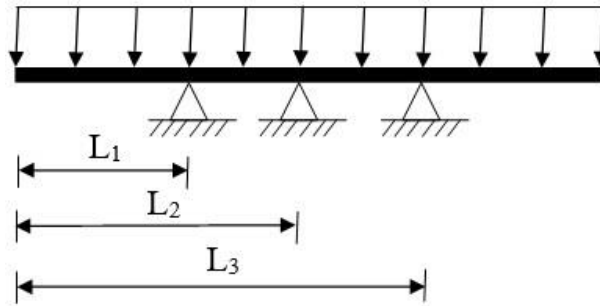
L_1 (mm)	218,87
L_2 (mm)	781,13
Deformasyon (mm)	0,0877

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,083 mm olarak hesaplanmıştır. Deformasyon değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Optimizasyon sonrası elde edilen kiriş modeli Şekil 7’de görülmektedir.

**Şekil 7.** Optimizasyon Sonucu Elde Edilen İki Mesnetli Kiriş Modeli

Sonuçlar değerlendirildiğinde mesnet konumları simetrik çıkmış ve uç noktalardan uzunluğa göre %21,89 mesafesindedir. Bu tür yük taşıyan sistemlerde mesnet noktaları bu oranlarda konumlandırıldığında yapı üzerinde minimum sehim oluşacaktır.

Üç Mesnetli Kirişte Mesnet Yerleri Optimizasyonu

**Şekil 8.** Yayılı Yük Uygulanan Üç Mesnetli Kiriş Problemi

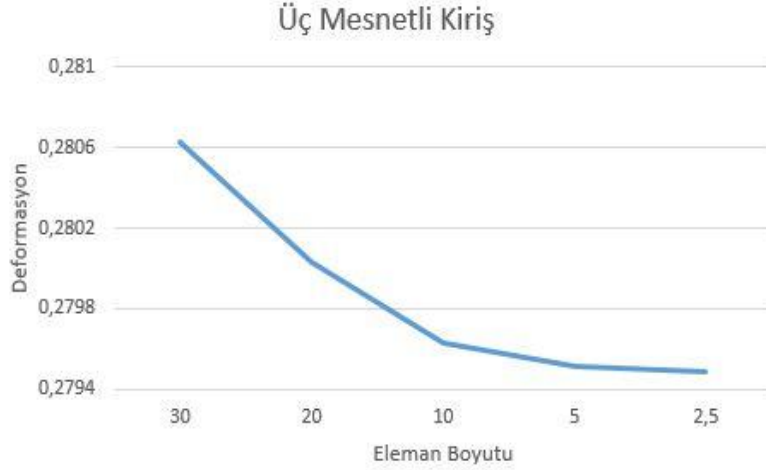
Yayıllı yük altındaki üç mesnetli kiriş Şekil 8’ de görülmektedir. Burada da amaç benzer şekilde kirişte en az deformasyon olacak şekilde mesnet konumlarının optimizasyon ile belirlenmesidir. Mesnet noktalarının parametreleri ve sınırları:

$$0 < L_1 < 333$$

$$334 < L_2 < 666$$

$$667 < L_3 < 1000$$

olarak verilmiştir. Kiriş kesiti 10 mm kenar uzunluğuna sahip kare olarak alınmıştır. Üç mesnetli kiriş sonlu elemanlar modeline mesh yakınsama çalışması yapılarak optimum eleman boyutu 5 mm olarak alınmıştır. Modellenen üç mesnetli kirişin özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 9. Üç Mesnetli Kiriş Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 3. Üç Mesnetli Kirişin Özellikleri

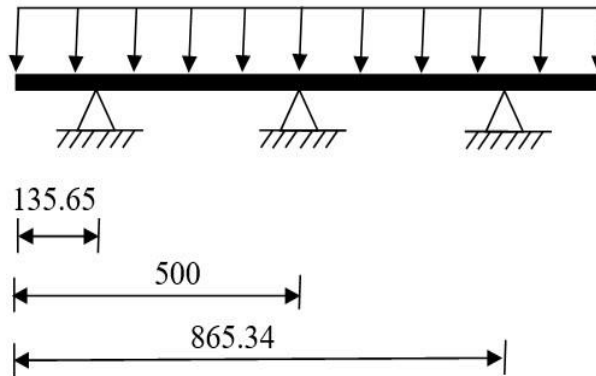
Toplam Uzunluk (mm)	1000
q (N/m)	50
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	100
I (mm ⁴)	883,33

Yapay sınır ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	135,65
L_2 (mm)	500
L_3 (mm)	865,34
Deformasyon (mm)	0,03

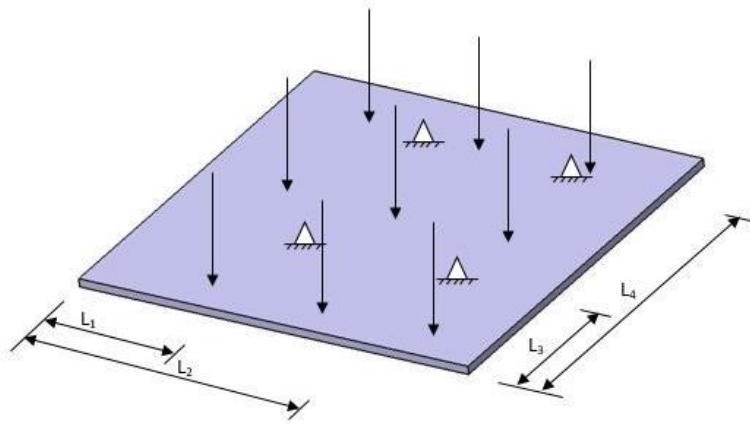
Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,026 mm olarak hesaplanmıştır. Deformasyon değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Optimizasyon sonrası elde edilen kiriş modeli Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen İki Mesnetli Kiriş Modeli

Üç mesnetli kiriş probleminde, orta mesnetin yeri olan L_2 mesafesi kirişin tam ortasında çıkmıştır. Ayrıca L_1 ve L_3 mesafeleri ile konumlanan kenarlardaki mesnetlerin kiriş boyunun %13.57 oranı kadar uzaklıkta ve ortadaki mesnete göre simetrik çıktığı görülmüştür. Bu sonuca göre, üç mesnetli yayılı yük taşıyan kirişlerde mesnet konumları bu oranlarda alınırsa minimum sehim elde edilir.

Sac Levha Mesnet Yerleri Optimizasyonu



Şekil 11. Üniform Yük Altındaki Sac Plaka

Bu örnekte üzerinde yayılı yük bulunan bir sac parçayı destekleyen dört mesnet noktasının konum optimizasyonu yapılmıştır. Sac parçanın sonlu elemanlar modeli kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Mesh yakınsama çalışması sonucu optimum eleman boyutu olarak 50 mm belirlenmiştir. Model 196 düğüm noktası ve 169 iki boyutlu (2D) elemandan meydana gelmektedir. Sac parçaya üniform olarak 1000 N değerinde bir yük ile yüklenme yapılmış ve parça 4 noktadan mesnetler ile sabitlenmiştir.



Şekil 12. Sac Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Özellikleri Tablo 5'te verilen üniform yük altındaki sac plaka Şekil 11'de gösterilmektedir. Amaç en az maksimum deformasyonun elde edildiği mesnet noktalarının konumlarının bulunmasıdır. Bu nedenle her bir mesnetin yatay ve dikey koordinat eksenlerine olan uzaklıkları tasarım değişkeni olarak tanımlanmıştır. Burada;

$$0 < L_1 < 499$$

$$501 < L_2 < 1000$$

$$0 < L_3 < 499$$

$$501 < L_4 < 1000$$

olarak sınırlandırılmıştır.

Tablo 5. Sac Plakanın Özellikleri

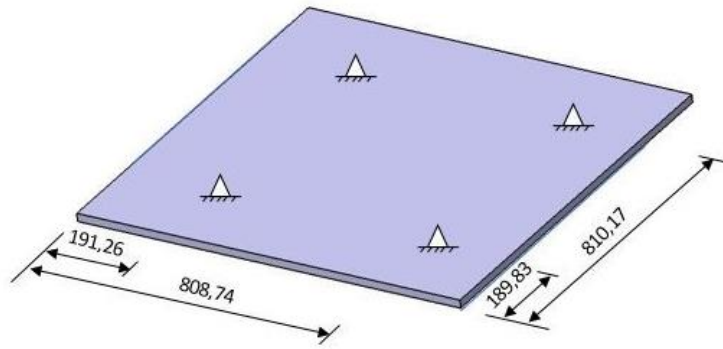
Uzunluk (mm)	1000
Genişlik (mm)	1000
Kalınlık (mm)	5
Yük (N)	1000
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	5000
I (mm ⁴)	10416.67

Yapay sinir ağlarında eğitim ve optimizasyon sonucunda elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	191,26
L_2 (mm)	808,74
L_3 (mm)	189,83
L_4 (mm)	810,17
Deformasyon (mm)	0,40177

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 0,44742 mm olarak bulunmuştur. Bulunan deformasyon miktarları karşılaştırıldığında yapay sinir ağları ile optimizasyon algoritmasının oldukça tutarlı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası elde edilen sac parça modeli Şekil 12'de görülmektedir. Mesnet pozisyonları beklenildiği üzere birbirlerine simetrik olarak elde edilmiştir.



Şekil 12. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Mesnet Konumları

Optimizasyon sonucu mesnet konumları incelendiğinde minimum deformasyon için mesnetlerin sac levha ağırlık merkezine göre simetrik pozisyonlandığı görülmüştür. Sac levha yapılarında parçanın kendi ağırlığı veya üzerindeki yük altında en az deformasyon oluşması için mesnet konumları Şekil 12'de verilen mesnet mesafeleri oranlarında belirlenmelidir. Buna göre sac levhalarda mesnetler kenarlardan %19.13 mesafesinde seçildiğinde en az deformasyon elde edilecektir.

Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Levhanın Mesnet Yerleri Optimizasyonu

Kaynakla birleştirilecek saclar ve yapıdaki mesnetler Şekil 14'te görülmektedir. Sac parçaların özellikleri Çizelge 7'de verilmiştir. Sac parçalar 5 mm kalınlığında, 392 düğüm noktası ve 338 iki boyutlu (2D) eleman ile kabuk eleman olarak modellenmiştir. Mesh optimizasyonu ile eleman boyutu 50 mm olarak belirlenmiştir. Sınır şartı olarak iki sac parça toplam 8 adet mesnet ile sabitlenmiştir. Sac parçanın modeli üzerine yük uygulanmamış, kendi ağırlığı etkisi altındaki deformasyonu incelenmiştir.

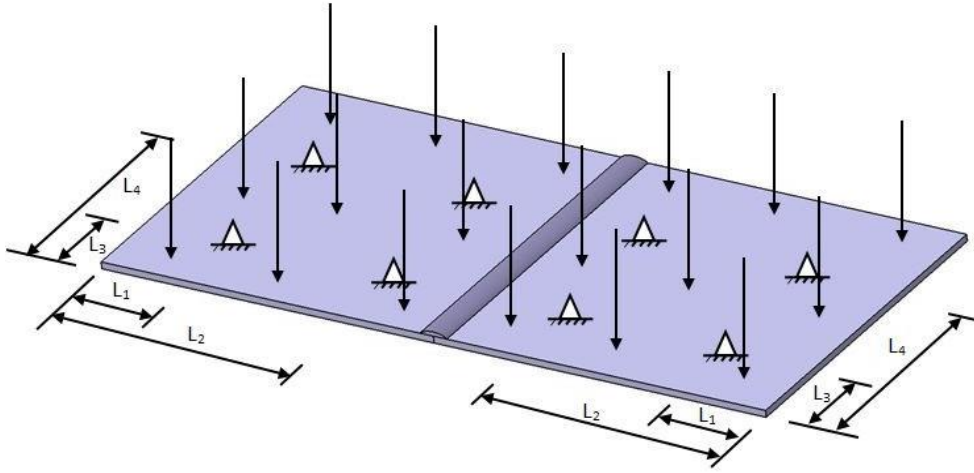


Şekil 13. Kaynakla Birleştirilecek İki Sac Problemi Mesh Yakınsama Uygulaması

Tablo 7. Sac Plakaların Özellikleri

Uzunluk (mm)	1000
Genişlik (mm)	1000
Kalınlık (mm)	5
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Kesit Alanı (mm ²)	5000
I (mm ⁴)	10416,67

İki sac parçanın kaynak edilecek kenar üzerinde üniform düzgün kaynak dikişi elde edilebilmesi için deformasyonun iki sac parçada eşit ve minimum değerde olması gerekmektedir. Bundan dolayı iki sac parçadaki mesnet yerlerinin konumları aynı seçilmiştir. Önceki sac levha mesnet yerleri optimizasyonu çalışmasında deformasyon olarak parçanın tamamı dikkate alınırken bu örnekte parçaların kaynak yapılacak kenarında meydana gelen deformasyonun minimize edilmesi amaçlanmıştır ve bu doğrultuda dört mesnet noktasının konum optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

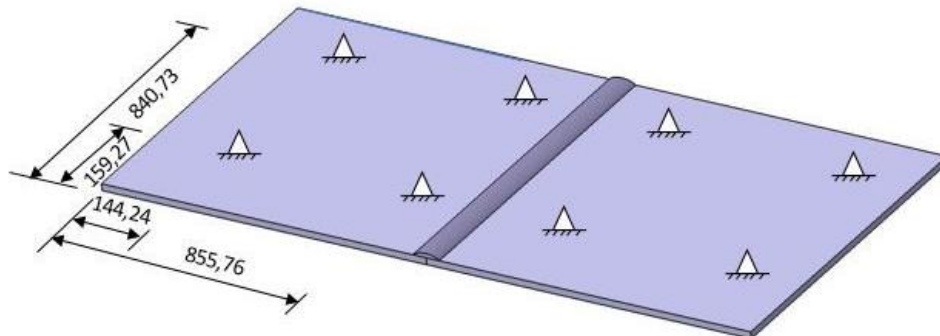


Şekil 14. Kaynak Edilecek İki Sac Parça Modeli

Optimizasyon sonucu elde edilen mesnet uzaklıkları ve deformasyon değeri Tablo 8’de görülmektedir. Elde edilen mesnet uzaklık değerleri, hazırlanan sonlu elemanlar modeli üzerinde ilgili parametrelere atanıp analiz gerçekleştirildiğinde deformasyon miktarı 2,5 mm olarak bulunmuştur. Bulunan deformasyon miktarları karşılaştırıldığında yapay sinir ağları ile optimizasyon algoritmasının oldukça tutarlı sonuçlar turettiği görülmektedir. Optimizasyon sonrası elde edilen sac parça modeli Şekil 15’te görülmektedir.

Tablo 8. Optimizasyon Sonuçları

L_1 (mm)	144,24
L_2 (mm)	855,76
L_3 (mm)	159,27
L_4 (mm)	840,73
Deformasyon (mm)	2,21



Şekil 15. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Mesnet Konumları

Sac parçaların kaynak ile birleştirilmesi prosesinde kaynak yapılan bölgenin geometrik doğruluğu, sac parçaların en az deforme olacak şekilde konumlandırılmasına bağlıdır. Optimizasyon sonucunda kaynak edilecek iki sac parçada, mesnet mesafeleri kaynak çizgisine göre simetrik olarak bulunmuştur. Kaynak edilecek iki sac parçada mesnetler kenarlardan %14.42 mesafesinde seçildiğinde kaynak edilecek kenarda minimum deformasyon elde edilecektir. Bu sayede sac parçalar en yüksek doğrulukta kaynak ile birleştirilebilir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yük taşıyan yapılarda hafifliğin yanında en az deformasyon olması genellikle talep edilir. Minimum deformasyon elde edilmesi için deneme-yanılma yöntemleri yerine optimizasyon algoritmaları kullanımı ile daha kısa zamanda daha optimal değerlerin bulunması için kullanılmalıdır. (Zolghadr-Asli vd, 2018; Arora, 2017). Bu çalışmada da Python Scipy kütüphanesindeki SLSQP algoritması kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. (Konstantinos ve Marie, 2019).

Literatürde giriş ve sac parça üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde girişlerin şekil parametrelerinin optimize edilmesi (Jaskot, A., 2021; Kayabekir, 2018), girişe takviye edici malzemeler ile deplasman azaltılması için optimizasyon çalışması (Silva ve Meireles, 2018), sac plakaların güçlendirilmesi için kullanılan nervür elemanın konum optimizasyonu (Y. C. Lam ve S. Santhikumar, 2003) ve talaşlı imalat işlemi sırasında parçada minimum deformasyon için konum optimizasyonları (Kaya, 2006) gibi farklı yöntemler kullanılarak optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fakat literatürde yük taşıyan yapıların tasarımında genellikle ürün veya yapının şekil parametreleri gibi birçok yöntem kullanılarak optimize edilmeye çalışılmakta (Jaskot, A., 2021; Kayabekir, 2018; Jang vd., 2009; Kaya, 2006) ancak mesnet yerlerinin optimizasyonu ile minimum deformasyonun elde edilmesi ile ilgili çalışmalar yetersizdir. Görülen bu eksikliğin, bu çalışma ile giderilmesi ile literatüre katkıda bulunulacağı düşünülmektedir. Birçok endüstri alanında kullanılan giriş ve sac plaka yapılarda mesnet konumlarının optimizasyonu bu çalışmanın ana konusudur. Bu çalışmada iki mesnetli giriş, üç mesnetli giriş, sac plaka ve kaynak edilecek iki sac plaka örnekleri üzerinde mesnet konum optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Optimizasyon problemi çözümlerinde, seçilen çözüm algoritmasına bağlı olarak çok sayıda iterasyon gerekirken ve bu durumda çok sayıda amaç ve kısıt fonksiyonu hesaplanması gerekmektedir. (Köroğlu, 2013) Bu çalışmada olduğu gibi, sonlu elemanlar modelinin kullanıldığı durumlarda ise optimizasyon probleminin çözümünde güçlü bir bilgisayar alt yapısı gerekir. Sonlu elemanlar modeli yerine geçen vekil model kullanmak, bu dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. (Gürel, 2016) Bu çalışmada yapay sinir ağları vekil model olarak kullanılmıştır. Vekil modellerin sonlu elemanlar modelleri ile korelasyon değerleri yaklaşık %99 mertebesinde bulunmuş ve optimizasyon probleminin tanımlanmasında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Örnek problemler için çözümler gerçekleştirildiğinde, optimum mesnet konumlarında minimum deformasyon durumu için giriş ve sac plaka üzerinde oluşan maksimum deformasyon değerlerinin farklı konumlarda aynı değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bir başka deyişle optimizasyon algoritması, yapı üzerinde oluşan maksimum deformasyonu azaltmak için, düşük deformasyon olan bölgelerdeki deformasyonların artmasına izin vererek deformasyonları dengelemeye çalışmıştır. Yapı üzerinde homojen bir deformasyon dağılımının olması yönünde bir sonuç elde edilmiştir. Bir diğer sonuç, yüklemelerin ve geometrinin simetrik olması durumunda mesnet konumlarının da simetrik çıkmasıdır. Yapılar üzerinde farklı noktalarda oluşan maksimum deformasyon değerleri, mesnet konumlarının simetrik durumu için elde edilmiştir. Bu beklenen bir sonuç olmakla beraber, optimum mesnet yerlerinin belirlenmesi ancak optimizasyon probleminin çözülmesi ile elde edilmiştir.

Sonuçta bu çalışmada, bu tür sistemleri tasarlayan mühendislerin kullanabileceği referans değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu tür yapıların tasarımında birer tasarım kriteri olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında verilen bursiyer desteğine teşekkür ederiz (Proje No: 118C136 ve 118C100).

KAYNAKLAR

Abbasi, B. and Mahlooji, H., (2012). Improving response surface methodology by using artificial neural network and simulated annealing. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3461-3468. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.036>

- Aderiani, A.R., Warmefjord, K., Söderberg, R., Lindkvist, L. and Lindau, B., (2020). Optimal design of fixture layouts for compliant sheet metal assemblies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 2181-2201. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05954-y>
- Ahmad, Z., Sultan, T., Asad, M., Zoppi, M. and Molfino, R., (2018). Fixture layout optimization for multi point respot welding of sheet metals. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(4), 1749-1760. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0331-5>
- Alteyeb, M.S. and Jolgaf, M., (2017, September). Optimization of cantilever beam for minimum weight using finite element analysis. First Libyan Conference on Metal Casting and Processing Technologies. FLCMCPT2017.
- Arora, J.S., (2017). Introduction to Optimum Design. Elsevier, UK, 945.
- Arslan, İ., (2019). Python ile Veri Bilimi. Pusula, İstanbul, 406.
- Darshan, S., Varik, A., Katti, A.N., Singh, A.K. and Kamath R.R., (2013). Size and topological optimization of cantilever beam. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 4(5), ISSN:2231-5381.
- Gürel, D.B. (2016). Cevap yüzeyi yöntemi kullanılarak stevia özü içeren düşük kalorili böğürtlen reçeli formülasyonunun belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi. T.C. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı. Tekirdağ 71s.
- Jang, G.W., Shim, H.S. and Kimi, Y.Y., (2009). Optimization of support locations of beam and plate structures under self-weight by using a sprung structure model. *Journal of Mechanical Design*, 131(2), 021005. <https://doi.org/10.1115/1.3042154>
- Jaskot, A. (2017). Steel cantilever beam optimization with ANSYS software. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, t. 27 (177), Politechnika Częstochowska. <https://doi.org/10.17512/znb.2021.1.11>
- Kaya, N., (2006). Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms. *Computers in industry*, 57, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.05.001>
- Kayabekir, A.C. (2018). Yapı mühendisliğinde metasezgisel algoritmalar ile optimizasyon uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. T.C. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 101s.
- Keras (2022). <https://keras.io> Accessed 18,12,2022.
- Konstantinos, V., Marie-Ange, D. (2019). Benchmarking multivariate solvers of scipy on the noise-less testbed. - The Genetic and Evolutionary Computation Conference, Jul 2019, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1145/3319619.3326891>
- Köroglu, S.A. (2013). Gemi yapısal dizaynında vekil model kullanımı. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı. İstanbul 130s.
- Kraft, D., (1998). A Software package for sequential quadratic programming. DLR German Aerospace Center – Institute for Flight Mechanics, Köln, 33.
- Lam, Y. C., Santhikumar, S. (2003). Automated rib location and optimization for plate structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 25(1), 35–45. <https://doi.org/10.1007/s00158-002-0270-7>
- Li, B. and Melkote, S.N., (1999). Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization. *International Journal of Machine Tools &Manufacture*, 39, 871-883. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00072-8)
- Li, B., Tang, H., Yang, X. and Wang, H., (2006). Quality design of fixture planning for sheet metal assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 690-697. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0385-2>
- Lipovetsky, S., (2009). Pareto 80/20 law: derivation via random partitioning. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 40, 271-277. <https://doi.org/10.1080/00207390802213609>
- Lu, C. and Zhao, H.W., (2015). Fixture layout optimization for deformable sheet metal workpiece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 85-98. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6647-0>

- Prabhakaran, G., Padmanaban, K.P. and Krishnakumar, R., (2007). Machining fixture layout optimization using fem and evolutionary techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 1090-1103. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0441-6>
- Selvakumar, S., Arulshri, K.P., Padmanaban, K.P. and Sasikumar, K.S.K., (2013). Design and optimization of machining fixture layout using ann and doe. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1573-1586. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4281-2>
- Scipy (2022). <https://docs.scipy.org> Accessed 15.08.2022.
- Silva, H. M., and de Meireles, J. F. B. (2018). Design optimisation of internally reinforced beams subjected to bending loading. *Advanced Engineering Forum*, 28, 18–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/aef.28.18>
- Simpson, T.W., Poplinski, J.D., Koch, P.N. and Allen, J.K., (2001). Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations. *Engineering with Computers*, 17, 129-150. <https://doi.org/10.1007/PL00007198>
- Viana, F.A.C., (2015). A tutorial on latin hypercube design of experiments. *Quality and Reliability Engineering International*, 32(5), 1975-1985. <https://doi.org/10.1002/qre.1924>
- Waia, C.M., Rivai, A. and Bapokutty, O., (2013). Modelling optimization involving different types of elements in finite element analysis. *Materials Science and Engineering*, 50(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/50/1/012036>
- Yang, B., Wang, Z., Yang, Y., Kang, Y. and Li, C., (2017). Optimization of fixture locating layout for sheet metal part by cuckoo search algorithm combined with finite element analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 1-10. <https://doi.org/10.1177/168781401770>
- Zolghadr-Asli, B., Bozorg-Haddad, O., Chu, X., (2018). Advanced optimization by nature-inspired algorithms., *Studies In Computational Intelligence*, Vol. 720, Ed.: Bozorg-Haddad, O., Singapore, p. 166. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5221-7>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2023
Kabul Tarihi : 30.07.2023

Received Date : 03.01.2023
Accepted Date : 30.07.2023

HİDROTERMAL ÖN İŞLEMLİ OKALİPTÜS KÖK ODUNLARINDAN PROLİZ YÖNTEMİYLE AKTİF KARBON ÜRETİLMESİ

PRODUCTION OF ACTIVATED CARBON FROM HYDROTHERMAL PRE-TREATED EUCALYPTUS ROOTWOODS BY PROLYSIS METHOD

Ayşegül APAYDIN¹ (ORCID: 0000-0001-6294-9498)
Ertuğrul ALTUNTAŞ^{2*} (ORCID: 0000-0002-1853-3206)
Ali ŞAMİL³ (ORCID: 0000-0002-4950-1725)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

³ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ertuğrul ALTUNTAŞ, ealtuntas@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, aktif karbon elde etmek için hammadde olarak Tarsus-Karabucak bölgesinde yetiştirilen okaliptüs ağacının (*Eucalyptus grandis*) kök odunları kullanılmıştır. Aktif karbonlar hidrotermal ve piroliz yöntemleri kullanılarak iki aşamada üretilmiştir. Hidrotermal yöntemde suyun süper kritik özelliğinden yararlanılarak lignoselülozik malzeme 200°C ve 225°C’de kapalı otoklav sisteminde 24 saat tutulmuş sonrasında H₃PO₄ (fosforik asit) ile 1:1 oranında karıştırılarak kimyasal aktivasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Proliz aşamasında 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C sıcaklıklarında azot ortamında 30 dakika bekletilerek karbonizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aktif karbon numunelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM), Brunauer-Emmett-Teller (BET), Fourier dönüşümlü infrared (FT-IR) ve elementel analizi teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre H₃PO₄ ile kimyasal aktivasyon işlemi kullanılarak 400°C ve 600°C sıcaklıklarda üretilen aktif karbonların yüzey alanı 1074 m²/g ve 1069 m²/g olarak elde edilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerinde aktif karbonların yüksek poroziteye sahip olduğu anlaşılmıştır. Elementel analiz sonuçları incelendiğinde sıcaklığın arttıkça oksitlenmiş fonksiyonel grupların azaldığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak okaliptüs kök odunlarından hidrotermal ve piroliz yöntemleri ile yüksek gözenek ve yüksek yüzey alanlarına sahip aktif karbonlar üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrotermal, aktif karbon, okaliptüs, piroliz

ABSTRACT

In this study, root woods of eucalyptus tree (*Eucalyptus grandis*) grown in Tarsus-Karabucak region were used as raw material to obtain activated carbon. Activated carbons were produced in two stages using hydrothermal and pyrolysis methods. Firstly, the lignocellulosic material was kept for 24 hours in a closed autoclave system at 200°C and 225°C by utilizing the supercritical property of water in the hydrothermal method and then the samples were mixed with H₃PO₄ (phosphoric acid) at a ratio of 1:1 for chemical activation. In the pyrolysis stage, the carbonization process was carried out at 400°C, 500°C, 600°C and 700°C in a nitrogen environment for 30 minutes. The obtained activated carbon samples were characterized using scanning electron microscopy (SEM), Brunauer -Emmett - Teller (BET), Fourier transform infrared (FT-IR), and elemental analysis techniques. According to the results obtained, the surface area of activated carbons produced at 400°C and 600°C using the chemical activation process with H₃PO₄ was obtained as 1074 m²/g and 1069 m²/g respectively. It was understood that the obtained activated carbons had high porosity in SEM images. When the elemental analysis results were examined, it was understood that the oxidized functional groups decreased as the temperature increased. As a result, activated carbons with high porosity and high surface areas were produced from eucalyptus root woods by hydrothermal and pyrolysis methods.

Keywords: Hydrothermal, activated carbon, eucalyptus, pyrolysis

ToCite: APAYDIN, A., ALTUNTAŞ, E., & ŞAMİL, A., (2023). HİDROTERMAL ÖN İŞLEMLİ OKALİPTÜS KÖK ODUNLARINDAN PROLİZ YÖNTEMİYLE AKTİF KARBON ÜRETİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 653-662.

GİRİŞ

Aktif karbon tarihi çok eskilere dayanan tüm dünyada çok çeşitli endüstrilerde farklı amaçlar için kullanılan bir malzemedir. Aktif karbon, yüksek oranda karbon içeren ve bunu dışında oksitlenmiş fonksiyonel gruplar bakımından zengin, ayrıca birçok organik maddeden üretilebilen, kimyasal yollarla tamamıyla özellikleri ortaya koyulamayan, kesin bir kimyasal yapısı bulunmayan yüksek poroziteye sahip bir maddedir (Gürses, 1992; Walker, 1969; Jain vd., 2016). Aktif karbon gazlarının saflaştırılması sürecinden, depolama ve arıtma işlemlerinde, koku ve safsızlıkların giderilmesinde, su ve atık sudaki kirliliğin arıtılmasına, savunma sanayi gibi birçok alanda farklı amaçlar için kullanılmaktadır (Stoeckli ve Kraehenbuehl, 1984). Yapılan çalışmalarda aktif karbonunu gözenek hacimleri 0,2 ml/g'dan daha yüksek yüzey alanı için 400 m²/g'dan (BET) yüksek olmasını sağlamaktadır. Aktif karbonun gözenek çapları 3Å-1000Å arasında değişebilir (McDougall, 1991). Genelde aktif karbon için kullanılan organik yapının bünyesinde %87-97 oranında karbon olması gerekmektedir. Bunun haricinde ise hidrojen, kükürt, azot ve oksijen gibi elementler bulunmaktadır. Karbon haricinde kalan elementlerin durumu ve bileşik yapısı karbonun aktifliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca kimyasal ve fiziksel aktivasyon esnasında ortama eklenen kimyasallar yada maddeler aktif karbonun yapısını ve içeriğini doğrudan etkilemektedirler (Akyıldız, 2007). Aktif karbon üretiminde birçok biyokütle kaynakları kullanılmaktadır. Biyokütlenin ana bileşenleri karbon, hidrojen, oksijen ve azot gibi elementler içeren hidrokarbonlu maddelerdir. Aktif karbon üretimi genellikle fiziksel veya kimyasal aktivasyon olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Üretim aşaması karbonizasyon ve ön işleme gibi hidrotermal karbonizasyon amacıyla farklı üretim aşamalarını da içerebilir. Gözenekli karbonlar elde edilebilmek için bir çok farklı kimyasal ve üretim aşaması tercih edilmektedir (Deng vd., 2015).

Lignoselülozik materyallerin aktivasyonu için fiziksel aktivasyon olarak su buhar veya CO₂ gibi kısmen oksitleyici ortamlar, kimyasal aktivasyon olarak çeşitli asidik bazik kimyasal aktive edici ajanlar kullanılarak inert gaz ortamında çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir (Abioye ve Ani, 2015; Deng vd., 2016). Aktivasyon çalışmaları için biyokütlenin ön işlenmesi yada aktivasyon öncüsü olarak farklı işlemler yapılarak aktif karbonun özelliklerini geliştirme teknikleri kullanılmaktadır. Ön işleme tipik olarak piroliz/karbonizasyon, hidrotermal karbonizasyon, iyonotermal karbonizasyon, mikrodalga ön işleme, asitle ıslatma ve termo sıkıştırma gibi birçok yöntemlerle uygulanmaktadır. Bu işlemler, biyokütleyi modifiye etmeyi veya aktivasyon öncesi etkinliğinin artmasını sağlayarak daha yüksek poroziteye sahip ürünler elde edilmesini amaçlamaktadır (MacDermid-Watts vd., 2021).

Türkiye'de okaliptüs ağaçlarının yetiştirildiği toprak özellikleri göz önüne alınırsa kumul yerlere dikim yapıldığı gibi aynı zamanda Tarsus-Karabucak mevkiinde derin, organik madde ve mineralce zengin ve alüvyal topraklarda da dikimi gerçekleştirilmiştir (Gürses, 1992). Dünyada çok geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunmasına karşın ülkemizde kullanım alışkanlığının bulunmaması ve sektörlere bu ağacın sunulmaması, okaliptüs ağacının kullanımını kısıtlı hale getirmektedir (Gürses, 1992). Yapılan bazı çalışmalarda Okaliptüs grandisin kök ve gövdedeki selüloz miktarlarının birbirlerinden farklı olduğu anlaşılmıştır. Okaliptüsün kök de gövdedeki selüloz oranı sırayla %47,08 ve %49,8 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde lignin miktarlarının sırayla %34,79 ve %25,13 olduğunu belirlenmişlerdir (Gürsel, 1990; Tutuş vd., 2008).

Yapılan çalışmada Tarsus Karabucak okaliptüs ormanından getirtilen ve atıl durumda bulunan kök odunları aktif karbon üretiminde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için hazırlanan kök odun talaşlarından önce hidrotermal ve sonrasında proliz cihazında olmak üzere 2 aşamalı olacak şekilde aktif karbon üretilmiştir. Üretilen test numunelerinin verim hesabı, yüzey alanlarının belirlenmesi (Brunauer-Emmett-Teller, BET), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), FT-IR (Fourier Transform Infrared) ve elementel analizleri yapılarak karakterize edilmiştir.

MATERYEL METOT

Materyal

Aktif karbonun üretilmesinde Mersin, Tarsus-Karabucak okaliptüs ormanında kesimden sonra arazide kalan *Eucalyptus grandis* kök odunları kullanılmıştır. Kök odunu parçacıkları öğütücü değirmende öğütüldükten sonra sarsak elek kullanılarak elenmiştir. Aktif karbonun üretilmesinde 20-40 mesh boyut aralığındaki kök odunu parçacıkları kullanılmıştır. Proliz aşamasında Emprove marka %85'lik orto-fosforik asit (H₃PO₄) malzemenin kimyasal aktivasyon işleminde doğrudan kullanılmıştır.

Metot

Yapılan çalışmada aktif karbon üretimi 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada kapalı bir otoklav içerisinde suyun süper kritik özelliğinden faydalanılarak hidrotermal yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada

karbonlaştırma işlemi için hazırlanan numuneler su içerisinde 200°C ve 225°C'lerde 24 saat süre ile kapalı otoklav içerisinde bekletilmiştir. Okalıptüs kök odunlarının içerisinde lignin miktarı gövde ve dal odununa göre daha yüksektir. Ayrıca hidrotermal karbonizasyon yönteminde lignin miktarı yüksek olan odunlarda daha yüksek sıcaklıklarda optimum sonuçların elde edildiği literatürde belirtilmiştir (Jain vd., 2016). Otoklavdan çıkarılan numuneler saf su ile yıkama işlemine tabii tutulmuştur ve 103 ± 2°C'de etüvde 24 saat kurutma işlemi uygulanmıştır. İkinci aşamada ise birinci aşamada elde edilen numuneler önce kimyasal aktivasyon işlemine tabii tutulmuştur. Bunun için önce numuneler fosforik asit ile muamele edilmiştir. Muamele işlemleri kimyasal madde oranı 1/1 olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen karışımların her biri etüvde 80°C'de bir gün boyunca kurutulmuş ve emdirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında Tablo 1'de belirtilen sıcaklıklarda proliz cihazında farklı sıcaklıklarda karbonlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Örneklerin hidrotermal karbonizasyon ve kullanılan kimyasala göre kodlanması

	Numune Kodu	Hidrotermal Sıcaklık (°C)	Piroliz Sıcaklığı (°C)
1	F225/400	225	400
2	F225/500	225	500
3	F225/600	225	600
4	F225/700	225	700
5	F200/400	200	400
6	F200/500	200	500
7	F200/600	200	600
8	F200/700	200	700

Kullanılan proliz reaktörü Proterm Furnaces firmasına aittir. Piroliz işlemi için numunelerden 2,5 gram tartılarak reaktöre alınmış ve reaktörün sızdırmazlığını sağlamak için cihazın kapakları bir conta ile iyice sıkıştırılarak kapatılmıştır. Reaksiyon süresince inert ortamı sağlamak için ortam sürekli olarak 0,5 litre/saat akış hızında azot gazı (N₂) ile beslenmiştir. Reaktörden çıkarılan numuneler yıkama işlemi için filtre kağıdı üzerine alınmıştır. Saf su ile filtre kağıdı üzerindeki örnekler yıkanarak pH 6-7 oluncaya kadar yıkama işlemine devam edilmiştir. Yıkama işlemi biten aktif karbon örnekleri 85°C'de 12 saat boyunca kurutulmak üzere etüve konulmuştur. Kuruma işlemleri tamamlanan aktif karbon örnekleri, hava ve ışıktan etkilenmemesi için saklama şişelerine alınarak karakterizasyon aşamalarında kullanılmak üzere dolapda korumaya alınmıştır.

Verim Hesabı Analizleri

Aktif karbon üretim sürecinin tamamlanmasından sonra elde edilen kuru aktif karbon miktarı, başlangıçta kullanılan madde miktarına oranı alınarak verim hesabı yapılmıştır. Üretilen aktif karbon numunelerinin verimi, denklem 1'de ki eşitlikten hesaplanmıştır (Karapınar, 2018).

$$\text{Verim (\% w)} = \frac{\text{Elde edilen kuru aktif karbon verimi (g)}}{\text{Başlangıçta kullanılan kuru madde miktarı (g)}} \times 100 \quad 1$$

Aktif Karbon Örneklerinin BET (Brunauer-Emmett-Teller) Yüzey Alanlarının Belirlenmesi

Elde edilen aktif karbon numunelerinin BET yüzey alanı ölçümleri KSÜ Üskim laboratuvarlarında Micromeritics Tristar II 320 marka cihaz ile, 110°C'de 1 saat vakumlanarak gaz alma işlemine tabii tutularak gerçekleştirilmiştir.

Aktif Karbon Örneklerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Elde edilen aktif karbon numunelerinin gözenek yapısını göstermek için, KSÜ Üskim laboratuvarlarında Zeiss-EVO LS10/Bruker marka cihaz ile çalışılarak SEM görüntüleri elde edilmiştir. 15.00 kV hızlandırma voltajı değerinde ve 10µm, 20µm ve 100µm görüntüleme aralığında çalışılarak SEM görüntüleri elde edilmiştir.

Aktif Karbon Örneklerinin FT-IR (Fourier Transform Infrared) Analizi

Aktif karbon numunelerinin içerdiği fonksiyonel grupları belirlemek amacı ile 650-4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında 1,0-1,5 gram aktif karbon numunelerinden kullanılarak Agilent Cary 630 marka cihaz ile analizleri yapılmıştır.

Aktif Karbon Örneklerinin Elementel Analizi

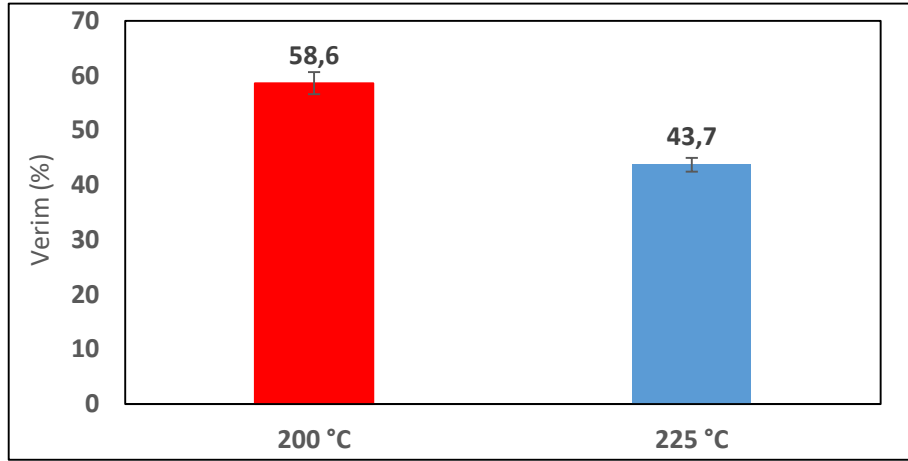
Okalıptüs kök odunlarından elde edilen aktif karbon örneklerinin yapısında bulunan C (karbon), O (oksijen), H (hidrojen) ve N (azot) elementlerini tayin etmek için KSÜ Üskim Laboratuvarlarında Eltra CS580 marka cihaz ile

analizleri yapılmıştır. Elemanel analiz gerçekleştirmek için, aktif karbon numunelerinden yaklaşık olarak 2,0 mg alınarak 950-1000 °C sıcaklık aralıklarında yakma işlemi gerçekleştirilerek numunelerin içerisindeki element analizleri yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Aktif Karbonların Hidrotermal ve Proliz İşlemi Sonrasında Karbonizasyon Verimleri

Yapılan çalışmada hidrotermal aşamasında elde edilen % verim sonuçları şekil 1’de kıyaslanarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 200°C’de hidrotermal karbonizasyon işlemi sonucunda %58,6 oranında verim elde edilirken sıcaklık 225 °C’ye çıkarıldığı zaman verim %43,7 düşmüştür. Lignin için hidrotermal karbonizasyon işlemi genellikle suyun süper kritik bölgesinde (300 °C) gerçekleştirilir; bu durum, ligninin suda çözünür ve tamamen homojen bir yapıya dönüşerek hidrolize olabileceğini gösterir. Ancak suyun süper kritik noktasının altında çözünür fraksiyon reaksiyonları farklıdır. Çözücünün sıcaklığı da lignin depolimerizasyonunda kritik bir faktördür, çünkü yüksek sıcaklıklar, monomerlerin yeniden polimerizasyonunu kolaylaştırabilen sudaki fraksiyonların artmasına neden olmaktadır (Wang, vd., 2023). Kök odunlarında lignin miktarının yüksek olmasından dolayı sıcaklık arttıkça suya geçen fraksiyonlarda artmıştır. Bu durumda verimin düşmesine sebep olmuştur.



Şekil 1. Hidrotermal karbonizasyon işlemi sonucunda oluşan katı ürün verimleri

Tablo 2. Aktif karbonların hidrotermal ve piroliz karbonizasyon işlemleri sonucunda elde edilen katı ürün verimleri

	Hidrotermal Sıcaklık (°C)	Piroliz Sıcaklık (°C)	Verim (%)
F225/400	225	400	82,08
F225/500	225	500	86,88
F225/600	225	600	82,08
F225/700	225	700	81,64
F200/400	200	400	73,56
F200/500	200	500	75,44
F200/600	200	600	67,64
F200/700	200	700	73,72

Yapılan çalışmada hidrotermal aşaması sonrasında fosforik asitle muamele edilen numuneler proliz aşamasına sevk edilmiştir. Bu aşamada elde edilen numunelerin verimleri Tablo 2’de verilmiştir. Birinci aşamada 225°C’de hidrotermal önileme tabii tutulan numunelerin veriminin daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bunun nedeni hidrotermal aşamasında yüksek sıcaklığa maruz bırakılan kök odunu parçacıklarının daha fazla fraksiyonlarına ayrılmaya müsait olmasındandır. Genelde hidrotermal karbonizasyon işleminde farklı sıcaklıklarda farklı ürünlerin oluşumu meydana gelmektedir. Hidrotermal reaksiyonlarda daha yüksek sıcaklıklarda, gazlı ürünlerin oluşumu daha fazla meydana gelirken, sıcaklık düşürüldüğünde daha düşük reaksiyon oranı görülmektedir ve katı ürün veriminde artış meydana gelmektedir. Hidroliz, biyokütlelin fiziksel yapısının tamamen parçalanmasına yol açabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda reaksiyon şiddetinin artmasıyla koloidal karbon partiküllerin miktarında bir artış olmaktadır

(Titirici vd., 2007). Literatür incelendiğinde hidrotermal karbonizasyon yönteminde sıcaklık arttıkça katı ürün verimleri düşmektedir. Ancak iki aşamalı gerçekleşen prosedürlerde, ikinci aşamada gerçekleştirilen piroliz işlemlerinde verimin daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu durum ise hidrotermal karbonizasyon işlemlerinde sıcaklık arttıkça hammadde içerisinde bulunan, bozulan bileşen miktarı ve biyokütle dönüşümü artacağından hammaddenin katı ürün verimleri düşmektedir ancak bu işlemde sıvı ürünlerde ve gaz ürünlerde bir artış gözlemlenmektedir. Düşük sıcaklıklar uygulanarak gerçekleştirilen hidrotermal karbonizasyon işlemlerinde ise bozulan biyokütle ve bileşen miktarı daha düşük olacağından katı ürün verimleri daha yüksek olmaktadır (Basu, 2010).

Aktif Karbonların BET Analiz Bulguları

Yapılan BET analiz sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aktif karbon örnekleri yüzey alanları 760-1074 m²/g arasında değişmektedir. Hidrotermal ön işlemde sıcaklık 225°C uygulanan örnekler 200°C uygulananlardan genel olarak daha düşük yüzey alanına sahip olmuşlardır. İki aşamalı işlem sonucunda en yüksek yüzey alanı değeri F200/400 örneğine ait olan 1074,5 m²/g olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Aktif karbon örneklerinin BET analiz bulguları

	Yüzey Alanı (m ² /g)	Gözenek Hacmi (cm ³ /g)	Gözenek Boyutu (nm)	P/P ₀ =1’de adsorpsiyon N ₂ Hacmi (cm ³ /g STP)
F225/400	760,10	0,4858	2,55	323,10
F225/500	802,12	0,5527	2,75	367,20
F225/600	772,30	0,5586	2,89	373,70
F225/700	825,48	0,5948	2,88	398,70
F200/400	1074,50	0,8656	3,22	585,30
F200/500	899,21	0,8089	3,60	549,60
F200/600	1069,58	0,9606	3,59	647,20
F200/700	806,93	0,7207	3,57	489,20

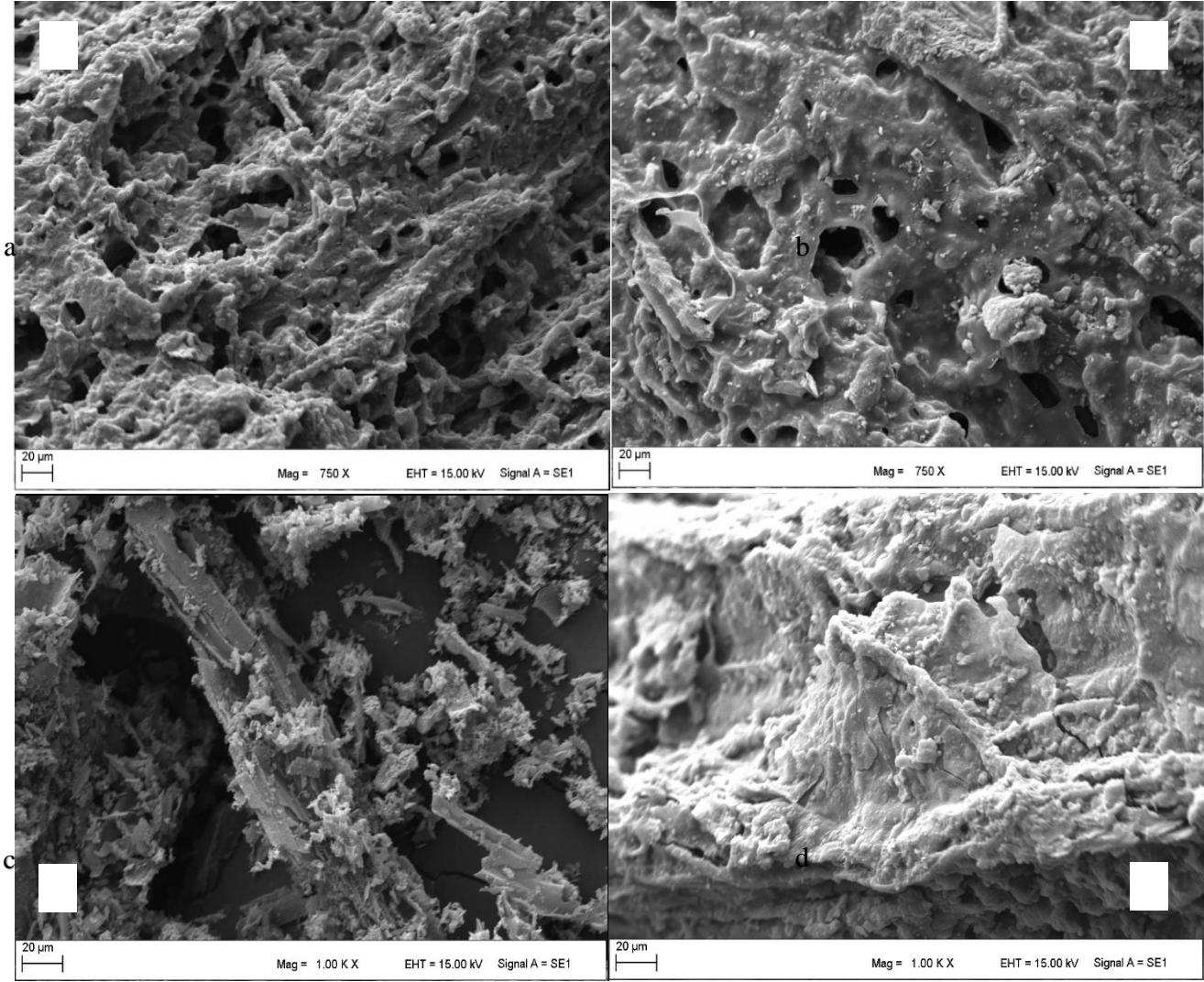
Aktif karbonların gözenek hacmi ve gözenek boyutu incelendiği zaman ortalama olarak oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 3’de verilen değerler incelendiğinde 225°C’de gözenek hacimlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca piroliz işlemi sonrası gözenek boyutlarının da 225°C’de hidrotermal işleme tabi tutulan örneklerin 200°C derecede olanlardan daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Gözenek hacminin ve boyutunun belirlenmesinde hidrotermal ön işleme şartlarının etkili olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Gözenek hacmi en düşük 0,4858 cm³/g olarak belirlenmiştir. Gözenek boyutunun en düşük değeri 2,55 nm olarak tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda P/P₀=1’de azot gazı adsorpsiyon değerleri incelendiği zaman 200 °C’de hidrotermal ön işleme tabi tutulan örneklerin N₂ gazı adsorpsiyon özelliklerinin daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Fosforik asit ile aktivasyonun temel mekanizması, lignoselülozik materyallerde biyopolimerlerin depolimerizasyonu, dehidrasyonu ve bozunmasıdır (De-Yuso, 2010). Fosforik asit lignoselülozik malzemelerde parçacıklar veya çeşitli gazların oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca fosforik asit aktif karbondaki mikro ve mezo gözeneklerin genişlemesine neden olmaktadır. Fosforik asitli aktivasyon yoluyla lignoselülozik yapıdan üretilen karbonlar oldukça gözeneklidir. (Demiral ve Şamdan, 2016).

Yapılan çalışmalara baktığımızda, kabak çekirdeğinden, fosforik asit ve çinko klorür kimyasalı kullanılarak üretilen aktif karbon örneklerinin BET yüzey alanı sonuçları incelenmiştir. F200/400 aktif karbon numunesinin BET yüzey alanı sonucu 1474,5 m²/g olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın 600°C’nin üzerine çıkarılmasıyla BET yüzey alanı sonuçlarında azalma görülmüştür. Optimum sıcaklık aralığı ise 400-600 °C arası olarak belirlenmiştir (Şamdan, 2013). Hidrotermal ve piroliz yöntemleri ile yapılan bir çalışmada, okaliptüs testere talaşlarını kullanarak iki aşamalı olarak aktif karbon üretmişlerdir. Kimyasal aktivasyon ile üretilen okaliptüs testere talaşlarının BET sonuçları incelendiğinde yüzey alanının 3420 m²/g olarak elde etmişlerdir (Fuertes ve Sevilla, 2015).

Aktif Karbonların SEM Analiz Bulguları

Hidrotermal işlem sonrası aktivasyon işlemi yapılmış olan fosforik asit (H₃PO₄), ile muamele edilen bazı numunelerin SEM görüntüleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Görüntülere bakıldığında F225/400 ve F200/500 numunelerinin yüzey yapılarının daha düzenli olduğu ve krater yapıda oluşumların olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür oluşumların, kullanılan hammadde ile kimyasal madde arasında oluşan reaksiyon sırasında ortaya çıkan gaz

moleküllerinin, numunelerin iç yüzeyinden dış yüzeyine çıkarken malzeme yüzeyinde böyle bir etki bıraktığından dolayı oluştuğu gözlemlenmiştir (İnal, 2016).



Şekil 2. F225/400(a) ve F200/500(b) F225/700(c) ve F200/600 (d) örneklerine ait SEM görüntüleri

F225/400 ve F200/500'e ait SEM görüntüleri incelendiğinde F225/400'e ait yapıların daha katmanlı ve oyuklu yapılar içerdiği görülmektedir. Yüksek büyütme katmanlarında da numuneleri incelediğimizde numunelere ait gözenek oluşumları oldukça net bir şekilde görülmektedir. Fosforik asit (H_3PO_4) kimyasalı ile okaliptüs kök odunu numunesinin etkileşimlerinin ardından, okaliptüs kök odunu yapısında bulunan lignin ve hemiselüloz moleküllerinin yapısında bozunmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen bozunma sonunda herhangi bir bozunmaya uğramayan selüloz molekülleri, uygulanan aktivasyon işlemi ve karbonizasyon işlemlerinden sonra termal bozunmaya uğrayarak yapıdan ayrılmalar gerçekleşir ve bu şekilde gözenekli yapıları oluşturmaktadır (Özçiftçi, 2019). Kullanılan fosforik asit kimyasalının miktarının artırılması üretilen aktif karbon numunelerinde oluşacak olan gözenekli yapıların oluşmasına sebep olmaz. Ayrıca fosforik asitinin aşırı miktarlarda kullanılması aktif karbonun yüzeyinde bir yalıtım katmanının oluşmasına yol açmaktadır (Zhong, 2012). Hidrotermal ön işlem sonrası uygulanan piroliz işleminin ardından okaliptüs kök odunu yapısında meydana gelen termal bozunmalar sonrasında numunenin sert ve dayanıklı yapısı azalmış, bununla beraber daha çok parçalanmalar gözlemlenmiştir. Lignoselülozik atıklar ile yapılan bir çalışmada SEM analiz sonuçları incelenmiş, farklı büyütme oranlarında görüntüleri alınan numunelerin homojen yapıda ve gözenekli yapılarının oluştuğu tespit edilmiştir. Sıcaklık $500^{\circ}C$ 'den $700^{\circ}C$ 'ye artırıldığında, numunelerin gözenekli yapısının arttığı ve yarı oluşumların daha çok arttığı belirlenmiştir. Karbonizasyon sıcaklığının artırılmasıyla hammaddelerin yapısında bulunan lifli yapının bozulduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple, lifli yapının içerisinde bulunan uçucu maddeler ortamdan uzaklaşırken, gözenekli yapıların oluştuğu tespit edilmiştir (Karapınar, 2018).

Aktif Karbonların Elementel Analiz Bulguları

Aktivasyon işlemleri tamamlanan numunelerin yapısında bulunan C (karbon), O (oksijen), H (hidrojen) ve N (azot), elementlerini belirlemek amacıyla yapılan analizlerin elementel analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 4’de gösterilmiştir. Numunelerin H/C ve O/C oranlarına da bakılarak analiz sonuçları incelenmiştir.

Tablo 4. Aktif karbonların elementel analiz bulguları

	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	H/C Molar oranı	O/C Molar oranı
F225/400	62,40	3,36	0,85	33,39	0,64	0,40
F225/400	53,30	2,50	0,66	43,54	0,56	0,61
F225/600	57,60	2,93	0,84	38,63	0,61	0,50
F225/700	56,90	2,76	1,37	38,97	0,58	0,51
F200/400	64,30	3,09	1,79	30,82	0,57	0,35
F200/500	60,80	2,44	2,26	34,50	0,48	0,42
F200/600	66,30	2,55	2,48	28,67	0,46	0,32
F200/700	48,20	2,76	2,54	46,50	0,68	0,72

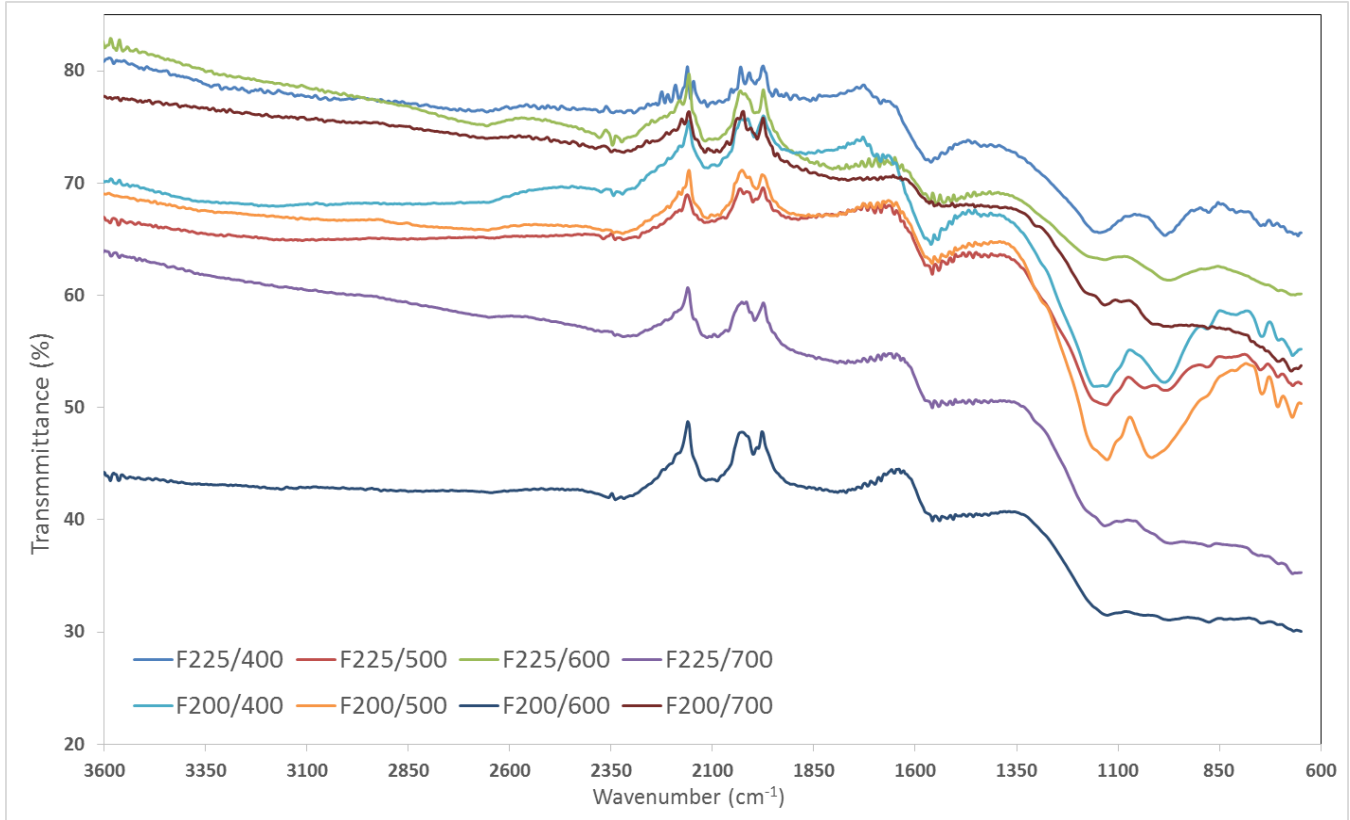
Tablo 4’de verilen değerler incelendiği zaman 225°C’de yapılan ön işlemler numuneler arasında en düşük karbon verimi F225/400 örneğine ait %53,3 olduğu görülmektedir. 225°C ön işlemler numuneler arasında hidrojen verimi en yüksek değer %3,36 olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca oksijen verimi olarak kıyaslandığında %43,54 olarak F225/400 numunesinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. 225 °C’de yapılan ön işlemler numuneler incelendiği zaman H/C oranı en yüksek F225/400 numunesinin en yüksek olduğu, ancak O/C oranında en yüksek değere F225/400 numunesinin sahip olduğu anlaşılmıştır. Azot oranı 200°C de yapılan hidrotermal ön işlemler numunelerinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca oksijen değerleri incelendiği zaman %30,82 ile 46,5 arasında değiştiği görülmüştür. Oksijen miktarı olarak en yüksek değer %46,5 olarak F200/700 örneğine ait olduğu anlaşılmıştır.

Aktif karbonların H/C oranları incelendiği zaman en yüksek değer F200/700 numunesine ait olduğu anlaşılmıştır. Tüm değerler incelendiğinde sıcaklık artışı ile birlikte örneklerin yapısındaki karbon miktarlarının artmasına karşın O, H, N miktarlarında azalma olmuştur. Yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça karbon miktarındaki artış, aromatik yapıların artmasına sebep olmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla aktif karbonun numunesinin yapısında bulunan uçucu bileşikler dönüşüme uğrar ve yapıdan ayrılırken genişlemeye uğrayarak aktif karbon numunelerinde gözenek hacminin artmasına sebep olmaktadır. Yukarıda bahsettiğimiz gibi aktif karbonun yapısında aromatik yapılar bulunmakla birlikte oksitlenmiş fonksiyonel gruplarda bulunmaktadır. Karbon miktarı ne kadar yüksekse aromatik yapılar o kadar artmaktadır. Bununla birlikte O, H, N miktarlarının yüksek olması oksitlenmiş fonksiyonel grupların yüksek çıkmasına yol açmaktadır (Karapınar, 2018). Bu özellik üretilen aktif karbon numunelerinin nerede ve hangi amaçla kullanılmasına karşın farklılık gösteren bir durumdur. Oksitlenmiş fonksiyonel grupların fazla olması üretilen aktif karbon numunelerinin adsorpsiyon kapasitesinin artması olarak düşünülmektedir. Artan sıcaklık ile beraber azalan hidrojen içeriği ile birlikte H/C oranlarında yaşanan azalma ile yapılan bir çalışmaya baktığımızda, uçucu bileşenlerin ortamdaki uzaklaşması ile birlikte karbon miktarının artmasından dolayı H/C oranlarında azalmaların olduğu gözlemlenmiştir (Karapınar, 2018). Düzenli yapıların artması ile birlikte, H/C miktarının azalması ve karbon miktarındaki artış grafit yapıların artmasına sebep olmaktadır (Köseoğlu, 2005). Bununla birlikte karbon yapıların aromatik yapıların oluşmasında ve düzenli yapıların artmasında önemli bir etken olduğu düşünülmektedir (Karapınar, 2018).

Aktif Karbonların FT-IR Analiz Bulguları

Fosforik asit (H₃PO₄) kimyasalı ile muamele edilen numunelerin FT-IR analiz sonuçlarına baktığımızda şekil 3’de de görüldüğü üzere oluşan bandlar incelendiğinde, üretilen örnekler içerisinde fonksiyonel grupların önemli miktarda azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm spektrumlar incelendiğinde aralarında belirgin farklılıklar gözlemlenmemiştir. Şekil 3 incelendiği zaman 2100 cm⁻¹ bandında örneklerde pikleri görülmektedir. 2100 cm⁻¹ oluşan bu pikler, badem kabuğu, pirinç kabukları ile yapılan çalışmalarda görülmüştür. Piklerin oluşma sebebi alkin grubu titreşimlerinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu bölgede üçlü bağ yapıları (C≡C) gözlemlenmiştir (Budinova vd., 2006; Alslaihi vd., 2013). Yapılan birçok çalışmada lignoselülozik yapıları içeren üründe; selülozik yapıların fenolik ve polifenolik O-H gruplarını içerdiği bilinmektedir. Ayrıca polisakkaritlerin O-H grupları, karbonil ve aromatik yapıda bulunan C=C grupları içerdiği bilinmektedir (Tasmakıran, 2010). Genel olarak yukarıda verilen şekillere baktığımızda 3300-

3350 cm^{-1} aralığında pik oluşumlarına rastlanılmıştır. 3335 cm^{-1} 'de görülen geniş yayvan pik nemden ve -OH içeren fenoller, alkoller ve karboksilik yapılardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Aktif karbonların FT-IR analiz eğrileri

Yapılan çalışmalara baktığımızda 2913-1300 cm^{-1} band aralığındaki pikler C-H gerilmelerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir (Özçiftçi, 2019). Şekil 3'de verildiği gibi 2921-2930 cm^{-1} 'deki bant aralıkları genelde metilen gruplarındaki C-H titreşimi ile ilişkilendirilirken, 2016 cm^{-1} 'deki bant bölgesindeki pik alkin gruplarıyla ilişkilendirilirler. 1735 cm^{-1} 'deki bant karbonil bileşiklerindeki (ketonlar, aldehytler, karboksilik bileşikler ve karbonil (C=O) gruplarıyla, 1635 cm^{-1} 'deki bant olefinik C=C titreşimi ya da doymamış alifatik yapılardaki C=C titreşimini göstermektedir. 1512 cm^{-1} 'deki bant aromatik halkanın iskelet yapısında yer alan C=C gerilimi ile, 1015 cm^{-1} 'de görünen keskin bant ise alkanlar, alkoller, fenoller, eterler, lipidlerdeki C-O ve C-C titreşimi ile ilişkilendirilmiştir (Yang ve Lua, 2003; Sricharoenchaikul vd., 2008). Şekil 3'de anlaşıldığı üzere 1735-1647 cm^{-1} aralığında piklere rastlanmıştır. Bu band aralığındaki pikler keton yapılarda bulunan C=O titreşimlerinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir (Nabais vd., 2004). 1403-1408 cm^{-1} band aralığında piklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. 1500-1400 cm^{-1} band aralığında oluşan piklere baktığımızda bu değerlerin CH_2 - yapıda gruplardan oluşmaktadır. 1300-1000 cm^{-1} aralığında rastlanan piklere baktığımızda, bu görülen pikler gerilmelerinden kaynaklı oluştuğu, yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir (Guo., 2006). 740-872 cm^{-1} değer aralığında pik oluşumları genel olarak tüm örneklerde gözlemlenmiştir. 700-900 cm^{-1} band aralığın görülen piklerin ise aromatik yapılarda bulunan C-H bağların bükülme titreşimlerinden kaynaklandığını ve her bir halkada gözlemlenen yine aromatik yapıdaki komşu hidrojen kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte karbon miktarında artış gözlemlenmiştir ve bu artış aromatik yapıların artmasına sebep olmuştur (Yang, 2007).

SONUÇ VE ÖNERİLER

Okalıptüs kök odunu örneklerinden üretilen aktif karbon numunelerinin genel özelliklerinin oldukça iyi olduğu anlaşılmıştır. Hidrotermal ön işlem sırasında sıcaklık arttıkça verimin azaldığı anlaşılmıştır. Proliz aşamasında en yüksek sonuçların F225/500 örneğinde %86,88 olarak belirlenmiştir. BET yüzey alanı sonuçlarını incelediğimizde en yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon F200/400 örneğinde 1074,4 m^2/g ve F200/600 örneğinde 1069,5 m^2/g olarak tespit edilmiştir. Üretilen aktif karbon örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde F225/400 ve F200/500 örneklerinin yüzey yapılarının daha düzenli bir şekilde olduğu görülmüş ve krater yapıda oluşumların olduğu

gözlemlenmiştir. FTIR analizine göre fonksiyonel oksitlenmiş grupların malzemenin yapısında bulunduğu anlaşılmıştır.

Ülkemizde üretimi yok denecek kadar az olan aktif karbonların atık biyokütleden üretilmesi ile hem ülke içi pazarın ihtiyacı karşılanabilir, hem de dünya pazarına ithal edilerek ülke ekonomisine katkı sağlanabilir. Aktif karbon üretimi ile ilgili hidrotomal ve piroliz karbonizasyon yöntemleriyle yeni çalışmalar yapılabilir. Bu çalışmalarda farklı sıcaklıklar ve kimyasallar kullanılarak teknik özellikleri geliştirilebilir. Ayrıca çalışmamızda kullandığımız yöntem ile ülkemizde bulunan farklı lignoselülozik atıklar ile de aktif karbon üretimi gerçekleştirilebilir.

TEŞEKKÜR

Makalenin yazılmasında ve bazı konuların yorumlanmasında Doç. Ali ŞAMİL hocaya teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- Abioye, A. M., & Ani, F. N. (2015). Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1282-1293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.129>
- Akyıldız, H. (2007). H₃PO₄ aktivasyonu ile zeytin çekirdeğinden aktif karbon üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri, Haziran.
- Alslaibi, T. M., Abustan, I., Ahmad, M. A., & Foul, A. A. (2013). A review: production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(7), 1183-1190. <https://doi.org/10.1002/jctb.4028>
- Basu P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory, Academic press, 0080961622, Boston.
- Budinova, T., Ekinci, E., Yardim, F., Grimm, A., Björnbom, E., Minkova, V., & Goranova, M. (2006). Characterization and application of activated carbon produced by H₃PO₄ and water vapor activation. *Fuel processing technology*, 87(10), 899-905. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.06.005>
- Demiral, İ., & Şamdan, C. A. (2016). Preparation and characterisation of activated carbon from pumpkin seed shell using H₃PO₄. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 17(1), 125-138. <https://doi.org/10.18038/btda.64281>
- Deng, J., Li, M., & Wang, Y. (2016). Biomass-derived carbon: synthesis and applications in energy storage and conversion. *Green chemistry*, 18(18), 4824-4854. <https://doi.org/10.1039/C6GC01172A>
- Deng, X., Zhao, B., Zhu, L., & Shao, Z. (2015). Molten salt synthesis of nitrogen-doped carbon with hierarchical pore structures for use as high-performance electrodes in supercapacitors. *Carbon*, 93, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.031>
- De-Yuso A.M., Rubio B., & Izquierdo M. T. (2014). Influence of activation atmosphere used in the chemical activation of almond shell on the characteristics and adsorption performance of activated carbons. *Fuel Process Technol*, 119:74-80. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.10.024>
- Fuertes, A. B., & Sevilla, M. (2015). Superior Capacitive Performance of Hydrochar-Based Porous Carbons in Aqueous Electrolytes. *ChemSusChem*, 8(6), 1049-1057. <https://doi.org/10.1002/cssc.201403267>
- Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2006). Physical and chemical properties of carbons synthesized from xylan, cellulose, and Kraft lignin by H₃PO₄ activation. *Carbon*, 44(8), 1464-1475. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.12.002>
- Gürses, M. K. (1992). Türkiye’de okaliptüsün orman ürünleri endüstrisindeki yeri ve önemi. I. Ulusal Orman Ürünleri Endüstri Kongresi, cilt:1, sayfa:189-195, Ankara.
- Gürten, İ. İ. İ. (2016). Biyokütle Temelli Aktif Karbonların Elektrokimyasal Çift Tabaka Kapasitörlerde Elektrot Malzemesi Olarak Kullanımı. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 266 s.
- Jain, A., Balasubramanian, R., & Srinivasan, M. P. (2016). Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283, 789-805. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.014>

Karapınar, H. S. (2018). Yenidünya (*eriobotrya japonica*) çekirdeğinden aktif karbon üretimi ve özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karaman. 192s.

Köseoğlu, E. (2005). Tarımsal Yan Ürünlerden Kimyasal Aktivasyon ile Aktif Karbon Eldesi: Karakterizasyonu ve Sulu Çözeltilerden Katyon Adsorpsiyonunun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.

MacDermid-Watts, K., Pradhan, R., & Dutta, A. (2021). Catalytic hydrothermal carbonization treatment of biomass for enhanced activated carbon: a review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2171-2186. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01134-x>

McDougall, G. J. (1991). The physical nature and manufacture of activated carbon. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 91(4), 109-120. https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2042

Nabais, J. V., Carrott, P. J. M., Carrott, M. R., & Menéndez, J. A. (2004). Preparation and modification of activated carbon fibres by microwave heating. *Carbon*, 42(7), 1315-1320. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.01.033>

Özçiftçi, Z. (2019). Fosforik asitle kimyasal aktive edilmiş atık çay çalısından aktif karbon üretimi . Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Rize . 106s.

Sricharoenchaikul, V., Pechyen, C., Aht-ong, D., & Atong, D. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from the pyrolysis of physic nut (*Jatropha curcas* L.) waste. *Energy & Fuels*, 22(1), 31-37. <https://doi.org/10.1021/ef700285u>

Stoeckli, H. F., & Kraehenbuehl, F. (1984). The External Surface of Microporous Carbons, Derived from Adsorption and Immersion Studies. *Carbon*, 22(3), 297-299. doi:Doi 10.1016/0008-6223(84)90174-X

Şamdan, A. C., (2013). Kabak Çekirdeği Kabuğundan Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi. Boya ve Ağır Metal Gideriminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Eskişehir. 193s.

Tasmakıran, A. F. (2010). Zirai Yan Ürünlerin Modifiye Edilerek Yeni Adsorbanların Hazırlanması ve Boyaların Adsorpsiyonu. e-ISSN: 2148-2683

Titirici, M. M., Thomas, A., Yu, S. H., Müller, J. O., & Antonietti, M. (2007). A direct synthesis of mesoporous carbons with bicontinuous pore morphology from crude plant material by hydrothermal carbonization. *Chemistry of Materials*, 19(17), 4205-4212. <https://doi.org/10.1021/cm0707408>

Tutuş, A., Kurt, R., Ertaş, M., Ayata, Ü, Alma, M. H. (2008). *Eucalyptus grandis* Odununun Kimyasal Bileşimi ve Termal Özellikleri. I. Ulusal Okalıptüs Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.307-313. Tarsus/Mersin.

Walker Jr, P. L. (1969). Porous carbon solids:(Edited by RL Bond) Academic Press, New York. xi+ 311 pp.

Wang, Y., Wei, L., Hou, Q., Mo, Z., Liu, X., & Li, W. (2023). A Review on Catalytic Depolymerization of Lignin towards High-Value Chemicals: Solvent and Catalyst. *Fermentation*, 9(4), 386. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040386>

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788. doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

Yang, T., & Lua, A. C. (2003). Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by physical activation. *Journal of Colloid And Interface Science*, 267(2), 408-417. doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00689-1

Zhong, Z. Y, Yang, Q., Li, X. M., Luo, K., Liu, Y., & Zeng, G. M. (2012). Preparation of peanut hullbased activated carbon by microwave-induced phosphoric acid activation and its application in Remazol Brilliant Blue R adsorption. *Ind Crops Prod* 37(1),178–185. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.015>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.03.2023
Kabul Tarihi : 02.06.2023

Received Date : 21.03.2023
Accepted Date : 02.06.2023

BETON NUMUNE ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARI İLE ÜRETİLEN BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ

Mounzer *KHIR ALLAH*¹ (ORCID: 0000-0002-1744-3858)

Zinnur *ÇELİK*^{2*} (ORCID: 0000-0001-7298-7367)

*Ahmet Ferhat BİNGÖL*³ (ORCID: 0000-0002-8798-8343)
ELEVATED TEMPERATURE EFFECTS ON CONCRETE PRODUCED WITH RECYCLING AGGREGATE OBTAINED FROM CONCRETE SPECIMENS

¹ *Dayan Beton, Kilis, Türkiye*

² *Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Erzurum, Türkiye*

³ *Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye*

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Zinnur ÇELİK, zinnur.celik@atauni.edu.tr

ÖZET

Geri dönüştürülmüş agregaların (GDA) betonda kullanılması ile doğal agrega kaynaklarının korunması, düzenli depolama talebinin azalması ve sonuç olarak sürdürülebilirlik açısından çevreye olumlu anlamda katkı sağlaması amaçlanır. Bu amaçla, GDA kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra özelliklerinin belirlenmesi için yapılan bu çalışmada; kontrol grubu haricinde, agrega olarak hazır beton laboratuvarlarında 28 günlük dayanım testine tabi tutularak kırılmış beton atıklarından elde edilen GDA'lar kullanılmıştır. GDA'lar betona %25, %50, %75 ve %100 oranında kırmataş agregası ile yer değiştirerek ikame edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, 100 mm x 200 mm boyutlarında silindirik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin birim ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin oda sıcaklığında ve 100°C, 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik sonuçları tespit edilmiştir. Sonuç olarak, beton atıklarından üretilen GDA'ların kullanımı oda sıcaklığında tespit edilen beton basınç dayanımında kayda değer bir düşüşe neden olmamıştır. GDA ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonrası (250°C, 500°C ve 750°C) basınç dayanım sonuçları, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri dönüştürülmüş agrega, dayanım, sürdürülebilirlik, kılcal geçirimsizlik, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

With the use of recycled aggregates (GDA) in concrete, it is aimed to protect natural aggregate resources, to reduce the demand for landfills, and as a result, to contribute positively to the environment in terms of sustainability. Except for the control group, during the concrete production phase, GDAs obtained from concrete wastes, which were subjected to 28-day strength test in ready-mixed concrete laboratories, were used as aggregate. GDAs were substituted for concrete by replacing 25%, 50%, 75% and 100% crushed stone aggregate. Within the scope of the experimental study, cylindrical samples of 100 mm x 200 mm dimensions were produced. The unit weights of the produced samples were determined. In addition, the compressive strength and capillary permeability results were determined after the samples were exposed to room temperature and temperatures of 100°C, 250°C, 500°C and 750°C. As a result, the use of GDAs produced from concrete wastes did not cause a significant decrease in the concrete compressive strength determined at room temperature. It was determined that the compressive strength results of the samples produced with GDA after high temperature (250°C, 500°C and 750°C) were higher than the kontrol sample.

ToCite: *KHIR ALLAH, M., ÇELİK, Z., & BİNGÖL A.F., (2023). BETON NUMUNE ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARI İLE ÜRETİLEN BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(3), 663-675.*

Keywords: Recycled aggregate, compressive strength, sustainability, capillary permeability, high temperature

GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton endüstrisi, doğal kaynakların büyük bir kısmının tüketicisi olarak kabul edilmektedir. Beton bileşenlerinin içinde en fazla paya sahip olan doğal agrega, beton kullanımının artmasıyla birlikte tüketimi de hızlı bir şekilde artmıştır (Marinković vd., 2010). İnşaat ve yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agrega (GDA), beton üretiminde kullanılan doğal agrega ile kısmen veya tamamen yer değiştirme için uygun bir malzeme olmuştur. Geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması, kireçtaşı kaynaklarının yaklaşık %60'ının korunmasına ve CO₂ emisyonunu yaklaşık %15-20 oranında azalmasına neden olabilir (Xiao vd., 2012; Guo vd., 2018). Bu nedenle, kaynakların korunması ve inşaat sektörünün sürdürülebilirliği açısından GDA kullanımı büyük önem taşımaktadır.

GDA'larla üretilen betonun, doğal agrega ile üretilen betonla aynı işlenebilirliğe sahip olması için daha fazla suya ihtiyacı vardır. GDA'lı betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü, normal agregalı betonunkinden nispeten daha düşüktür ve belirli bir su/çimento oranı için geçirgenlik ve donatı korozyon riski daha yüksektir (Padmini vd., 2009). GDA ve doğal agrega ile üretilen betonların dayanım ve durabilite açısından oluşan bu farklılıkları, GDA'ya yapışan eski harçtan kaynaklanmaktadır. GDA'ların fiziksel özellikleri, hem yapıştırılan harcın kalitesine hem de harç miktarına bağlı olarak değişmektedir (Poon vd., 2004).

GDA'ların yoğunluğu ve su emme kapasiteleri yapıştırılan harçtan etkilenmektedir. Geri dönüştürülmüş agregaların üzerinde yaklaşık %30-35 oranında çimento hamuru bulunmasından dolayı, yoğunlukları 2200 ile 2400 kg/m³ ve su emme kapasiteleri ise %5 ile %15 arasında değişkenlik göstermektedir (Poon vd., 2004). GDA ile üretilen betonun taze ve sertleştirilmiş özelliklerini kontrol edebilmek için, betonda kullanılan GDA'ların özelliklerinin önceden tespitine ihtiyaç vardır. Özellikle su emme kapasitesi, geri dönüştürülmüş agregayı doğal agregadan ayıran en önemli parametrelerden olup; betonun hem taze hem de sertleştirilmiş özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Etxeberria vd., 2007).

Harcın özellikleri ve harçtaki hidrate olmayan çimento miktarının zamanla değişmesinden dolayı (Geng vd., 2019), geri dönüştürülmüş agrega elde edilen atık betonların hizmet süresi, betonun mekanik özelliklerini etkileyen temel faktörlerden biri olmaktadır. Bu kapsamda Geng vd. (2019) çalışmalarında, geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonun basınç dayanımı, statik elastiklik modülü ve büzülme deformasyon özelliklerinin GDA'nın hizmet süresinden (1, 18 ve 40 yıl) nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada GDA, doğal kaba agrega ile %0, %30, %50 ve %100 oranında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, GDA elde edilen atık betonun servis süresi, geri dönüştürülmüş agregalı betonun basınç dayanımını kayda değer bir şekilde etkilerken, statik elastisite modülü ve büzülme üzerindeki etkisinin ise sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Demirel & Şimşek (2015) çalışmalarında, beton sınıfı C30 olan ve 7 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım testine tabi tutulan beton numune atıklarından elde edilen ince ve iri GDA'ların betonda kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, kırma agrega %0, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 oranların da GDA ile yer değiştirilmiştir. Beton örneklerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve 28 günlük elastisite modülleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, beton içindeki iri GDA miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Farklı oranlarda GDA kullanılarak üretilen betonların tamamında hedeflenen C25 sınıfı betonun basınç dayanım değeri elde edilmiştir. Batman (2018), hazır beton santrallerinde basınç dayanım testine maruz bırakılan farklı yaşlardaki numunelerin (3, 7, 28 gün) öğütülerek betonda GDA olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışma kapsamında, GDA ve kırmataş agrega ile üretilen betonların mekanik özellikleri (basınç ve eğilme dayanımı) ve su emme test sonuçları belirlenmiştir. Araştırma sonucunda, %15 ve %30 oranlarında GDA kullanılan numunelerin basınç dayanımları, kontrol betonuna kıyasla yaklaşık olarak sırasıyla %2 ve %4 oranında düşüş göstermiştir. Ayrıca kontrol betonuna göre en fazla dayanım kaybı %13 oranıyla %60 GDA kullanılan numunelerde elde edilmiştir. Sonuç olarak, %60 oranında GDA kullanımı sonucunda elde edilen betonun sınıfı C30 olarak tespit edilmiştir.

Hafif beton, yoğunluğu genellikle 2000 kg/m³'ten az olması ve ısı iletkenliğinin de 1.0 W/m²C'den az olması ile tanımlanır (Newman, 1993). Hafif beton elde etmek için farklı tür agregalar (perlit, genleştirilmiş vermikülit, pomza) kullanılmaktadır. Yaygın kullanım alanına sahip kaba ve ince pomza agregaları, daha hafif beton sağlamanın yanı sıra, betonun uzun vadede dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirilmesinde önemli etkisi bulunmaktadır.

(Hossain vd., 2011). Sancak vd. (2008), agrega olarak pomza içeren hafif ve normal betonun yüksek sıcaklık direncini karşılaştırmışlardır. Normal betondaki dayanım kaybının hafif betona göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Abbu vd., (2023), 100°C ile 450°C arasında değişen yüksek sıcaklığa maruz kalan doğal agregalı betona kıyasla pomza içeren betonların yüksek sıcaklık direncinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

GDA'nın beton üretiminde kullanımı onaylanmış olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara maruz kalan geri dönüştürülmüş agregalı betonun performansı çok az ilgi görmüştür (Bui vd., 2018). Zega & Maio (2009) çalışmalarında, %70 kaba GDA içeren betonun, GDA ve yeni harç arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin daha yüksek kalitesi nedeniyle 500°C'de doğal agregadan üretilen betondan daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Xiao & Zhang (2007), yüksek sıcaklıklarda (200–800°C), %30 GDA içeren geri dönüştürülmüş agregalı betonun artık basınç dayanımının doğal agrega ile üretilen betonunkinden daha düşük olduğunu ancak %50'den fazla GDA içeren betonda ters eğilimin bulunduğunu ortaya koymuştur. Vieira vd. (2011) çalışmalarında, %20, %50 ve %100 oranında GDA içeren betonun yüksek sıcaklıklarda ki (400°C, 600°C ve 800°C) davranışını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, GDA içeren betonun yüksek sıcaklık sonrasındaki mekanik özelliklerinin, normal betonunkinden önemli ölçüde farklılık göstermediğini tespit etmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar beton sınıfı ve yaşı belli olmayan atık betondan elde edilen GDA'lı betonların yüksek sıcaklık sonrası davranışını belirlemeye amaçlamıştır. Bu çalışma literatürden farklı olarak, beton sınıfı (C30) ve yaşı (28 gün) belli olan numunelerden elde edilen GDA'lardan üretilen betonun yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası özelliklerini tespit etmeyi hedeflemiştir. Ayrıca günümüzde yeni yapılan inşaatların özellikle kentsel dönüşüm sonrası artışı gözönüne alınırsa çok fazla sayıda atık beton numunesinin olduğu ve olacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Bu çalışma, yapısal bir yüke ve dış etkilere maruz kalmayan sınıfı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA'ların betonda kullanımının sürdürülebilirlik açısından beton teknolojisine fayda sağlayabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda, beton numunelerinden elde edilen GDA'lar betona, kırmataş agrega ile %25, %50, %75 ve %100 oranında yer değiştirilerek ikame edilmiştir. Ayrıca betona ince agrega olarak pomza kumu ilave edilerek hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Üretilen GDA'lı ve doğal kırmataş agregalı betonların birim ağırlıkları belirlenmiş ve numuneler üzerinde basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca farklı agregalardan, farklı oranlarda elde edilen numuneler 100°C, 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik sonuçları tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, GDA ile üretilen tüm numunelerde yüksek sıcaklık sonrası, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir. Sonuç olarak, yaşı ve sınıfı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA ile üretilen betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında, tüm karışımlarda kullanılan çimento cinsi CEM I 42.5R Portland çimentosudur. Çimentonun özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla 3,14 g/cm³ ve 3807 cm²/g idi. Çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Özellikler	%
SiO ₂	17,73
Al ₂ O ₃	4,56
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	62,81
MgO	2,07
SO ₃	2,9
Fiziksel Özellikler	%
Kızdırma kaybı	3,36
Çözünmeyen kalıntı	0,46

Kontrol numunesi olarak incelenen beton karışımlarında iri agregalar maksimum 16 mm boyutunda kırmataş agregası kullanılmıştır. Kırmataş agregasının özgül ağırlığı ve su emmesi sırasıyla 2.68 g/cm^3 ve %0.41 olarak belirlenmiştir. GDA temin edilecek beton küp numuneler çeneli kırıcı kullanılarak birincil kırma işlemine tabi tutulmuş ve kırımdan sonra elde edilen agregalar elenerek 4–16 mm aralığındaki kısmı kullanılmıştır. Elde edilen GDA'lar normal agregaya kıyasla daha keskin ve düzdü. Ayrıca kırımın etkisinden dolayı GDA'ya yapışık olan harcın çok az bir kısmı kaybolmuştu. Geri dönüştürülmüş beton üretiminde kullanılan GDA'nın en büyük tane boyutu 16 mm, özgül ağırlığı 2.48 g/cm^3 ve su emmesi %5.62 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada ince agregalar olarak özgül ağırlığı 1.66 g/cm^3 ve su emmesi %14.5 olarak belirlenen pomza kumu kullanılmıştır.

Numune Karışım Oranları

Bu çalışmada, kontrol ve GDA'lı beton karışımlarının karışım kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm karışım numuneleri 0,46 su/çimento oranında dökülmüştür. Tüm karışım gruplarında çimento miktarı 465 kg olarak kullanılmıştır. İri agregalar ve kumun hacimsel oranları sırasıyla %50 ve %50 olarak belirlenmiştir. GDA'lı gruplarda kırmataş agregası (KTA) yerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GDA ikame edilerek beton numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere kodlama yapılırken kullanılan agregalar ve karışımdaki oranı şeklinde yazılmıştır.

Tablo 2. Beton Karışım Oranları

Karışım kodu	Çimento (kg/m^3)	İnce agregalar (kg/m^3)	GDA (kg/m^3)	KTA (kg/m^3)	Su (kg/m^3)
Kontrol	465	510,74	0	824,58	214
GDA25	465	510,74	190,76	618,43	214
GDA50	465	510,74	381,52	412,29	214
GDA75	465	510,74	572,28	206,14	214
GDA100	465	510,74	763	0	214

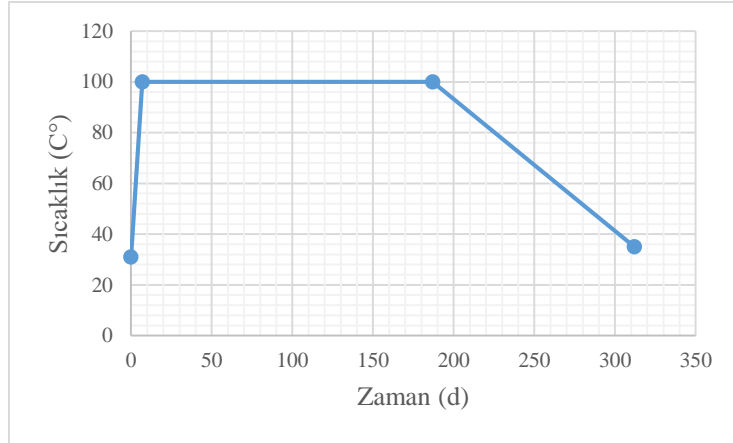
DeneySEL Yöntemler

DeneySEL çalışma, agregalar tipi ve hacim fraksiyonlarının betonun işlenebilirlik parametreleri, basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik ve yüksek sıcaklık üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Beton karışımları 60 dm^3 kapasiteli laboratuvar mikserinde üretilmiştir. Basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri için $100 \times 200 \text{ mm}$ boyutunda silindirik numuneler hazırlanmıştır. Silindirik numuneler, TS EN 12390-2 (2019)'de belirtilen şekilde hazırlanmış ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı için kullanılacak oda sıcaklığındaki numunelere 28 günlük kür süresinden sonra TS EN 12390-3 (2019)'e uygun olarak kükürt başlıklama işlemi yapılmış (Şekil 1) ve sonrasında dayanım testine maruz bırakılmıştır.

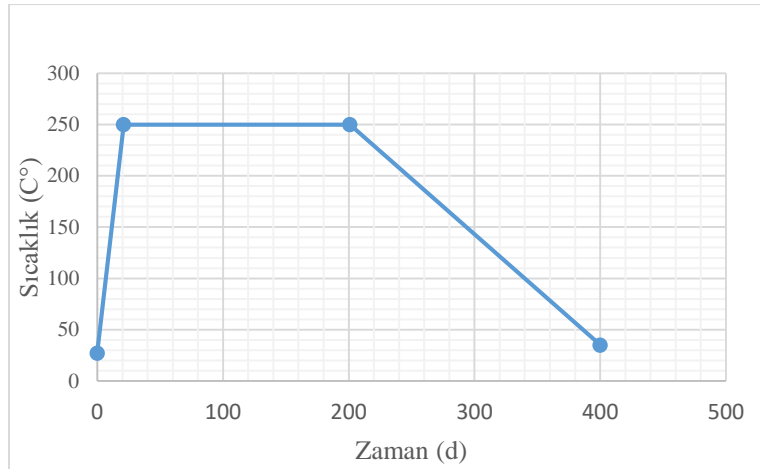


Şekil 1. Silindir Numunelerin Başlıklama İşlemi

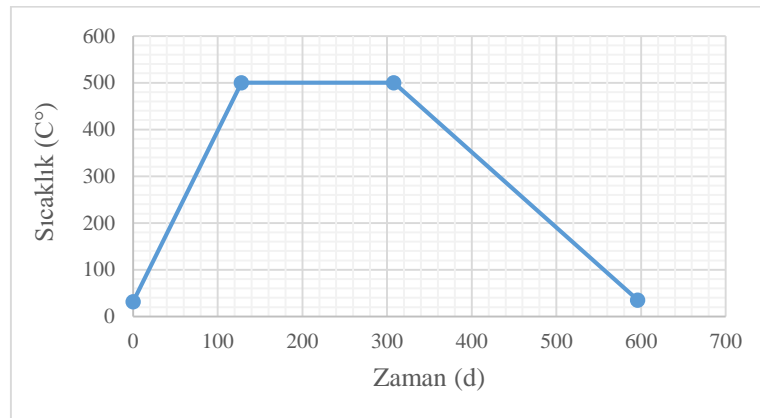
28 günlük kürelemeden sonra, 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C’de yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) standardına göre elde edilmiştir. 1200 °C’ye kadar ısıtma kapasitesine sahip elektrikli fırın ile yüksek sıcaklık sağlanmıştır. Fırında hedeflenen sıcaklık elde edildikten sonra, numunelerin sıcaklığını homojenleştirmek için 3 saat hedeflenen sıcaklıkta bekletilmiştir. Numuneler daha sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakıldı ve sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Hedeflenen her bir sıcaklık için sıcaklık – zaman grafiği 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te sunulmuştur.



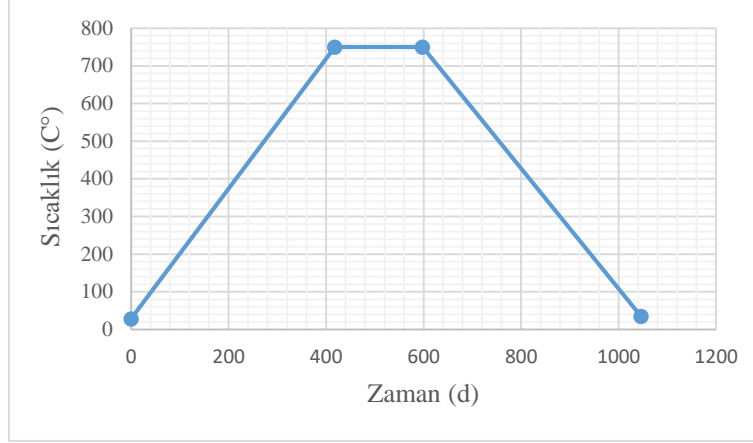
Şekil 2. 100 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 3. 250 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 4. 500 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 5. 750 °C için sıcaklık – zaman grafiği

Kılcal geçirimsizlik, harcın / betonun iletken suyu kılcal yolla emme ve iletme eğilimini gösteren en kolay testlerden biri olarak bilinir. Kılcal geçirimsizlik, beton dayanıklılığını belirleyen geçirimsizlik ile ilgili önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, oda sıcaklığına ve 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan betonların 24 saatlik süreç sonucundaki kılcal geçirimsizlikleri ASTM C1585 standardına uygun olarak ölçülmüştür.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Taze Beton Özellikleri

İşlenebilirlik

Çalışma kapsamında, kırmataş agregası ve GDA ile hazırlanan taze beton numuneleri üzerinde TS EN 12350-2 (2019) standardına uygun olarak çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyine ait sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

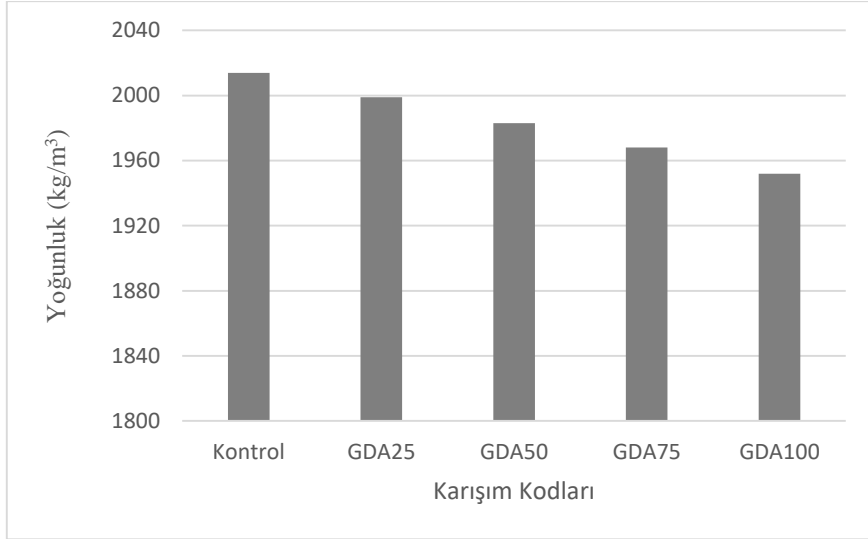
Tablo 3. Beton Karışımlarının Çökme Miktarları

Karışım tipi	Kontrol	GDA25	GDA50	GDA75	GDA100
Çökme miktarı (cm)	6	5,9	5,9	5,8	5,8

Deney sonuçları incelendiğinde, GDA100 karışım numunesindeki çökme değerinde, kontrol numunesi göre yaklaşık %3.33 değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, karışımlardaki GDA oranının artmasının çökme değerleri açısından önemli bir değişime neden olmadığını göstermektedir. GDA içeren betonun işlenebilirliğinin azalması, GDA'nın daha yüksek su emme kapasitesine, daha pürüzlü ve düzensiz yüzeylerine atfedilebilir (Kurda vd., 2017). Bazı durumlarda, GDA'nın uygun şekilde kullanılması ve betonun uygun şekilde tasarlanması, GDA ile üretilen betonların işlenebilirliğinde önemli bir değişikliğe sebep olmaz. Örneğin, GDA, beton üretim aşamasında doygun kuru yüzey durumunda kullanılması halinde normal agregalı betona benzer işlenebilirlik elde edilebilir (Brand vd., 2015).

Birim Hacim Ağırlık

Karışım numunelerinin taze beton birim hacim ağırlık sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Farklı oranlarda GDA içeren karışım numunelerinin yoğunlukları 1952 kg/m³ ile 2014 kg/m³ arasında değişiklik göstermiştir.



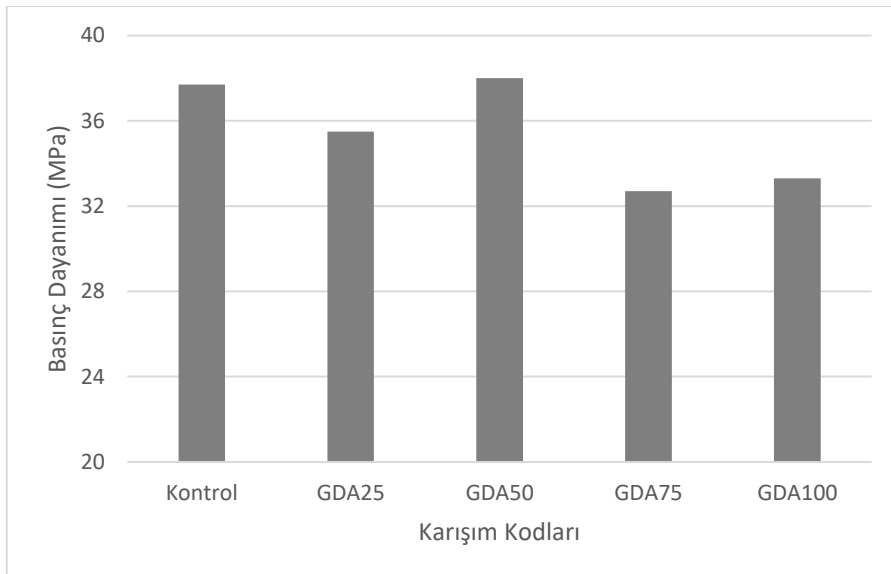
Şekil 6. Farklı Miktarda GDA İçeren Betonun Yoğunluğu

Karışımlarda kullanılan GDA miktarı arttıkça betonun yoğunluğunda azalmalar meydana gelmiştir. %75 ve %100 GDA ile ikame edilen geri dönüştürülmüş beton karışımların yoğunluk değerlerinde, %100 normal kırmataş agregası ile üretilen betona kıyasla sırasıyla %2.28 ve %3.8 oranında azalma elde edilmiştir. Xiao vd. (2005) çalışmalarında, %100 iri GDA içeren beton yoğunluğunun, %100 normal agregası ile üretilen betonlara göre yaklaşık %5 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Etxeberria vd. (2007), iri doğal agreganın tamamı iri GDA ile değiştirildiğinde betonun yoğunluğunun yaklaşık %3.3 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Marinković vd. (2010), normal agreganın %65'ini değiştirmek için üç farklı GDA fraksiyonu kullandı ve kontrol betonuna kıyasla %4.7 ile %4.9 arasında daha düşük yoğunluklu geri dönüştürülmüş beton elde etmişlerdir. Betonda artan miktarda GDA kullanımı, geri dönüştürülmüş agregası içeren betonun yoğunluğunun azalmasına katkıda bulunmuştur. Bu durum, GDA'nın daha düşük özgül ağırlığı ve üzerindeki yapıştırılmış eski harçtan kaynaklanmaktadır.

Sertleştirilmiş Beton Özellikleri

Basınç Dayanımı

Bu çalışmada, basınç dayanımı 28 günlük 100 mm x 200 mm boyutlarında 3 silindir numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Normal kırmataş agregası ve GDA ile üretilen beton karışımlarının oda sıcaklığındaki ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Numune Karışımlarının Basınç Dayanımları

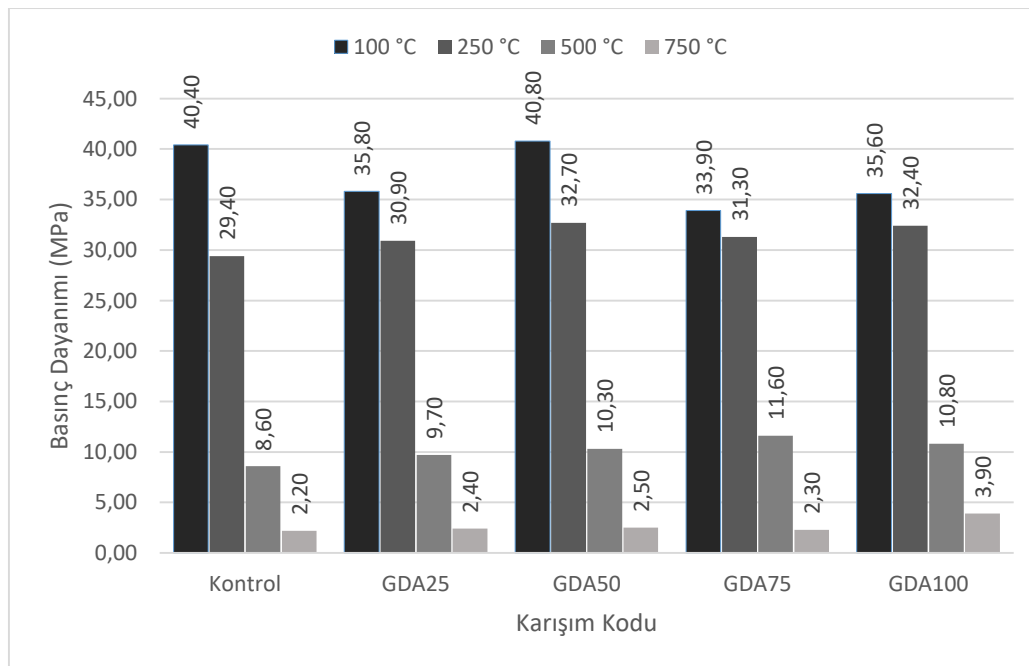
Basınç dayanımı sonuçlarına göre, kırmataş normal agregası ile üretilen beton numunesinin dayanım değeri 37.7 MPa olarak belirlenmiştir. GDA75 ve GDA100 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde, kontrol numunesine kıyasla %13.26 ve %11.67 oranlarında azalma meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 38 MPa ile GDA50 karışımından elde edilirken, en düşük dayanım değeri 32.7 MPa ile GDA75 serisinde hesaplanmıştır. GDA'nın yüzeylerinde eski harcın bulunmasından dolayı GDA daha düşük yoğunluğa sahip olmaktadır. Bu durum, geri dönüştürülmüş betonun daha düşük basınç dayanımına katkıda bulunur (Kurda vd., 2017). GDA ile yapılan betonun daha düşük basınç dayanımı, matriste iki tip ara yüzey geçiş bölgesinin varlığına atfedilebilir. Ara yüzey geçiş bölgesi, agregası ve hamur arasındaki bağı temsil eder ve normalde agregası veya hidratlı çimento hamurundan daha zayıftır. Doğal agregası ile yapılan betonda, ara yüzey geçiş bölgesi agregası ile harç arasında oluşurken, GDA içeren betonda, orijinal agregası ile eski harç ve yeni harç arasında yer alır (Etxeberria vd., 2007; Kou vd., 2011; Verian vd., 2018).

Bu çalışma kapsamında, %75 ve %100 oranında GDA ile üretilen numunelerin basınç dayanımında kayda değer bir düşüş meydana gelmiştir. Ancak GDA50 karışımının referans numuneye kıyasla dayanımında çok az bir artış elde edilmiştir. Bu durum, çalışmada kullanılan GDA'nın, 28 günlük erken yaştaki beton numunelerinden temin edilmesine bağlanabilir. Geng vd. (2019) araştırmalarında, %100 GDA kullanılan karışımlarda, 1 yaşındaki GDA kullanılarak üretilen geri dönüştürülmüş beton, 28 günlük 38.9 MPa'lık bir basınç dayanımı sergilemiş ve kontrol numunesine göre yalnızca %1 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 18 yıllık ve 40 yıllık GDA ile yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımı ise kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %23–34 azalma meydana gelmiştir.

Ana betondaki harç ve ara yüzey geçiş bölgeleri, ıslanma-kurumadan kaynaklı aşınma döngülerine ve klorür girişi ve karbonatlaşma gibi erozyonun birleşik etkilerinden dolayı zamanla bozulur (Xiao vd., 2013; Maruyama vd., 2014). Bu bağlamda, daha uzun hizmet süresine sahip GDA, daha zayıf artık harç ve ara yüzey geçiş bölgeleri içerir ve bu da üretilen betonda daha düşük basınç dayanımı elde edilmesine yol açar.

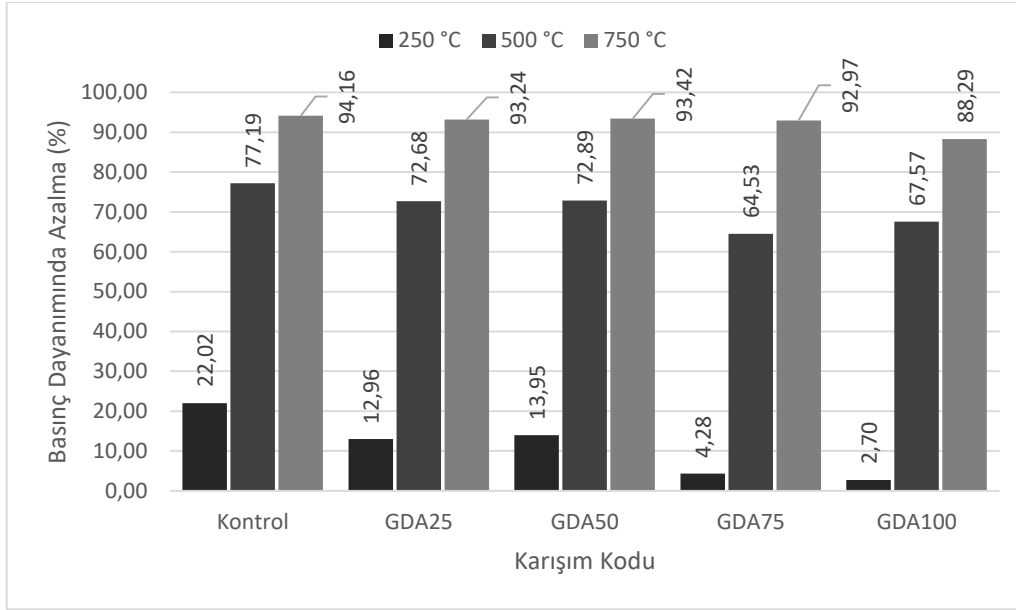
Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan karışım numunelerine ait basınç dayanımı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. 100 °C sıcaklığa tabi tutulan tüm numunelerin dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 100 °C'de en yüksek basınç dayanımı 40.8 MPa ile GDA50, en düşük dayanım değeri ise 33.9 ile GDA75 serisinden elde edilmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda hidrate olmayan çimento parçacıkları ile kireç arasındaki reaksiyondan dolayı tobermorit oluşumundan kaynaklanabilir (Hossain, 2006; Uysal & Tanyıldızı, 2012).



Şekil 8. Numune Karışımlarının Basınç Dayanımları

Ayrıca, meydana gelen bu dayanım artışı, kılcal boşluklardaki su içeriğinin buharlaşması nedeniyle jel partikülleri arasındaki kuvvetlerdeki (Van der Walls) artışa bağlanabilir (Behnood & Ziari, 2008). Beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, numunelerin basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Sertleştirilmiş numunelerin orijinal dayanımlarına kıyasla basınç dayanımlarındaki azalmalar Şekil 9'da gösterilmiştir. 250 °C'de numunelerin basınç dayanımdaki azalma değerleri, kontrol, GDA25, GDA50, GDA75 ve GDA100 için sırasıyla %22.02, %12.96, %13.95, %4.28 ve %2.70 olarak bulunmuştur. GDA ile üretilen tüm numunelerde, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 9. 250 °C, 500 °C ve 750 °C'de Basınç Dayanımlarındaki Azalmalar

500 °C'de numunelerin basınç dayanımdaki azalma değerleri, kontrol, GDA25, GDA50, GDA75 ve GDA100 için sırasıyla %77.19, %72.68, %72.89, %64.53 ve %67.57 olarak hesaplanmıştır. 250 °C'de ki sonuçlara benzer şekilde, 500 °C'ye maruz bırakılan numunelerden basınç dayanım değerinde en fazla düşüş kontrol numunesinde meydana gelmiştir. 750 °C'ye tabi tutulan beton numunelerin dayanım sonuçlarının incelenmesi sonucunda, tüm serilerin dayanım değerlerinde önemli düşüşler elde edilmiştir. Basınç dayanımı açısından en az düşüş %88.29 ile GDA100 serisinden elde edilirken, en fazla düşüş %94.16 ile kontrol numunesinde tespit edilmiştir. GDA25, GDA50 ve GDA100 serilerindeki düşüş miktarları ise sırasıyla %93.24, %93.42 ve %92.97 olarak hesaplanmıştır. 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda, GDA kullanılan serilerin basınç dayanımı değerleri, kontrol numunesine kıyasla daha yüksektir. Bu durum, geri dönüştürülmüş agreganın çimentolu matris ile daha iyi termal uyumluluk göstermesine bağlanabilir. Ayrıca, GDA ve kırmataş agregaların su emme miktarları göz önüne alındığında, beton içerisinde ki kılcal boşluklarda bulunan serbest su miktarının GDA içeren betonlarda daha düşük olacağı düşünülebilir. Kontrol numunelerinin, GDA'lı beton numunelerine kıyasla daha fazla dayanım kaybı, kılcal çatlaklarda bulunan daha fazla miktarda ki suyun buharlaşması ile meydana gelen çatlak artışına atfedilebilir.

Vieira vd. (2011) çalışmalarında, %20, %50 ve %100 GDA içeren geri dönüştürülmüş betonun yüksek sıcaklıklarda (400°C, 600°C ve 800°C) davranışını değerlendirmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş betonun yüksek sıcaklık sonrası mekanik özelliklerinin normal betondan önemli ölçüde farklı olmadığını göstermiştir. Laneyrie vd. (2016), yüksek sıcaklıklarda geri dönüştürülmüş betonun artık dayanımının, normal agregaya içeren betondan biraz düşük olduğunu kanıtlamıştır. Zega & Maio (2009) çalışmalarında, yüksek sıcaklığa tabi tutulan farklı yüzdelerde GDA içeren geri dönüştürülmüş betonun özelliklerini araştırmıştır. %70 kaba GDA içeren betonun, GDA ve yeni harç arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin daha yüksek kalitesi nedeniyle, 500°C'de normal agregalı betona kıyasla daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Xiao ve Zhang (2007), yüksek sıcaklıklarda (200–800°C), %30 GDA içeren betonun artık basınç dayanımının normal agregadan üretilen betondan daha düşük olduğunu, ancak %50'den fazla GDA içeren betonlarda ters eğilimin bulunduğunu ortaya koymuşlardır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan örnek bir seriye ait renk ve görsel değişim Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Sıcaklık Değişimlerine Göre Numunelerde Meydana Gelen Görsel Değişim

Kılcal Su Emme

Kılcal su emme testi, gözenekli yapının karakterizasyonuna izin verir ve beton dayanıklılığının bir göstergesidir. Karışım serilerine ait yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası kılcal su emme sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Betonlarda farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega kullanımının (GDA50, GDA75 ve GDA100) betonun kılcal su emmesinin azalmasına neden olmuştur. %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega ikame edilen betonun oda sıcaklığındaki kılcal su emme değerinde, kontrol numunesine kıyasla %11.1 oranında düşüş tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %100 lük GDA ikame oranında, geri dönüştürülmüş betonların su emmesi 500 °C ve 750 °C’de referans betondan sırasıyla %6 ve %2.42 daha yüksektir. Kou vd. (2014) çalışmalarında, yüksek sıcaklığa maruz kalan (500 °C) GDA’lı numunelerin kılcal su emme değerlerinin, normal agregalı betona kıyasla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun nedeni, geri dönüştürülmüş agreganın, kırmataş agregasına kıyasla daha fazla su emme ve gözeneklilik kapasitesi olabilir. Ayrıca, GDA’lı beton numunelerinde ki daha fazla harç miktarında atfedilebilir.

Tablo 4. Karışım Serilerine Ait Kılcal Su Emme Değerleri

Sıcaklık Değerleri	Oda Sıcaklığı	100 °C	250 °C	500 °C	750 °C
Karışım Kodları	Kılcal Su Emme (%)				
Kontrol	0,18	0,19	0,61	9,50	18,96
GDA25	0,19	0,22	0,87	8,44	18,13
GDA50	0,14	0,25	0,61	9,47	18,04
GDA75	0,13	0,19	0,72	8,65	19,80
GDA100	0,16	0,26	1,03	10,07	19,42

SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapısal bir yüke ve dış etkilere maruz kalmayan sınıfı ve yaşı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA’lı betonların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası davranışı incelenmiştir.

Erken yaş beton atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geri dönüştürülmüş betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Karışımlarda kullanılan GDA miktarı arttıkça betonun yoğunluğunda azalmalar meydana gelmiştir. %75 ve %100 GDA ile ikame edilen geri dönüştürülmüş beton karışımların yoğunluk değerlerinde, %100 normal kırmataş agregası ile üretilen betona kıyasla sırasıyla %2.28 ve %3.8 oranında azalma elde edilmiştir.

Yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımı sonuçlarına göre, kırmataş normal agregası ile üretilen beton numunesinin dayanım değeri 37.7 MPa olarak belirlenmiştir. GDA75 ve GDA100 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde, kontrol numunesine kıyasla %13.26 ve %11.67 oranlarında azalma meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 38 MPa ile GDA50 karışımından elde edilirken, en düşük dayanım değeri 32.7 MPa ile GDA75 serisinde hesaplanmıştır.

GDA ile üretilen tüm numunelerde yüksek sıcaklık sonrası, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir. 100 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan serilerin tamamının basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, numunelerin basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. 750 °C'ye tabi tutulan beton numunelerin dayanım sonuçlarının incelenmesi sonucunda, tüm serilerin dayanım değerlerinde önemli düşüşler elde edilmiştir. Basınç dayanımı açısından en az düşüş %88.29 ile GDA100 serisinden elde edilirken, en fazla düşüş %94.16 ile kontrol numunesinde tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abbu M., Al-Attar A.A., Abd Alrahman S., Al-Gburi M. (2023). The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures. *J. Mech. Behav. Mater.*, 32. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0249>

ASTM C1585 – 13. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.

Batman, M. (2018). Beton deney numune atıklarının geri dönüşüm agregası olarak betonda kullanılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum 78 s.

Behnood A. & Ziari H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>.

Brand A.S., Roesler J.R., Salas A. (2015). Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 79, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.047>.

Bui N.K., Satomi T., Takahashi H. (2018). Effect of mineral admixtures on properties of recycled aggregate concrete at high temperature, *Construction and Building Materials*, 184, 361-373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.237>.

Demirel C. & Şimşek O. (2015). Erken Yaşdaki Atık Betonların Geri Dönüşüm Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılabilirliği ve Sürdürülebilirlik Açısından İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 226-235.

Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.

Geng Y., Wang Q., Wang Y., Zhang H. (2019). Influence of service time of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 52. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1395-0>

Guo H., Shi C., Guan X., Zhu J., Ding Y., Ling T-C., Zhang H., Wang Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 2018, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>.

Hossain K.M.A. (2006). High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 28, 535-545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>.

Hossain K.M.A., Ahmed S., Lachemi M. (2011). Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25, 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036>.

Kahanji C., Ali F., Nadjai A., Alam N. (2018). Effect of curing temperature on the behaviour of UHPFRC at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 182, 670-681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.163>.

Kou S.C., Poon C.S., Etxeberria M. (2014). Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 53, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.001>.

Kou S., Poon C., Agrela F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33, 788-795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>.

Kurda R., Brito J., Silvestre J. D. (2017). Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 84, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.009>.

Laneyrie C., Beaucour A-L., Green M.F., Hebert R.L., Ledesert B., Noumowe A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>.

Marinković S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30, 2255-2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.

Maruyama I., Sasano H., Nishioka Y., Igarashi G. (2014). Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90°C. *Cement and Concrete Research*, 66, 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.016>.

Newman J.B. (1993). Properties of structural lightweight aggregate concrete. J.I. Clarke (Ed.), *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Chapman & Hall, London, 19-44.

Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 829-836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>.

Poon C.S., Shui Z.H., Lam L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.

Sancak E., Sari Y. D., Simsek O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*. 30, 715-721. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.004>.

TS EN 12350-2. (2019). Beton – Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-2. (2019). Beton – sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-3. (2019). Beton – sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uysal M.& Tanyildizi H. (2012). Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, 27, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.028>.

Verian K.P., Ashraf W., Cao Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>.

Vieira J.P.B., Correia J.R., Brito J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002>.

Xiao J., Li J., Zhang Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35, 1187-1194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>.

Xiao J., & Zhang C. (2007). Fire damage and residual strengths of recycled aggregate concrete. *Key Eng Mat*, 348–349, 937-940. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.937>

Xiao J.J., Li W.G., Fan Y.H., Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construct. Build. Mater.*, 31, 364-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>.

Xiao J., Li W., Sun Z., Lange D.A, Shah S.P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 37, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006>.

Zega C.J., Di Maio A.A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 23, 2047-2052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017>.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.04.2023
Kabul Tarihi : 06.06.2023

Received Date : 14.04.2023
Accepted Date : 06.06.2023

SİVAS İLİ TARIMSAL ATIKLARININ BİYOKÜTLE ENERJİSİ POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ VE SAYISAL HARİTALARININ OLUŞTURULMASI

DETERMINING THE BIOMASS ENERGY POTENTIAL OF AGRICULTURAL WASTES IN SIVAS AND CREATING DIGITAL MAPS

Ayben POLAT BULUT* (ORCID: 0000-0003-0151-8680)

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Sivas, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayben POLAT BULUT, aybenpolat@cumhuriyet.edu.tr

ÖZET

Enerji, insanoğlunun hayatını devam ettirebilmesi için gerekli olan zorunlu ihtiyaçlardan biridir. Ancak günümüzdeki hızlı kentleşme, sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte mevcut enerji kaynakları gün geçtikçe azalmaktadır. Bu nedenle, biyokütle enerjisi de son dönemlerde dikkat çeken sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur. Biyokütle enerjisi tarımsal, hayvansal, ormansal ve kentsel atıklardan elde edilen yenilenebilir, temiz, çevre dostu ve ekonomik bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada 2022 yılında Sivas ili için tarımsal atıklardan elde edilebilecek elde edilebilir enerji potansiyeli (EEP) TUIK verileri kullanılarak hesaplanmış ve ArcGIS programı kullanılarak hazırlanan sayısal haritalar ile sunulmuştur. Tarımsal atıklardan Sivas ili için toplam 4017 TJ EEP' nin temin edilebileceği bu enerji ile de Sivas' ın nüfusunun % 48' inin enerji ihtiyacının karşılanabileceği belirlenmiştir. Tarımsal atıklardan temin edilen en yüksek EEP' ye sahip ilçenin Şarkışla olduğu görülmüştür. Tarımsal atık kaynaklı biyokütleden üretilen enerji ile Sivas' ın enerji ihtiyacının % 70' inden fazlasının karşılanabileceği belirlenmiştir. Sivas' ta üretilen tarımsal ürünler arasında EEP' ye % 33 ile en büyük katkıya ise buğdayın sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle enerjisi, Sivas, tarımsal atık

ABSTRACT

Energy is one of the obligatory needs for human beings to continue their lives. However, with today's rapid urbanization, industrialization and population growth, available energy resources are decreasing day by day. For this reason, biomass energy has become one of the sustainable and renewable energy sources that have attracted attention recently. Biomass energy is a renewable, clean, environmentally friendly and economical energy source obtained from agricultural, animal, forestry and urban wastes. In this study, the obtainable energy potential (EEP) that can be obtained from agricultural wastes for Sivas province in 2022 was calculated using TUIK data and presented with digital maps prepared using ArcGIS program. It has been determined that a total of 4017 TJ EEP for Sivas province can be obtained from agricultural wastes, and with this energy, the energy needs of 48% of Sivas's population can be met. The district with the highest EEP obtained from agricultural wastes is Şarkışla. It has been determined that more than 70% of Sivas's energy needs can be met with the energy produced from biomass originating from agricultural waste. Among the agricultural products produced in Sivas, it has been observed that wheat has the biggest contribution with 33% to the EEP.

Keywords: Biomass energy, Sivas, agricultural waste

GİRİŞ

Enerji, insan hayatında vazgeçilmez bir role sahiptir (Desta vd., 2020). Nüfus artışı ve ekonomik gelişmeye bağlı olarak küresel enerji talebi hızla artmakta ve bu talebin yaklaşık % 88' i fosil yakıtlara dayanmaktadır (Desta vd., 2020; Achinas vd., 2017). Küresel enerji ihtiyacına en büyük katkıyı ise toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 18,1' ine karşılık gelen temiz ve yenilenebilir enerji kaynakları yapmaktadır (Desta vd., 2020). Fosil yakıt kullanımı, atmosfere sera gazları (GHG) ve özellikle karbondioksit (CO₂) saldıdığı için önemli bir küresel endişe kaynağıdır. Karayolu taşımacılığı için petrol tüketimi şu anda en büyük CO₂ emisyonu kaynağıdır ve dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının % 23' ünden sorumludur (Ben-Iwo, 2016). Fosil yakıtların sürekli kullanımı ve sera gazlarının (GHG' ler) çevre üzerindeki etkisi, biyolojik kaynaklardan alternatif yakıt üretimine yönelik araştırma çabalarını başlatmıştır (Achinas vd., 2017). Artan enerji talebi, fosil yakıtların yüksek maliyetleri, azalan fosil yakıt rezervleri ve fosil yakıt kullanımının sera etkisine katkısı sonucunda biyokütle, fosil yakıtlara temiz bir alternatif enerji kaynağı olarak küresel açıdan giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Duku vd., 2011).

Biyokütle, bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen tüm organik maddeler için kullanılan bir terimdir. Biyokütle kaynakları arasında odun ve odun atıkları, tarımsal ürünler ve bunların yan ürünleri, kentsel katı atıklar, hayvansal atıklar, gıda işleme atıkları, su bitkileri ve algler bulunur. Ekonomik ve çevresel değerleri nedeniyle bu kaynaklar için rekabet eden kullanımlar vardır. Biyokütle, güç, ısı ve buhar üretmek ve ulaşım yakıtlarının üretimi için kullanılabilir. Ayrıca gıda işleme, hayvan yemi ve ağaç işleme endüstrileri tarafından da kullanılır (Duku vd., 2011). Biyokütle enerjisi klasik ve modern olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Klasik biyokütle enerjisi ormanlardan elde edilen odunun pişirme ve ısınma gibi kullanımlar için doğrudan yakılmasıdır. Modern biyokütle enerjisi ise odun, tarımsal atıklar, hayvansal atıklar, organik atıklar gibi biyokütle kaynaklarının piroliz, fermantasyon, gazlaştırma gibi teknolojiler ile ısı ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve ayrıca sıvı ve gaz yakıtlar elde edilmesidir (Aybek vd., 2015). Biyokütle, önemli bir alternatif enerji kaynağıdır ve kirlilik ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel sorunlara yol açmaz. Yaygın olarak bulunur ve nispeten kısa sürede yenilenir (Kory's vd., 2019). Küresel olarak, temiz enerjiye olan artan talep, azalan yakıt rezervleri ve ham petrole bağımlılığın azaltılmasına yaptığı katkı nedeniyle, biyokütle enerjisi fosil yakıtların uygun ikamesi olarak her zamankinden daha da çekici hale gelmektedir. Biyokütle enerjisi, petrol üreten ülkelere bağımlılığı azaltır ve istihdam yaratarak ek gelir kaynağı sağlar ve kırsal ekonomileri destekler (Ben-Iwo, 2016).

Biyogaz, yanıcı bir metan gazı üretmek için insan atıkları, hayvan atıkları ve kentsel atıkları kullanan yenilenebilir bir enerji teknolojisidir (Desta vd., 2020). Biyogaz, ısı ve güç üretmek için geleneksel yakıtların yerini alabilen çok taraflı bir yenilenebilir enerji kaynağıdır; ayrıca otomobillerde gaz yakıt olarak da kullanılabilir (Achinas vd., 2017). Aynı zamanda temiz ve yenilenebilir bir enerjidir ve % 60 - 70 metan (CH₄) ve % 30 - 40 karbondioksit (CO₂), % 1-5 hidrojen ve eser miktarda nitrojen, hidrojen sülfid, oksijen ve su buharı içerir. Biyogaz, anaerobik parçalanma sürecinde oksijen yokluğunda biyolojik olarak parçalanabilir malzemeler üzerinde hareket eden metanojenik bakteriler tarafından üretilir. İklim değişikliğine neden olan sera gazı emisyonlarının çevresel etkilerinin en aza indirilmesine katkıda bulunur. (Desta vd., 2020). 1 m³ biyogaz enerjisinin 4700-5700 kcal.m⁻³ arasında ısı enerjisi sağlamaktadır. 1 m³ biyogaz enerjisi; 0,62 litre gazyağı, 1,46 kg odun kömürü, 3,47 kg odun, 0,43 kg bütan gazı, 12,3 kg tezek ve 4,70 kWh elektrik enerjisi eşdeğerindedir. Ayrıca 1 m³ biyogaz enerjisine 0,66 litre motorin, 0,75 litre benzin ve 0,25 m³ propan eşdeğerdir (Demir vd., 2018). 1 GWh enerji üretimi için kömür, doğalgaz ve biyokütle kullanılması durumunda sırasıyla 888 ton CO₂/GWh, 499 ton CO₂/GWh ve 26 ton CO₂/GWh CO₂ emisyonları oluşmaktadır (Erdoğan, 2020) ve biyokütlenin kömürden 34 kat ve doğalgazdan 19 kat daha az sera gazı emisyonu yaydığı ve küresel ısınmaya daha az katkı sağladığı görülmektedir.

Bu çalışmada, 2022 yılı için Sivas ilinde bazı tarımsal atıklardan elde edilebilecek biyokütle enerjisi her ilçe için ayrı ayrı hesaplanarak bölgesel dağılımı belirlenmiş ve sayısal haritalar ile ifade edilmiştir. Tarımsal atık kaynaklı biyokütlenin ilin enerji ihtiyacına katkısı belirlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışma uygulamaya geçirildiği durumda hem atıklar çevre için bir tehdit oluşturmadan değerlendirilerek geri kazanılmış olacak hem de çevre dostu bir enerji kaynağı olan biyogaz enerjisi üretilmektedir. Böylelikle hem fosil yakıtların meydana getirdiği çevre kirliliği önlenmiş, doğal kaynaklar korunmuş olacak hem de kısmen de olsa fosil yakıtların tükenmesinin önüne geçilecektir

MATERYAL VE METOD

Çalışma Alanı

Sivas yüz ölçümü bakımından Türkiye' nin en büyük ikinci ilidir (Belen vd., 2020) ve ülke topraklarının yaklaşık % 3,67' sine sahiptir (Bulut ve Canbaz, 2022). Şekil 1' de görüldüğü gibi ilin merkez ilçesiyle birlikte toplam 17 ilçesi bulunmaktadır (Bulut ve Canbaz, 2019). Sivas 2.848.000 ha, yüzölçümüne sahiptir. Bu alanın 805.209 hektarı işlenen tarım arazisidir. (Bulut, 2016). Sivas ili, % 43'ü tarım, % 42'si çayır-mera, % 12'si orman ve fundalık ve % 3'ü de tarım dışı alanlardan oluşmaktadır (Altuntaş ve Aslan, 2019). İç Anadolu Bölgesi' nin Yukarı Kızılırmak bölümünde yer alan Sivas 35° 50' ve 38° 14' doğu boylamları ile 38° 42' ve 40° 16' kuzey enlemleri arasında bulunmaktadır (Bulut, 2023). Genellikle engebeli bir topoğrafyaya sahip olup 1200-1500 m deniz seviyesinden yüksekliktedir (Bulut, 2023; Karakuş vd., 2015). İl genelinde karasal iklim hakimdir (Bulut, 2023; Bulut ve Canbaz, 2022) ve kış mevsimi genellikle kar yağışlı, soğuk ve sert, yaz mevsimi ise sıcak, kurak ve kısadır. Gece ve gündüz arasındaki ve yaz ve kış mevsimleri arasındaki sıcaklık farkları büyüktür. İlk bahar ve son bahar mevsimleri genellikle yağışlıdır ve yıllık yağış miktarı 442,8 mm' dir. Yağışın maksimum olduğu aylar Nisan ve Mayıs iken, Temmuz ayında ise yağış minimum seviyededir (Bulut, 2016).



Şekil 1. Sivas İli Haritası

Veri

Sivas ilinin 2022 yılındaki tarımsal biyokütle potansiyelini belirlemek için gerekli olan yıllık tarımsal ürün miktarları Türkiye İstatistik Kurumu' ndan (TUIK) temin edilmiştir ve Tablo 1' de sunulmuştur. Çalışma 13 tarla bitkisi ve 11 bahçe bitkisi olmak üzere toplam 24 tarımsal ürün için yapılmıştır. Sayısal haritaların oluşturulmasında ise ArcGIS programı kullanılmıştır. Her ilçeye karşılık gelen veriler excel formatında ArcGIS e aktarılmıştır. Daha sonra ArcGIS te "classification" aracılığıyla verilerdeki en yüksek ve düşük değerlere göre manuel sınıflandırma yapılarak renklendirilmiştir. Sonuç çıktı haritaları görselleştirilmiştir.

Metot

Türkiye' nin tarımsal atıklarından teorik biyokütle potansiyeli (TBP) ve elde edilebilir enerji potansiyeli (EEP) hesabı için sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)' de verilen formüller kullanılmıştır (Görgülü, 2019; Avcıoğlu vd., 2019).

$$TBP = UM \times AO \times \left[\frac{100-N}{100} \right] \quad (1)$$

$$EEP = TBP \times AID \times EE \quad (2)$$

Eşitlik 1' de UM; ton olarak yıllık üretilen ürün miktarını, AO; ürün/atık oranını (tarımsal ürünlerin kullanılmayan kısımlarının ürün miktarına oranı) ve N; ürünün ortalama nemini göstermektedir. Eşitlik 2' de AID; ortalama alt ısı değeri (MJ/kg) ve EE; ortalama elde edilebilirlik yüzdesini göstermektedir (Görgülü, 2019).

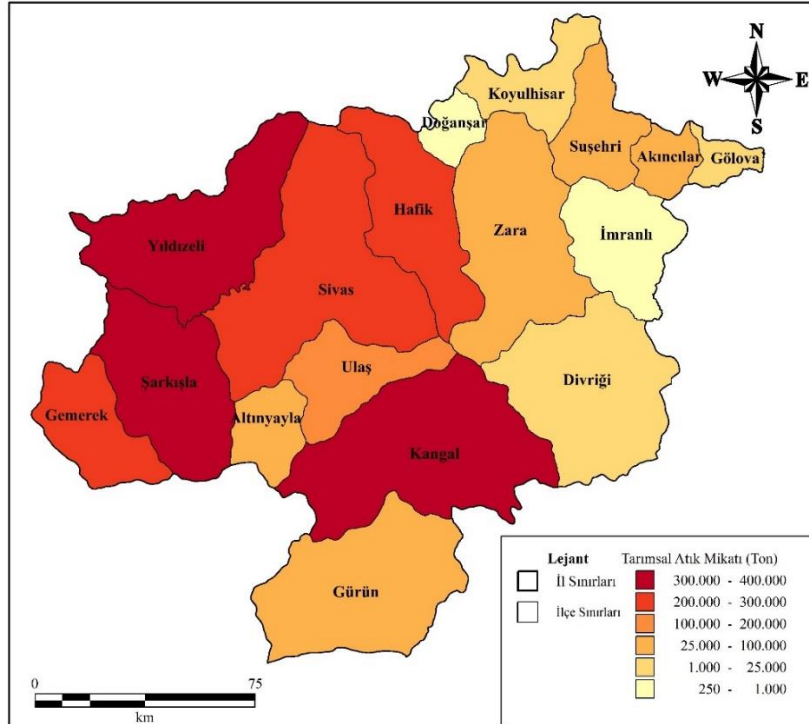
Tablo 1. TUIK 2022 Yılı Verilerine Göre İlçelere ait Tarımsal Üretim Çeşitleri ve Miktarları

Tarımsal Ürünler	İLÇELERDEKİ TARIMSAL ÜRÜN ÜRETİM MİKTARLARI, Ton																
	Akıncılar	Altınyayla	Divriği	Doğanşar	Gemerek	Gölova	Gürün	Hafik	Kangal	Koyulhisar	Suşehri	Ulaş	Yıldızeli	Zara	İmranlı	Şarkışla	Merkez
Buğday	975	16123	7637	158	13902	1015	35163	32140	129160	1569	16103	29316	72632	25011	645	50925	106715
Mısır	508	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3813	0	143	0	0	0	0
Arpa	9927	26871	4114	52	20085	1664	21818	3749	73933	1430	4137	17903	28145	3657	116	75429	32400
Çavdar	94	96	2	0	268	0	904	116	336	47	41	76	124	17	0	215	839
Yulaf	0	8486	366	17	612	46	4609	1580	15116	67	33	3901	2367	1857	53	4861	14226
Kuru Fasülye	49	0	24	9	63	29	8	0	0	9	425	0	40	15	0	43	241
Nohut	73	4	50	0	766	22	3245	43	1983	5	65	4	270	13	4	328	86
Mercimek	0	0	2	0	40	0	1	0	277	0	1	0	10	0	0	16	25
Patates	435	17838	1206	0	15048	0	233	48232	54019	188	1891	5305	65595	10715	0	47749	65981
Şeker Pancarı	16135	20659	0	0	180954	233	0	142218	27047	0	8688	95115	203286	13084	0	190595	39755
Ayçiçeği	290	43	158	0	1212	0	351	597	2074	0	11	986	1977	870	0	19219	1373
Lahana	0	0	0	0	0	0	33	30	0	0	228	0	20	0	0	0	250
Domates	1030	21	117	0	410	42	86	276	15	939	3054	64	442	66	23	190	404
Kayısı	23	0	299	0	25	0	10255	16	267	28	60	29	0	29	0	40	476
Kiraz	9	6	19	2	6	3	26	2	58	49	62	27	3	20	8	78	202
Antep Fıstığı	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0
Ceviz	86	9	225	9	234	77	290	40	17	151	56	0	13	45	8	75	4
Badem	1	0	13	0	0	3	34	2	0	0	18	0	0	0	0	0	1
Fındık	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0
Elma	71	93	449	25	192	35	315	69	316	159	270	176	398	135	32	228	2754
Armut	19	17	86	23	10	11	54	3	42	25	59	18	39	93	19	163	1023
Erik	0	9	55	0	5	0	0	2	102	21	32	62	16	14	14	60	767
Şeftali	0	0	30	0	0	0	0	0	0	16	14	0	2	0	0	13	0
Üzüm	0	0	94	0	463	0	329	0	0	35	118	0	0	0	0	0	0
TOPLAM	29725	90275	14946	286	234395	3180	77754	229115	304762	4747	39207	152985	375522	55641	922	390227	267522

Tarımsal ürünlerin atık/ürün oranları (AO), nem içerikleri (N), alt ısıl değerleri (AID) ve atığın kullanılabilirlik oranı değerleri Tablo 2’ de, TUİK verilerine göre 2022 yılı için ilçelere ait tarımsal ürün miktarları ise Şekil 1’ de görsel olarak sunulmuştur.

Tablo 2. Tarımsal Ürünlerin Nem, Ürün/Atık, Alt Isıl Değer ve Elde Edilebilirlik Değerleri

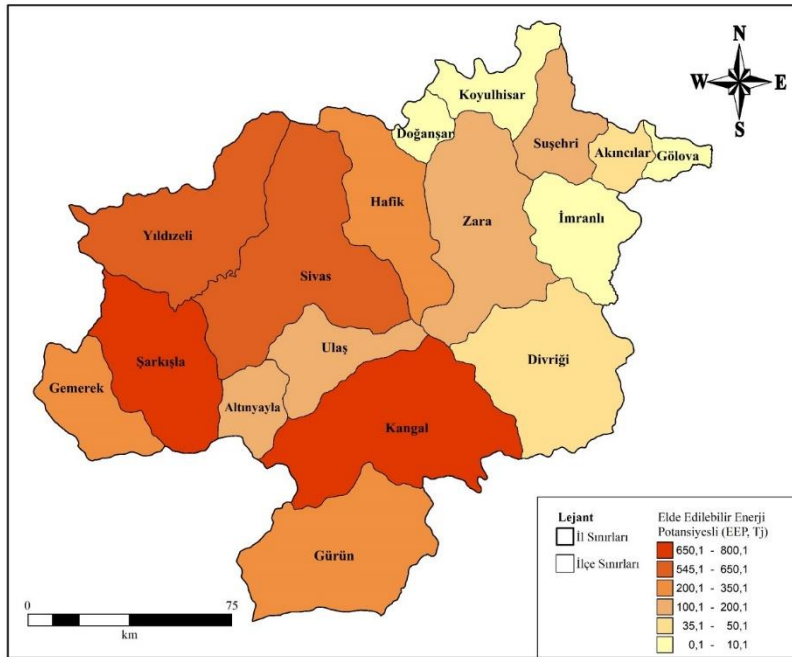
Tarımsal Ürünler	Nem, (M), (%)	Ürün/Atık Oranı (AO)	Alt Isıl Değer, (AID), (MJ/kg)	Elde Edilebilirlik (A), (%)	Referanslar
Buğday	13	1,13	16,7	15	Görgülü, 2019
Mısır	15	1,5	15,48	60	Duku et al., 2011
Arpa	15	0,75	1,75	16	Avcıoğlu, 2019, Karaca, 2019
Çavdar	15	0,99	17,4	15	Görgülü, 2019; Avcıoğlu, 2019
Yulaf	12	0,37	17,4	15	Görgülü, 2019; Ozturk and Bascetincelik, 2006
Kuru Fasulye	5	1,45	14,7	15	Görgülü, 2019; Özdil and Çalışkan, 2022
Nohut	15	1,3	15,6	90	Görgülü, 2019
Mercimek	15	1,67	17,1	10	Ünal and Alibaş, 2006; Karaca, 2019; Öztürk and Başçetincelik, 2006
Patates	60	0,45	13,6	95	Görgülü, 2019
Şeker pancarı	80	0,4	17	50	Ünal ve Alibaş, 2006
Ay çiçeği	27	2,1	15,6	60	Avcıoğlu, 2019
Lahana	85	2,5	12,4	95	Görgülü, 2019
Domates	85	0,3	19,5	95	Görgülü, 2019
Kayısı	40	0,19	20	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Kiraz	40	0,19	21,7	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Antep fıstığı	35	0,44	18,5	80	Avcıoğlu, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Ceviz	38	0,44	19	50	Görgülü, 2019
Badem	38	0,61	18,2	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Fındık	40	3,34	19	80	Avcıoğlu, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Elma	40	0,19	17,8	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Armut	38	0,22	18,2	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Erik	40	0,35	17,3	80	Karaca, 2019; Ünal ve Alibaş, 2006
Şeftali	40	0,4	18,2	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022
Üzüm	45	0,42	18	80	Avcıoğlu, 2019; Görgülü, 2019; Özdil ve Çalışkan, 2022



Şekil 2. Sivas İline ait Tarımsal Ürün Miktarları

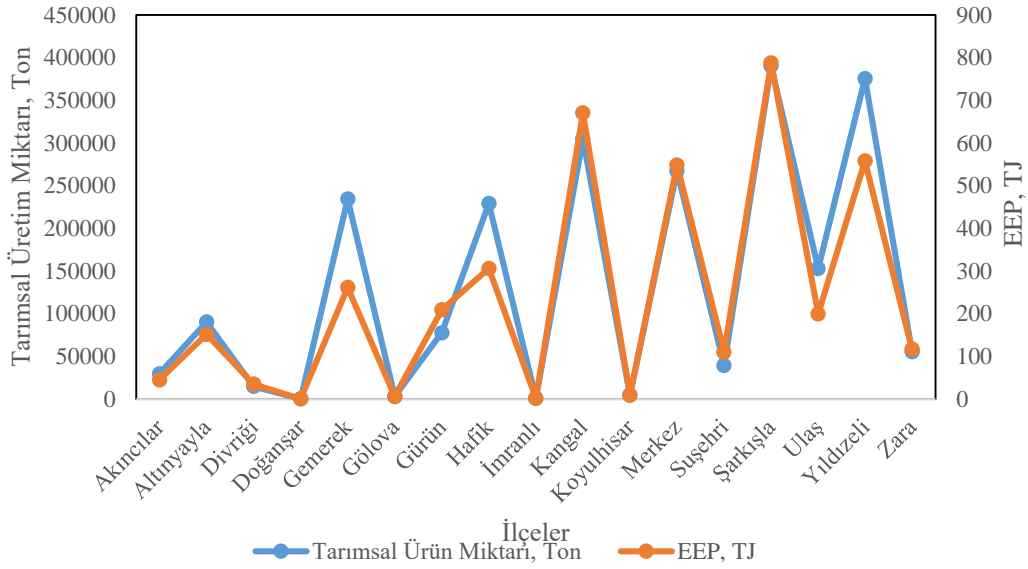
BULGULAR VE TARTIŞMA

2022 TÜİK tarımsal üretim verilerine göre hesaplanan ilçelere ait elde edilebilir enerji potansiyelleri (EEP) Şekil 3, Şekil 4 ve Tablo 3' de sunulmuştur. 2022 yılı için Sivas ilinin toplam tarımsal üretim miktarı 2246376 ton (TÜİK, 2022), toplam EEP' si ise 4017 TJ' dur. Şekil 2 ve Şekil 4' te de görüldüğü gibi Sivas ilinin en yüksek tarımsal üretime sahip ilçesi Şarkışla' dır. Şarkışla' yı ise 375522 ton ve 304762 ton ile sırasıyla Yıldızeli ve Kangal takip etmektedir. Şarkışla, Yıldızeli ve Kangal Sivas' ta sırasıyla % 17,37 % 16,72 ve % 13,52' lik tarımsal üretim oranlarına sahiptir. Bu üç ilçenin toplam tarımsal üretim miktarı ise % 47,61' lik bir oranla Sivas ilinin toplam tarımsal ürün miktarının yaklaşık yarısını karşılamaktadır. Şekil 3 ve Şekil 4' te ise Sivas' ta en yüksek elde edilebilir enerji potansiyeline 788 TJ ile Şarkışla' nın sahip olduğu, Şarkışla' yı ise 670 TJ ve 558 TJ ile sırasıyla Kangal ve Yıldızeli' nin takip ettiği görülmektedir. Biyokütle potansiyelini belirleyen temel faktör tarımsal üretim miktarı olmasına rağmen ilçelerdeki tarımsal üretim miktarları ile biyogaz potansiyellerinin paralellik göstermemesinin nedeni olarak ise ilçelerin tarımsal üretim çeşitliliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Her tarımsal ürünün biyogaz potansiyeli için Ürün/Atık oranı, alt ısıl değer, ürünün nem içeriği gibi parametreler farklılık göstermektedir. Bundan dolayıdır ki her ürünün biyogaz potansiyeli de farklıdır. Örneğin yapılan çalışma sonucu görüldüğü üzere fındık, nohut, ayçiçeği gibi ürünler oldukça yüksek biyogaz potansiyeline sahipken şeker pancarı, domates, yulaf gibi ürünler oldukça düşük biyogaz potansiyeline sahiptir. Benzer şekilde Şekil 2 ve Şekil 3' te görüldüğü gibi en düşük tarımsal üretime ve biyogaz potansiyeline sahip ilçelerin başlıcaları ise sırasıyla Doğanşar, İmranlı ve Gölova' dır. Benzer çalışmalar farklı iller için de yapılmış olup farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Burdur' un tarımsal atık kaynaklı EEP' si 10216 TJ (Görgülü, 2019), Adana' nın EEP' si 23560 TJ (Bilgili, 2020), Hatay' ın EEP' si ise 13363 TJ (Karaca, 2019) olarak önceki çalışmalarda ifade edilmiştir. Sonuçlardaki farklılıkların sebepleri ise başta illerdeki tarımsal üretim miktarları olmak üzere illerde üretilen tarımsal ürün çeşitleridir. Ayrıca Türkiye geneline bakıldığında da Akdeniz ve Ege bölgeleri tarımsal açıdan daha verimli olduğundan özellikle bu bölgelerdeki illerin tarımsal atık kaynaklı EEP değerlerinin ve tarımsal üretim miktarlarının daha yüksek olduğu da görülmektedir.



Şekil 3. Sivas İline ait Biyokütle Enerjisi Potansiyelleri

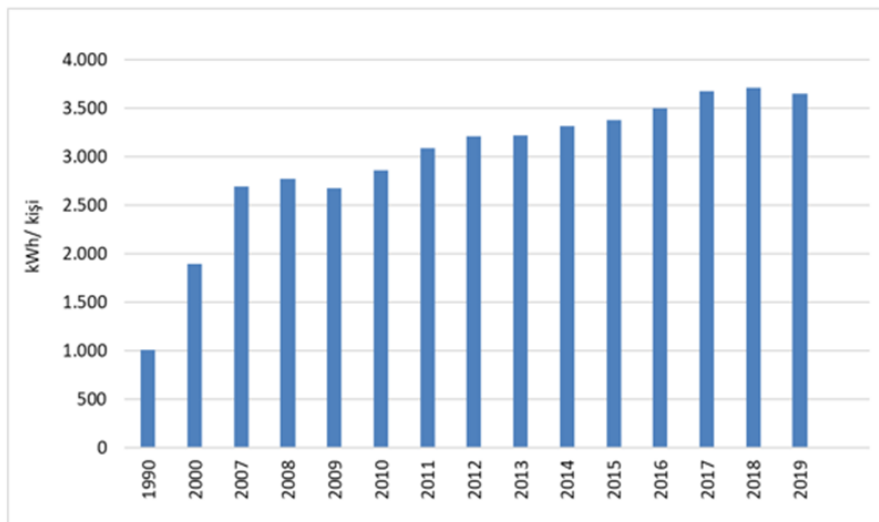
Enerji atlası verilerine göre Şekil 5' de Kişi Başı Elektrik Tüketimi Değişimi grafiğine bakıldığında 2019 yılı için 1 kişinin yıllık elektrik tüketiminin 3648 kWh olduğu görülmektedir (Enerji Atlası). Yapılan çalışmada 1 kwh' in 0,0036 GJ' e eş değer olduğu bilgisine dayanarak 4017 TJ biyogazın yıllık olarak 305913 kişinin enerji ihtiyacını karşılayacağı belirlenmiştir. TÜİK verilerine göre 634924 kişi olan 2022 yılı Sivas nüfusunun % 48' inin yıllık enerji ihtiyacının Sivas' taki tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle enerjisi ile temin edilebileceği görülmektedir. Yine TÜİK verilerine göre 2021 yılı için Sivas' ın toplam elektrik enerjisi tüketimi 1.517.862 MWh' tir (TÜİK, 2021) ve Sivas' ın yıllık elektrik enerjisi ihtiyacının % 73,5' inin tarımsal atıklardan karşılanabileceği belirlenmiştir.



Şekil 4. İlçelere ait Tarımsal Üretim Miktarları ve Biyokütle Enerjisi Potansiyelleri

Tablo 3. İlçelere ait Tarımsal Üretim Miktarları ve EEP Değerleri

İlçe Adı	Tarımsal Üretim miktarı, ton	EEP, TJ
Akıncılar	29725	45,0
Altınyayla	90275	152,0
Divriği	14946	35,0
Doğanşar	286	0,6
Gemerek	234295	262,0
Gölova	3180	6,4
Gürün	77754	209,0
Hafik	229115	306,0
Kangal	304762	670,0
Koyulhisar	4747	9,2
Suşehri	39207	110,0
Ulaş	152985	200,0
Yıldızeli	375522	558,0
Zara	55641	117,0
İmranlı	922	2,1
Şarkışla	390227	788,0
Merkez	267522	548,0



Şekil 5. Kişi Başı Elektrik Enerjisi Tüketimi (Enerji Atlası)

TUİK verilerine göre 2022 yılında Sivas' ta en fazla üretilen tarımsal ürünlerin sırasıyla şeker pancarı, buğday, patates ve arpa olduğu ve bu dört ürünün toplam ürün miktarının % 94' ünü oluşturduğu ve sadece şeker pancarı üretiminin tek başına toplam tarımsal üretimin % 42' sini oluşturduğu belirlenmiştir. En yüksek EEP' ye ise sırasıyla buğday, patates, şeker pancarı ve arpanın sahip olduğu ve bu dört ürünün toplam EEP' nin % 83' ü ve sadece buğdayın EEP' sinin toplam EEP' nin % 33' ü olduğu görülmüştür. Yine benzer şekilde ürün miktarları ile EEP' nin paralellik göstermemesinin sebebi olarak ürünlerin A/Ü oranları, alt ısıl değerleri ve nem içeriklerindeki farklılıklar görülmektedir. Çalışma sonucunda görülmüştür ki şeker pancarı üretimi oldukça yüksek olmasına rağmen enerji potansiyeli oldukça düşük bir üründür. Tarımsal atıklardan elde edilen toplam EEP' nin ise % 99' unu tarla bitkileri, % 1' ini ise bahçe bitkileri oluşturmaktadır.

SONUÇLAR

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların hızlı bir şekilde azalmasından ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı sürdürülebilir, yenilenebilir, temiz ve çevre dostu enerji kaynakları dikkat çekmeye başlamıştır. Biyokütle enerjisi de son yıllarda ilgi gören yenilenebilir, temiz, çevre dostu ve ekonomik bir enerji kaynağı olmuştur.

Bu çalışmada 2022 yılında Sivas' ın tarımsal atıklarından temin edilebilecek EEP belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda tarımsal atıklardan temin edilen EEP' nin Sivas' ın yıllık enerji ihtiyacının % 73,5' ini karşılayabileceği belirlenmiştir. Tarımsal atıklardan temin edilen EEP' nin ise % 99 gibi oldukça yüksek bir oranının tarla bitkilerinden, geri kalanının ise bahçe bitkilerinden oluştuğu görülmüştür. Sivas için tarımsal atıklardan temin edilebilecek AEP' nin 4017 TJ olduğu belirlenmiştir. Sivas' ta tarımsal atık kaynaklı en yüksek EEP' ye sahip olan üç ilçenin 788 TJ ile Şarkışla, 670 TJ ile Kangal ve 558 TJ ile Yıldızeli olduğu tespit edilmiştir. Sivas' ta en yüksek EEP' ye sahip tarımsal ürünün ise buğday olduğu yapılan çalışmada görülmüştür.

Biyokütlenin enerji temini için kullanılmasının birçok da avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar arasında çevre kirliliği yaratmaması; yenilenebilir ve sürdürülebilir bir kaynak olması; yerel ve sürekliliği olan bir kaynak olması; temiz, bol bulunan, ekonomik ve çevre dostu bir kaynak olması sayılabilir. Bu tür çalışmalar uygulamaya geçirildiği takdirde hem evsel, tarımsal ve hayvansal atıklar çevre için bir tehdit oluşturmadan bertaraf edilmiş olacak hem de her geçen gün hızla tükenen fosil yakıtlar daha az kullanılarak fosil yakıtların ömrü uzayacaktır. Ayrıca fosil yakıt kullanımından oluşan çevresel kirlilikte oluşmamış olacaktır. Biyokütle atıkları atıktan enerjiye dönüştüğü için enerji üretiminin yanısıra atık bertarafı da gerçekleştireceğinden atık yönetimine de katkı sağlanacaktır. Ayrıca Sivas' ın yıllık enerji ihtiyacının % 70' inden fazlasını karşılayabileceği göz önüne alındığında önemli bir enerji potansiyeline sahip olduğu da görülmektedir. Ancak tüm tarımsal ve hayvansal atıkların enerjiye dönüşümü gerçekçi değildir, çünkü tarımsal atıkların bir kısmı tarımsal alanlarda erozyon kontrolü, gübre, toprak iyileştirici ve hayvan yemi olarak da kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- Achinas, S., Achinas, V., Euverink, G. J. W. (2017). A technological overview of biogas production from biowaste. *Engineering*, 3(3), 299-307. <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002>
- Altuntaş, E., Aslan, İ. (2009). Sivas ilinin tarımsal mekanizasyon düzeyinin 1997-2007 yılları arasındaki değişiminin incelenmesi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 2009(2), 87-95.
- Avcıoğlu, A. O., Dayıoğlu, M. A., Türker, U.. (2019). Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. *Renewable Energy*, 138, 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.053>
- Aybek, A., Üçok, S., İspir, M. A., Bilgili, M. E. (2015). Türkiye'de kullanılabilir hayvansal gübre ve tahıl sap atıklarının biyogaz ve enerji potansiyelinin belirlenerek sayısal haritalarının oluşturulması. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*. 12(03), 109-120.
- Belen, M., Yanar, D., Erdal, G. (2020). Sivas İlinde Buğday Üretiminde Karşılaşılan Bitki Koruma Sorunlarının Belirlenmesi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji dergisi*, 8(SP1), 208-214. DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8isp1.208-214.4114>
- Ben-Iwo, J., Manovic, V., Longhurst, P. (2016). Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. *Renewable and sustainable energy reviews*, 63, 172-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.050>

- Bilgili, M. E. (2020). Adana ilindeki biyokütle potansiyelinin elektrik enerjisi ikamesinde kullanım durumu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 41-47.
- Bulut, A. P. (2023). Sivas ilinde karayolundan kaynaklanan karbon ayak izinin belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 166-176. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1191091>
- Bulut, A. P., Canbaz, G. T. Sivas İlinde Buğday, Arpa, Şeker Pancarı ve Ayçiçeği Üretimi İçin Su Ayak İzinin Hesaplanması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 249-255. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1010315>
- Bulut, S. (2016). Sivas' ta Tahıl Tarımı, Verimlilik Sorunları ve Çözüm Önerileri. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji dergisi/Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 4(5). DOI: 10.24925/turjaf.v4i7.531-539.647
- Demir, B., Sağlam, C., Çetin, N., Büyükkılıç Beyzi, S. (2018). Mersin ilinin hayvansal atıklardan biyogaz ve elektrik enerjisi üretim potansiyeli. In *3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress* (pp. 1589-1591).
- Desta, G. A., Melka, Y., Sime, G., Yirga, F., Marie, M., Haile, M. (2020). Biogas technology in fuelwood saving and carbon emission reduction in southern Ethiopia. *Heliyon*, 6(10), e04791. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04791>
- Duku, M. H., Gu, S., Hagan, E. B. (2011). A comprehensive review of biomass resources and biofuels potential in Ghana. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1), 404-415. doi:10.1016/j.rser.2010.09.033
- Enerji Atlası. <https://www.enerjiatlası.com/elektrik-tuketimi/>. 03.04.2023.
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303. Doi: 10.18074/ckuiibfd.670673.
- Görgülü, S. (2019). Burdur ilinin hayvansal ve bazı tarımsal atık kaynaklı biyogaz potansiyelinin belirlenmesi. *El-Cezeri*, 6(3), 543-557. DOI : 10.31202/ecjse.556915.
- Karaca, C. (2019). Agricultural residues potential of Hatay. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 24, 9-15.
- Karakus, C. B., Cerit, O. & Kavak, K. S. (2015). Determination of land use/cover changes and land use potentials of Sivas city and its surroundings using Geographical Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS), *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 454-461. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.040>
- Koryś, K. A., Latawiec, A. E., Grotkiewicz, K., Kuboń, M. (2019). The review of biomass potential for agricultural biogas production in Poland. *Sustainability*, 11(22), 6515. doi:10.3390/su11226515.
- Ozturk, H. H., Bascetincelik, A. (2006). Energy exploitation of agricultural biomass potential in Turkey. *Energy Exploration & Exploitation*, 24(4), 313-330. <https://doi.org/10.1260/014459806779398802>
- Ozdil, N. T., Caliskan, M. (2022). Energy potential from biomass from agricultural crops: Development prospects of the Turkish bioeconomy. *Energy*, 249, 123770. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123770>
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2022). Tarımsal üretim istatistikleri. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>. 30.03.2023.
- Unal, H., Alibas, K. (2007). Agricultural residues as biomass energy. *Energy Sources, Part B*, 2(2), 123-140. <https://doi.org/10.1080/15567240600629401>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.04.2023
Kabul Tarihi : 10.06.2023

Received Date : 18.04.2023
Accepted Date : 10.06.2023

MADENLERİN SINIFLANDIRILMASINA YÖNELİK HİBRİD BİR CNN MODELİN OLUŞTURULMASI

CREATING A HYBRID CNN MODEL FOR MINES CLASSIFICATION

Turab SELÇUK (ORCID: 0000-0002-8445-2105)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Turab SELÇUK, tselcuk@ksu.edu.tr

ÖZET

Madenlerin ülkelerin ekonomisindeki yeri oldukça büyüktür. Bu nedenle madencilikte cevher yataklarının tespiti ve tanımlanması önemli bir araştırma konusudur. Cevher sınıflandırılması işlemlerinde de bilgisayar tabanlı karar destek sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada yedi farklı cevherin sınıflandırılmasına yönelik dört aşamadan oluşan hibrid bir CNN model oluşturulmuştur. Bu aşamalar, özellik çıkarımı, özellik birleştirme, özellik seçimi ve sınıflandırmadır. Özellik çıkarımı için, sınıflandırma problemlerinde yüksek başarımlar gösteren ResNet50, MobileNetV2 ve DenseNet201 mimarileri kullanılmıştır. Çıkarılan özellikler birleştirilerek 1x3000 boyutlarında kapsamlı özellik vektörü elde edilmiştir. Sınıflandırma başarımını arttırmak için özellik vektörüne NCA, ReliefF ve mRMR algoritmaları uygulanarak ayırt ediciliği yüksek özellikler belirlenmiştir. Bu özellikler destek vektör makineleri ile sınıflandırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mRMR için 91.34, NCA için 92.42 ve ReliefF için 93,14 doğruluk değeri göstermiştir. Sonuç olarak önerilen hibrid CNN modelinin cevher sınıflandırılmasında literatürdeki klasik CNN modellere göre daha yüksek başarımlar sağlamıştır. Önerilen hibrid CNN modelin jeoloji alanında cevher sınıflandırılmasına yönelik çalışmalarda araştırmacılara karar desteği sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Maden Sınıflandırma, hibrid CNN modeli, özellik seçimi

ABSTRACT

The impact of mines on the economy of countries is quite large. For this reason, the detection and identification of ore deposits in mining is an important research topic. Computer-based decision support systems are also used in ore classification processes. In this study, a hybrid CNN model consisting of four stages was created for the classification of seven different ores. These stages are feature extraction, feature aggregation, feature selection and classification. ResNet50, MobileNetV2 and DenseNet201 architectures were used in feature extraction. By combining the extracted features, a feature vector of 1x3000 dimensions was obtained. In order to increase the classification performance, NCA, ReliefF and mRMR algorithms were applied to the feature vector and features with high distinctiveness were determined. These features are classified by support vector machines. According to the results obtained, it showed an accuracy value of 91.34 for mRMR, 92.42 for NCA and 93.14 for ReliefF. As a result, the proposed hybrid CNN model has higher performance in ore classification than the classical CNN models in the literature. It is thought that the proposed hybrid CNN model will provide decision support to researchers in studies on ore classification in the field of geology.

Keywords Mines Classification, hybrid CNN model, feature selection

GİRİŞ

Madenlerin ülkelerin ekonomisindeki yeri oldukça büyüktür. Bu nedenle madencilikte cevher yataklarının tespiti ve tanımlanması önemli bir araştırma konusudur. Cevherlerin sınıflandırılmasında renk, doku, koku özellikler kullanıldığı gelenekler yöntemler bulunmaktadır. Ancak bu geleneksel yöntemler, hem zaman alıcı hem de yüksek maliyet gerektiren süreçlerdir. Bu soruna çözüm olmak için birçok alanda olduğu gibi cevher sınıflandırılması işlemlerinde de bilgisayar tabanlı karar destek sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler hızlı ve yüksek doğruluğa sahip sonuçlar elde edebilmektedir.

Cevherlerin bilgisayar tabanlı sistemlerle sınıflandırılması aslında bir görüntü sınıflandırma işlemidir. Sınıflandırma işlemlerinde de sıklıkla karar ağaçları, destek vektör makineleri kNN, Naive Bayes gibi algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar yüksek başarımlı göstermektedir. Ancak yüksek seviyede özelliklerin tanımlanmasını gereklidir. Evrişimli sinir ağları ihtiyaç olunan yüksek seviye özellik çıkarımını gerçekleştirmektedir. Sınıflandırılacak görüntüye ait çok sayıda özellik çıkarımı yapabilmektedir. Görüntüleme teknolojileri, işlemci donanımları ve makine öğrenmesi alanında yaşanan gelişmeler, cevherlerin sınıflandırılması noktasında da bu teknolojilerin kullanımına teşvik etti ve ilerlemeleri de beraberinde getirdi. Görünür ışık altındaki cevher özellikleri, bu sistemin temelini oluşturdu ve çalışmaların merkezinde görüntü işleme yer aldı. Son 10 yılda makine öğrenmesi çok çeşitli alanlarda tanıma ve sınıflandırma aracı olarak yaygın biçimde kullanılmıştır. Cevher sınıflandırılması alanında da akademisyenler çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarını inceleyip değerlendirdiler. Bir karşılaştırmalı analizde, KNN, PNN, SVM, Naive Bayes algoritmaları arasında SVM'nin demir cevheri sınıflandırılmasında en yüksek doğrulukta performans ortaya koyduğunu buldular. (Patel vd., 2017). SVM algoritması, binary (ikili) sınıflandırma sağlayan ve denetimli öğrenmeye dayanan lineer bir sınıflandırıcıdır. Örneğin şekil, renk ve doku özellikleri üzerinden cevher sınıflandırılmasında yüksek performans gösterir. (Massinaei vd., 2012; Galdames vd., 2017; Patel vd., 2017; 2019; Min vd., Zhang vd., 2020b). Ek olarak, Support Vector Machine Regression'a (SVR) dayanan sequence forward floating selection (SFFS) gibi algoritmalar da demir cevher sınıfı tespitinde (Patel vd., 2018) ve kireç taşı sınıflandırmada iyi çalışır. (Chatterjee, 2013).

Ek olarak Karar ağacı (Perez vd., 2012), Naive Bayes (Khorram vd., 2017), KNN (Mollajan vd., 2016), ve Artificial Neural Network (ANN) (Sadeghiamirshahidi vd., 2013; Ebrahimi vd., 2016; Izadi vd., 2017) algoritmaları da cevher sınıflandırma da iyi performans gösterir. Bu araştırmalar, cevher sınıflandırmada makine öğrenmesi kullanımının avantajlarını ortaya koymaktadır. Fakat bu yöntemlerin endüstriyel kullanımı oldukça azdır. Çünkü yüksek görüntü kalitesi gereksinimi, endüstriyel doğruluk ve hız parametrelerini yeterince karşılayamamaktadır. Bu sebeple geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları endüstriyel kullanımda yetersiz kaldığından yeni cevher görüntü sınıflandırma yöntemlerine ihtiyaç vardır. Derin öğrenme, makine öğrenmesi ile kıyaslandığında, derin öğrenme algoritmaları yüksek görüntü çözünürlüğü gereksinimlerini azaltır, özellik çıkarımı yaparak düşük ağırlıktaki özellikleri elimine eder ve böylece cevher sınıflandırma verimliliğini artırır. Ek olarak daha kısa eğitim süreleri ve daha hızlı sınıflandırmaya sunar. CNN algoritmalarının eğitim ve sınıflandırma başarı performansını belirleyen ana faktör model yapısıdır. Filtre konvolüsyonu ile güncellenen Inception ağına, konvolüsyon katmanları eklenerek oluşan AlexNet ve VGG Net ağlarından ve özellik aktarım yöntemiyle iyileştirilen ResNet ağına, cevher görüntü sınıflandırmasında derin öğrenmeye dayalı sınıflandırma modelinin performansı kademeli olarak iyileştirildi. Makine öğrenmesiyle karşılaştırıldığında, beş ile on katmanlı derin öğrenme modeli, sınıflandırma başarımını oldukça yükseltmiştir (Montes-Atenas vd., 2016); cevher görüntüsünün LeNet-5 modeli ile tanınması (Su vd., 2018); ham kömür görüntülerinin ve gang görüntülerinin sınıflandırılması (Gao vd., 2020) ve şeyl görüntülerinin U-Net modeline göre sınıflandırılması (Chen vd., 2020b); çelik yüzey yapısının YoloNet modeline göre sınıflandırılması (Li vd., 2018); demir cevherinin sekiz katmanlı CNN modeliyle sınıflandırılması (Iglesias vd., 2019) ve petrol kuyusu görüntülerinin on katmanlı küçük evrişimli sinir ağıyla sınıflandırılması (Imamverdiyev and Sukhostat, 2019). Ayrıca model derinliği de önemli bir husustur. AlexNet ve VGG Net tabanlı mimariler birçok araştırmacı tarafından tercih edilmekte ve cevher görüntüsü sınıflandırma işlevini verimli bir şekilde yerine getirmektedir. (Chaves vd., 2018; Fu and Aldrich, 2018; Wang vd., 2018; Pu vd., 2019). Ancak derin öğrenme sınıflandırma modelinin derinliğinin artması eğitim ve uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu sorunu çözmek için Han S. ve diğerleri, büyük ölçekli filtreler yerini alacak faktör dekompozisyonu ile sınıflandırma hızını artıran ve daha derin katmanlara izin vererek kayaları sınıflandırmak üzere bir Inception-v3 modeli oluşturdu. (Han vd., 2019).

Ek olarak ResNet, gradyan kaybolmasını ve gradyan patlamasını çözmek için Inception ağına dayalı kalıntı haritalama fikrini tanıttı. Örneğin, Baraboshkin ve ark. Rusya'daki farklı bölgelerin kaya görüntülerini sınıflandırmak için bir ResNet modeli oluşturmuştur (Baraboshkin vd., 2019). Ayrıca, birçok akademisyenin, farklı evrişimli sinir

ağlarını birleştirerek veya mükemmel sınıflandırma sonuçları elde eden büyük veri ve derin öğrenme gibi yeni teknolojileri birleştirerek cevher görüntü sınıflandırması için yeni modeller oluşturduğunu belirtmekte fayda var (Le vd., 2018; Xiong vd., 2018; Chen vd., 2020a; Si vd., 2020; Zhang vd., 2020c). Özetle, yapılan çalışmalar derin öğrenme modellerininin, yüksek çözünürlüklü cevher görüntülerine bağımlılığı azalttığını, az görüntüyle dahi makine öğrenmesine göre daha hızlı tanıma ve sınıflandırılma sağladığını kanıtlıyor.

Bu çalışmada cevherlerin sınıflandırılmasına yönelik, MobileNetV2, ResNet101 ve DenseNet201 olmak üzere üç farklı CNN mimariyi içinde bulunduran hibrid bir CNN model oluşturuldu. Bu model cevher görüntülerine ait özelliklerin çıkartılmasında kullanıldı. Her bir modelden elde edilen özellikler birleştirilerek kapsamlı bir özellik vektörü oluşturuldu. Elde edilen özelliklerden en ayırt edici olanları özellik seçim algoritmaları ile seçilerek SVM sınıflandırıcıya verildi. Elde edilen sonuçlar önerilen modelin başarılı bir şekilde cevher sınıflandırmasında hızlı ve güvenilir olduğunu göstermiştir.

VERİ KÜMESİ

Çalışmada Kaggle veriseti kullanıldı. (<https://www.kaggle.com/asiedubrempong/minerals-identification-dataset>) Bu verisetinde yedi farklı mineral sınıfı bulunmaktadır. Bu sınıflar biyotit, bornit, krizokol, malaşit, pirit ve kuartzdır. Toplamda 957 görüntü bulunmaktadır. Şekil 1’de her bir sınıfa ait örnek görüntüler gösterilmiştir. Veri setinin %70’i eğitim için %30’u ise test için ayrılmıştır. Tablo 1’de her bir sınıfa ait görüntü sayıları gösterilmiştir.



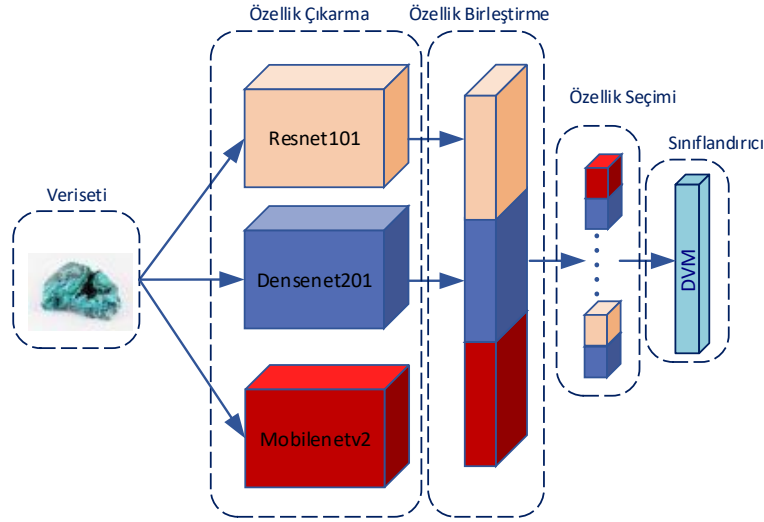
Şekil 1. Verisetinden Örnek Görüntüler

Tablo 1. Veri Setindeki Cevherlerin Görüntü Sayıları

Maden Tipi	Görüntü Sayısı
Biyotit	68
Bornit	170
Krizokol	164
Malaşit	235
Muskovit	77
Pirit	98
Kuartzdır	145
Total	957

YÖNTEMLER

Bu çalışmada minerallerin sınıflandırılmasına bilgisayar tabanlı bir sistem oluşturuldu. Bu sistem özellik çıkarımı sağlayan bir hibrid CNN modelinden, işlemci yükünü hafifleten özellik seçim algoritmalarından ve sınıflandırıcıdan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemler şekil 2’de özetlenmiştir.



Şekil 2. Çalışmadaki Yöntemleri Gösteren Akış Diyagramı

Özellik Çıkarımı

Özellik çıkarımında kullanılan hibrid model üç farklı CNN mimarisini içermektedir. Bu mimariler ResNet101, MobileNetV2 ve DenseNet201’dir. Herbir mimari ile 1x1000 boyutlarında özellik vektörleri oluşturulmuştur. Eşitlik 1,2 ve 3’te sırasıyla ResNet101, MobileNetV2 ve DenseNet201 ile özellik çıkarmanın matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$F_R = ResNet101(I) \quad (1)$$

$$F_R = (f_{r1}, f_{r2}, \dots, \dots, \dots, f_{r1000})$$

$$F_M = MobileNetV2(I) \quad (2)$$

$$F_M = (f_{m1}, f_{m2}, \dots, \dots, \dots, f_{m1000})$$

$$F_D = DenseNet201(I) \quad (3)$$

$$F_D = (f_{d1}, f_{d2}, \dots, \dots, \dots, f_{d1000})$$

Burada F_R ResNet101 ile elde edilmiş özellik vektörünü, F_M , MobileNetV2 ile elde edilmiş özellik vektörünü ve F_D DenseNet201 ile elde edilmiş özellik vektörünü ifade etmektedir. I giriş görüntüsünü ifade etmektedir. F_R , F_M ve F_D 1x1000 boyutlarında olup $f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{r1000}$ sırasıyla 1000 adet özelliği ifade etmektedir. Önerilen hibrid modelde herbir CNN mimarisinin tam bağlı katmanından elde edilen 1000 özellik birleştirilmiştir. Birleştirilmiş özellik vektörü matematiksel olarak eşitlik 4’te ifade edilmiştir. F , 1x3000 boyutunda kapsamlı özellik vektörü ifade etmektedir.

$$F = (F_R, F_M, F_D) \quad (4)$$

$$F = (f_{r1}, f_{r2}, \dots, f_{r1000}, f_{m1}, f_{m2}, \dots, f_{m1000}, f_{d1}, f_{d2}, \dots, f_{d1000})$$

Özellik Seçimi

Özellik seçme, bir özellik vektörünün belirli kriterlere göre alt kümesinin oluşturulması işlemidir. İşlenecek verinin azaltılmasında ve gereksiz özelliklerin kaldırılmasında önemli rol oynar. Başarılı bir özellik seçimi, derin sinir ağlarının öğrenme performansını artırır, öğrenme süresini azaltır ve kolay bir şekilde öğrenme sonuçlarının elde edilmesini sağlar. Bu çalışmada yüksek başarıma sahip denetimli özellik seçim algoritmalarından (Max-Relevance and Min- Redundancy) MRMR ve ReliefF kullanılmıştır. Denetimli özellik seçim algoritmaları sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılır. Temel prensibi özellikler ile etiketler arasındaki ilişkiyi kullanır. Verilen bir veriseti için maksimum sınıflandırma başarımını elde eden özellik vektörünün alt kümesini bulmayı amaçlar.

$$D = (F, C) \quad (5)$$

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$$

$$F_s = (f_{s1}, f_{s2}, \dots, f_m)$$

Burada D bir veri kümesini, F özellik vektörünü, n , özellik vektörünün boyutunu, C ise veri setindeki sınıfları ifade etmektedir. F_s , F özellik vektörünün bir alt kümesi m ise seçilmiş özellik sayılarını ifade etmektedir.

En Küçük Artıklık En Büyük İlgililik (mRMR)

mRMR, en büyük ilgililik en küçük artıklık kriterine dayalı bir özellik seçme algoritmasıdır. Özellikler ile sınıf arasındaki ilgi ile özelliklerin kendi arasındaki fazlalık analiz edilmektedir. Bu analiz için öklit uzaklığı Pearson korelasyonu ve bilgi ölçümü yapılmaktadır. Sonuç olarak ham özellik vektörü dört gruba ayrılmaktadır. (a) tamamen ilişkisiz ve gürültülü özellikler (b) zayıf ilişkiye ve fazlalıklı özellikler (c) zayıf ilişki ve fazlalık olmayan özellikler (d) güçlü ilişkiye sahip özellikler. Bu durumda ilişki ve fazlalık analizi iki optimizasyon problemine dönüştürülür. Birincisi maksimum ilişki ve minimum fazlalığı sağlayan özellik alt kümesini elde etmektir. MRMR algoritmasında özellik vektörünün değerlendirilmesinde entropi ölçütü kullanılmaktadır. Eşitlik 6 ve eşitlik 7'de mRMR algoritmasına ait matematiksel ifade verilmiştir (Li BQ vd., 2012).

$$\text{Maximum Relevance}(MR) = \max \left[\frac{1}{|F|} \sum_{f_i \in F} D(f_i, C) \right] \quad (6)$$

$$\text{Minimum Redudancy}(mR) = \min \left[\frac{1}{|F|^2} \sum_{f_i \in F} \sum_{f_j \in F} D(f_i, f_j) \right] \quad (7)$$

ReliefF

Özellik seçiminde önem derecesini belirlemede kullanılan bir diğer algoritma ReliefF algoritmasıdır (K. Kira vd., 1992). Önem derecesi iki aşamalı olarak belirlenmektedir. İlk aşamada veri setinden bir örnek seçilir ve diğer örneklerle benzerliği karşılaştırılır. Benzer özelliklere sahip örneklerin özellik katsayıları arttırılır. İkinci aşamada seçilen örnek farklı sınıftaki örneklerin özellikleri karşılaştırılır ve bu özelliklerin etkisini azaltmak amacıyla katsayıları küçültülür. Bu iki aşamada verisetindeki her bir örnek için tekrarlanır. Bu sayede özelliklerin önem derecesi belirlenir. Bu önem derecesine göre özellikler sıralanır.

Komşuluk Bileşenleri Analizi (NCA)

NCA, öncelikle özellik vektöründeki her bir özelliğe rastgele katsayı ataması yapmaktadır. Sonrasındaki süreç bu katsayıların ağırlıklandırılmasıdır. Bu ağırlıklandırma işlemi, özelliklerin sınıflar üzerindeki etkisiyle doğru orantılı

olarak değişmektedir. Yüksek etkiye sahip özelliklerin yüksek değerli olarak ağırlıklandırılır düşük etkiye sahip özellikler ise düşük değerle ağırlıklandırılır. NCA'ya ait matematiksel ifade eşitlik 8'de verilmiştir.

$$\vec{w} = \arg_{w} \max \sum_{i=1}^n p_i - \lambda \sum_{r=1}^d w_r^2 \quad 8$$

Burada \vec{w} ağırlıklandırılmış vektörü ifade etmektedir. w_r ağırlık katsayılarını, p_i sınıflandırıcının doğruluk olasılığını ifade etmektedir. Burada λ ağırlık katsayılarının değiştirilmesi ile ilgili bir parametredir. Önemli özelliklere yüksek değer atanır önemsiz özelliklere düşük değerler atanır.

Sınıflandırma

Bu çalışmada yüksek başarımlı elde etmek ve basit formda olması nedeniyle SVM sınıflandırıcı kullanılmıştır. Oluşturulan sınıflandırıcıya ait parametreler tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada çapraz doğrulama ile başarımlar test edilmiştir.

Tablo 2. Sınıflandırıcıya Ait Parametreler

Parametreler	Değerleri
SVM modeli	C-SVM
Çekirdek Fonksiyonu	RBF
Çekirdek Fonksiyonu parametresi, g	32
Düzeltilme Parametresi, c_p	1.414

UYGULAMA DETAYLARI

DeneySEL çalışmalar Matlab2021a ortamında yapılmıştır. Derin öğrenme araç kutusu kullanılarak CNN modeller oluşturuldu. Modellere ait eğitim parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. SGD optimizyer kullanıldı, öğrenme oranı 1×10^{-4} , momentum 0,9 olarak seçilmiştir. Batch size 32 ve dropout 0.5 seçilmiştir. Döngü sayısı 450 dir. Donanım olarak Nvidia RTX 3070Ti GPU kullanılmıştır.

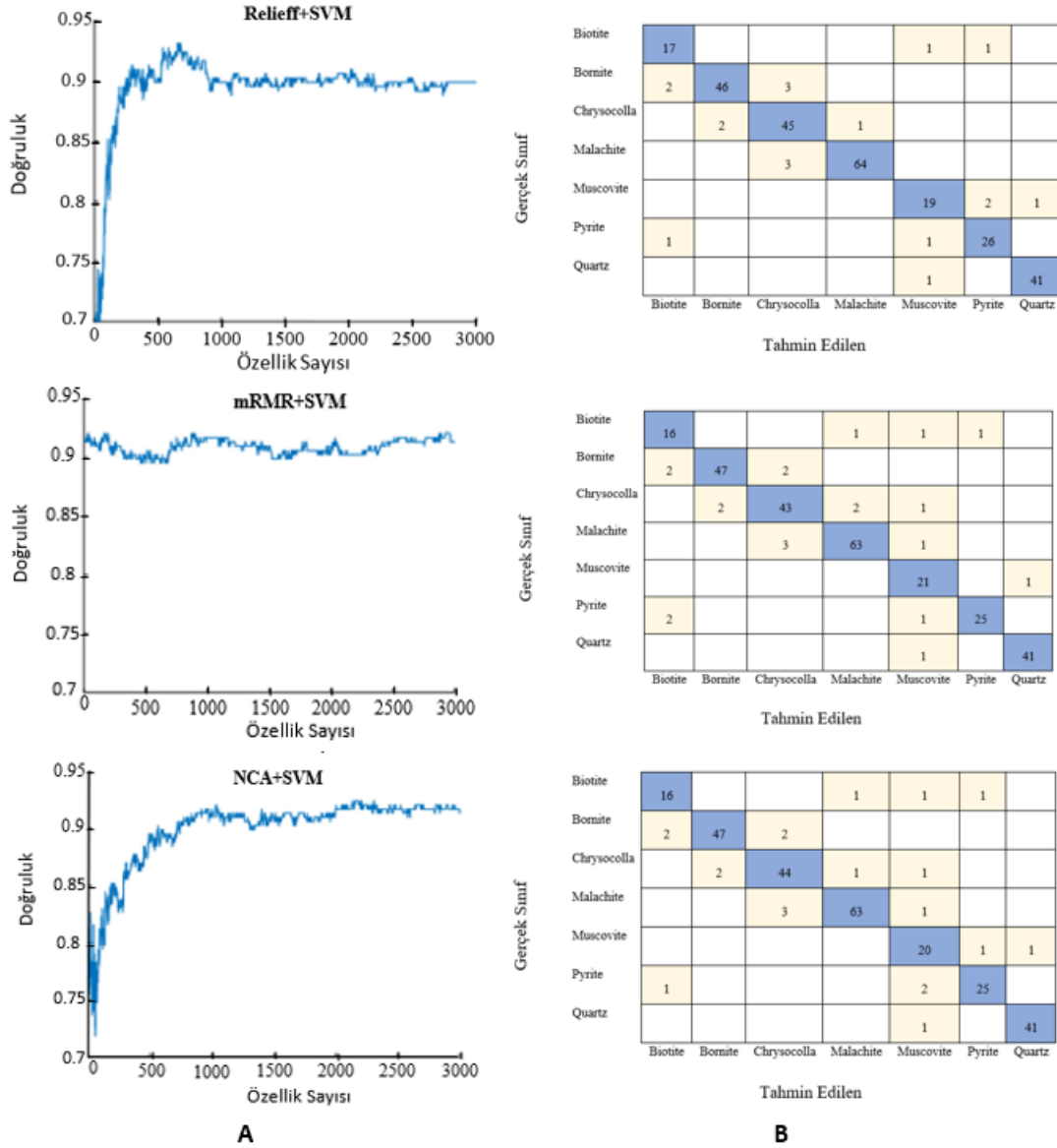
Tablo 3. Kullanılan Algoritmalara Ait Parametreler ve Donanım Özellikleri

	Parametre	Değeri
Eğitim	Döngü	450
	Batch boyutu	32
	Dropout	0,5
Optimizasyon	Optimizasyon adı	SGD
	Öğrenme oranı	1×10^{-4}
	Momentum	0,9
Donanım	GPU	Nvidia RTX 3070Ti
	Platform	Matlab2021a

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada öncelikle olarak Resnet101, Densnet201 ve MobilenetV2 mimarileri ile ayrı ayrı veri setinin sınıflandırılması gerçekleştirildi. Resnet101 ile %85,2 Densnet201 ile %80,51 ve MobilenetV2 ile %77,26 elde edildi. ResNet101 diğer iki modele göre daha başarılı olduğu görüldü. İkinci olarak, önerdiğimiz hibrid CNN model ile sınıflandırma gerçekleştirildi. Bu modelde her mimarinin tam bağlı katmanından elde edilen 1×1000 boyutlarındaki özellik vektörleri birleştirilerek kapsamlı bir özellik vektörü oluşturulmuştur. Daha sonra sınıflandırma başarısında en etkili özellikler 3 özellik seçim algoritması ile belirlendi. Bunlar sırasıyla NCA, ReliefF ve mRMR idi. 1×3000 'lik özellik vektöründeki birinci özellikten başlanarak sırasıyla tüm özelliklerin eklendiği alt

vektörler oluşturulmuştur. Bu alt vektörlerin herbiri SVM ile sınıflandırılarak en yüksek başarıma sahip alt vektörü belirlendi. MRMR, NCA, Relief ile seçilmiş en iyi alt özellik vektörleri sırasıyla 29, 2132, 655 adet özelliği içermektedir. Bu alt özellik vektörleri ile tüm mineral sınıfları için en yüksek başarıma değerleri elde edilmiştir. Şekil 3a'da elde edilen doğruluk grafikleri Şekil 3b'de ise karmaşıklık matrisleri verilmiştir.



Şekil 3. . NCA, Relief ve MRMR İle Seçilmiş Özelliklerden Elde Edilen (A). Doğruluk Grafiği Ve (B). Karmaşıklık Matrisi

Şekil 3 incelendiğinde MRMR için 91.34 NCA için 92.42 ve Relief için 93.09 olarak elde edilmiştir. Özellikle sınıflandırma doğruluğu açısından değerlendirildiğinde Relief NCA'ya göre yaklaşık % 1 MRMR'ye göre yaklaşık % 2 daha başarılı sonuç vermiştir. NCA ile seçilmiş özellikler kullanılarak elde edilen doğruluk grafiği incelendiğinde 2132. özellikte % 92.42 olarak en yüksek doğruluk değeri elde edildiği görülmektedir. Karmaşıklık matrisleri incelendiğinde en yüksek sınıflandırma başarıma kuartz için elde edilmiştir. Toplamda 42 adet örnekten 41 tanesi doğru pozitif (TP) 1 tanesi yanlış negatif ve 1 tanesi yanlış pozitif olarak elde edilmiştir. Toplamda 19 örnek yanlış sınıflandırılmıştır.

SONUÇLAR

Cevher sınıflandırılması madencilik endüstrisinde büyük önem arz etmektedir. Çünkü madenlerin verimli bir şekilde işlenmesi ve bunun sonucunda yüksek kar elde etmek, doğru sınıflandırmayla doğrudan ilişkilidir. Özellikle cevherin kalitesinin belirlenmesi, cevherle ilişki diğer süreçlerin sağlıklı yürütülmesi, cevher işletimindeki zaman ve maliyet kaybını azaltır. Yapılan çalışmada cevher sınıflandırılmasına yönelik literatürdeki yüksek sınıflandırma başarıma

sahip üç farklı CNN mimarisini içeren bir hibrid CNN model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model sayesinde cevher görüntülerinin özellikleri çıkarılmıştır. Çalışmada, literatürde yaygın kullanılan CNN modelleri ile edilmiş özellik vektörlerinden daha kapsamlı bir özellik vektörü elde edilmiştir. Elde edilen özellikler arasında en belirleyici olanlar, özellik seçme algoritmaları ile seçilerek başarımın daha da artması sağlanmıştır. Özelliklerin sınıflandırılmasında destek vektör makineleri kullanılmıştır. Sonuç olarak önerilen modelin maden sınıflandırmaya yönelik çalışmalarda araştırmacılara yol gösterici olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Baraboshkin, E.E., Ismailova, L.S., Orlov, D.M., Zhukovskaya, E.A., Kalmykov, G.A., Khotylev, O. V., Baraboshkin, E.Y., Koroteev, D.A., 2019. Deep convolutions for in-depth automated rock typing. arXiv 135, 104330. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104330>.

Chatterjee, S., 2013. Vision-based rock-type classification of limestone using multi-class support vector machine. *Appl. Intell.* 39, 14–27. <https://doi.org/10.1007/s10489-012-0391-7>.

Chaves, D., Fern´andez-Robles, L., Bernal, J., Alegre, E., Trujillo, M., 2018. Automatic characterisation of chars from the combustion of pulverised coals using machine vision. *Powder Technol.* 338, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.035>.

Chen, J., Pisonero, J., Chen, S., Wang, X., Fan, Q., Duan, Y., 2020a. Convolutional neural network as a novel classification approach for laser-induced breakdown spectroscopy applications in lithological recognition. *Spectrochim. Acta – Part B At. Spectrosc.* 166, 105801 <https://doi.org/10.1016/j.sab.2020.105801>.

Ebrahimi, M., Abdolshah, M., Abdolshah, S., 2016. Developing a computer vision method based on AHP and feature ranking for ores type detection. *Appl. Soft Comput. J.* 49, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.08.027>.

Fu, Y., Aldrich, C., 2018. Froth image analysis by use of transfer learning and convolutional neural networks. *Miner. Eng.* 115, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.005>.

Galdames, A., Mendoza, A., Orueta, M., de Soto Garc´ıa, I.S., S´anchez, M., Virto, I., Vilas, J.L., 2017. Development of new remediation technologies for contaminated soils based on the application of zero-valent iron nanoparticles and bioremediation with compost. *Resource-Efficient Technologies* 3, 166e176.

Gao, R., Sun, Z., Li, W., Pei, L., Hu, Y., Xiao, L., 2020. Automatic coal and gangue segmentation using U-net based fully convolutional networks. *Energies* 13, 829. <https://doi.org/10.3390/en13040829>.

Han, S., Li, H., Li, M., Luo, X., 2019. Measuring rock surface strength based on spectrograms with deep convolutional networks. *Comput. Geosci.* 133, 104312 <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104312>.

Iglesias, J.C.´A., Santos, R.B.M., Paciornik, S., 2019. Deep learning discrimination of quartz and resin in optical microscopy images of minerals. *Miner. Eng.* 138, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.032>.

Imamverdiyev, Y., Sukhostat, L., 2019. Lithological facies classification using deep convolutional neural network. *J. Pet. Sci. Eng.* 174, 216–228. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.023>.

Izadi, H., Sadri, J., Bayati, M., 2017. An intelligent system for mineral identification in thin sections based on a cascade approach. *Comput. Geosci.* 99, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.10.010>.

K. Kira, L.A. Rendell, The feature selection problem: traditional methods and a new algorithm, in: *AAAI*, vol. 2, 1992a, pp. 129–134.

Khorram, F., Morshedy, A.H., Memarian, H., Tokhmechi, B., Zadeh, H.S., 2017. Lithological classification and chemical component estimation based on the visual features of crushed rock samples. *Arab. J. Geosci.* 10, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3116-8>.

Li BQ, Hu LL, Niu S, Cai YD, Chou KC (2012) Predict and analyze S-nitrosylation modification sites with the mRMR and IFS approaches. *J Proteomics* 75: 1654.1665

- Li, J., Su, Z., Geng, J., Yin, Y., 2018. Real-time Detection of Steel Strip Surface Defects Based on Improved YOLO Detection Network. *IFAC-PapersOnLine* 51, 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.412>.
- Massinaei, M., Jahedsaravani, A., Taheri, E., Khalilpour, J., 2019. Machine vision based monitoring and analysis of a coal column flotation circuit. *Powder Technol.* 343, 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.056>.
- Mollajan, A., Ghiasi-Freez, J., Memarian, H., 2016. Improving pore type identification from thin section images using an integrated fuzzy fusion of multiple classifiers. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 31, 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.030>.
- Montes-Atenas, G., Seguel, F., Valencia, A., Bhatti, S.M., Khan, M.S., Soto, I., Becerra Yoma, N., 2016. Predicting bubble size and bubble rate data in water and in froth flotation-like slurry from computational fluid dynamics (CFD) by applying deep neural networks (DNN). *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 76, 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.031>.
- Patel, A.K., Chatterjee, S., Gorai, A.K., 2017. Development of machine vision-based ore classification model using support vector machine (SVM) algorithm. *Arab. J. Geosci.* 10, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2909-0>.
- Perez, C.A., Saravia, J., Navarro, C., Castillo, L., Schulz, D., Aravena, C., 2012. Lithological classification based on Gabor texture image analysis, in: 2012 International Symposium on Optomechatronic Technologies, ISOT 2012. IEEE, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ISOT.2012.6403273>.
- Sadeghiamirshahidi, M., Eslam Kish, T., Doulati Ardejani, F., 2013. Application of artificial neural networks to predict pyrite oxidation in a coal washing refuse pile. *Fuel* 104, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.016>.
- Si, L., Xiong, X., Wang, Z., Tan, C., 2020. A Deep Convolutional Neural Network Model for Intelligent Discrimination between Coal and Rocks in Coal Mining Face. *Math. Probl. Eng.* 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/2616510>.
- Wang, X., Song, C., Yang, C., Xie, Y., 2018. Process working condition recognition based on the fusion of morphological and pixel set features of froth for froth flotation. *Miner. Eng.* 128, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.017>.
- Xiong, Y., Zuo, R., Carranza, E.J.M., 2018. Mapping mineral prospectivity through big data analytics and a deep learning algorithm. *Ore Geol. Rev.* 102, 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.10.006>.
- Zhang, C., Yue, J., Qin, Q., 2020a. Deep quadruplet network for hyperspectral image classification with a small number of samples. *Remote Sens.* 12, 647. <https://doi.org/10.3390/rs12040647>.
- Zhang, Z., Liu, Ying, Hu, Q., Zhang, Zhiwei, Liu, Yang, 2020c. Competitive Voting-based Multi-class Prediction for Ore Selection, in: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, pp. 514–519. <https://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9217017>.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.04.2023
Kabul Tarihi : 28.07.2023

Received Date : 26.04.2023
Accepted Date : 28.07.2023

TARIMSAL TRAKTÖRLERLE YAPILAN YOL İÇİ TAŞIMACILIKTA KULLANICI BÖLÜMÜ YAPISININ HAVA AKIŞI DİRENCİ AÇISINDAN DENEYSEL İNCELENMESİ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF USER COMPARTMENT STRUCTURE IN TERMS OF AIR FLOW RESISTANCE FOR ON ROAD TRANSPORTATION WITH AGRICULTURAL TRACTORS

Hanifi KÜÇÜKSARIYILDIZ¹ (ORCID: 0000-0001-5218-3409)
Osman BABAYİĞİT² (ORCID: 0000-0003-3788-7787)
Eyüb CANLI^{3,*} (ORCID: 0000-0002-9358-1603)
Kazım ÇARMAN⁴ (ORCID: 0000-0002-9860-7403)

¹ Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Karaman, Türkiye
² Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye
³ Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
⁴ Selçuk Üniversitesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Eyüb CANLI, ecanli@selcuk.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada bir rüzgâr tüneli kullanılarak ölçeklendirilmiş tarımsal traktör modellerine etki eden hava akışı direnci deneysel olarak tespit edilmiştir. Traktör modelleri aynı şekle sahiptir fakat kullanıcının bulunduğu bölümde üç farklı tasarım denenmiştir. Bunlar kabinle kuşatılmış platform, güneşlikli platform ve devrilme sırasında kullanıcıyı koruyacak koruma çubuklu platformdur. Böylece kullanıcı bölümünün tasarımına bağlı olarak yol içi taşımacılıkta traktörlerin maruz kaldığı hava direnci değişimleri ilk defa deneysel olarak belirlenmiş olmaktadır. Geometrik benzerlik esaslarına göre rüzgâr tüneline kullanılan traktör modelleri 1:13 oranında hazırlanmıştır. Rüzgâr tüneli testlerinde kinematik ve dinamik benzerlik sağlanamamakta fakat Reynolds sayısı bağımsızlığı elde edilebilmektedir. Rüzgâr tüneli hava akış hızı aralığında farklı hava hızlarında deneyler yapılarak bir Reynolds sayısı aralığı taranmıştır. Bu aralıkta modellere etki eden aerodinamik direnç kuvvetleri ve traktörlerin simetri ekseninde hava akışı kaynaklı basınç dağılımları ölçülmüştür. Elde edilen ölçümlerden boyutsuz aerodinamik direnç katsayısı ve basınç katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre kabin kullanımı aerodinamik direnci %3-15 aralığında arttırmaktadır. Düşük hızlarda kabin kullanımı kaynaklı direnç artış yüzdesi fazlayken yüksek hızlarda azalmaktadır. Kabin kullanımı sonucunda akışa dik traktör ön izdüşüm alanı artmaktadır. Fakat aerodinamik dirençteki artış ön iz düşüm alanındaki artışa göre bir mertebe daha düşüktür. Kabin kullanımının iş güvenliği açısından sağladıkları da düşünüldüğünde kabin kullanımı kaynaklı aerodinamik direnç artışının kabul edilebilir bir maliyet olduğu anlaşılmaktadır. Çalışma sonuçlarının tarımsal traktörlerle yol içi taşımacılıkta enerji tüketiminin ayrıştırılmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik, direnç katsayısı, kinematik benzerlik, Reynolds bağımsızlığı, rüzgâr tüneli.

ABSTRACT

In this study, the air flow resistance acting on scaled agricultural tractor models using a wind tunnel was determined experimentally. Tractor models have the same shape, but three different designs were tried on the operator platform section. These are the platform surrounded by the cab, the sunshade platform and the platform with the protection bar to protect the user in case of overturning. Thus, depending on the design of the user section, the air resistance changes that the tractors are exposed to in on-road transportation are determined experimentally for the first time. Tractor models used in the wind tunnel were prepared in a ratio of 1:13 according to geometric similarity principles.

ToCite: KÜÇÜKSARIYILDIZ, H., BABAYİĞİT, O., CANLI, E. & ÇARMAN, A., (2023). TARIMSAL TRAKTÖRLERLE YAPILAN YOL İÇİ TAŞIMACILIKTA KULLANICI BÖLÜMÜ YAPISININ HAVA AKIŞI DİRENCİ AÇISINDAN DENEYSEL İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 694-706.

In wind tunnel tests, kinematic and dynamic similarity cannot be achieved, but Reynolds number independence can be obtained. A Reynolds number range was surveyed by performing experiments at different air velocities in the wind tunnel air flow rate range. In this range, the aerodynamic resistance forces acting on the models and the air flow-induced pressure distributions in the symmetry axis of the tractors were measured. Dimensionless aerodynamic drag coefficient and pressure coefficient values were calculated from the measurements obtained. According to the calculations, the use of the cabin increases the aerodynamic resistance in the range of 3-15%. While the percentage of resistance increase due to cabin usage is high at low speeds, it decreases at high speeds. As a result of the use of the cabin, the tractor front projection area perpendicular to the flow increases. However, the increase in aerodynamic drag is one order lower than the increase in the frontal projection area. Considering the benefits of cabin use in terms of occupational safety, it is understood that the increase in aerodynamic resistance due to cabin use is an acceptable cost. It is expected that the results of the study will contribute to the separation of energy consumption in on-road transportation with agricultural tractors.

Keywords: Aerodynamic, resistance coefficient, kinematic similarity, Reynolds independency, wind tunnel.

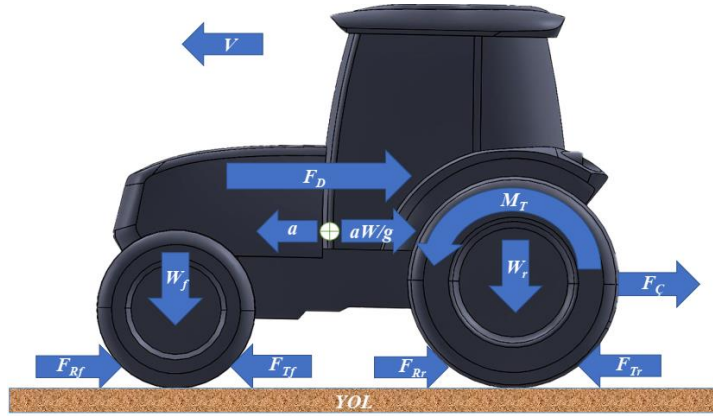
GİRİŞ

Tarımsal traktörlerin artan becerilerinden bir tanesi seyir hızıdır (Canlı vd., 2022; Mattetti vd., 2021; Mederle vd., 2015). Traktörlerin artan seyir hızı, yol içi taşımacılıkta traktör-tarım arabası çiftinin daha çok görülmesine neden olmaktadır. Yapılan literatür incelemelerinde tarımsal traktörün kullanım süresinin neredeyse yarısına yakınının tarla dışında gerçekleştiği ifade edilmektedir (Altıntaş, 2015). Ülkemizde ve dünyada tarımsal traktör sayıları göz önüne alındığında ciddi bir kullanım süresi ortaya çıkmaktadır (El Gaouti vd., 2021). Bu kullanımın yol içi taşımacılığa yönelik kısmının ekonomik ve çevresel etkilerine yönelik bir çalışma bulunamamıştır. Bu noktada böyle bir çalışmanın faydalı olacağı vurgulanmalıdır. Fakat diğer bir önemli konu, tarımsal traktörlerin yol içi taşımacılıkta kullanımlarının ekonomik ve çevresel etkilerinin azaltılmasıdır. Böyle bir çalışma için hangi etkenlerin ne ölçüde etkin olduklarının bilinmesi gerekmektedir. Burada kastedilen, çevresel ve ekonomik etkilere yol açan fiziksel olguların bileşenlerine ayrılmasıdır. Çünkü ancak bu şekilde üzerinde çalışılacak konular belirlenebilir ve çalışmalar sayesinde iyileştirmeler elde edilebilir. Aerodinamik direnç de belirlenmesi gereken bileşenlerden biridir. Taşımacılıkta seyir hızları genellikle sabit seyir hızlarıdır (Wong, 2008; Hucho, 1990). Sabit seyir hızı ile ilerleyen karayolu taşıtlarında en önemli enerji tüketen olgu hava direncinin oluşturduğu kuvvet ve bu kuvveti yenebilmek için harcanan yakıttır (Urquhart vd., 2020). Dolayısıyla tarımsal traktörlerin yol içi taşımacılığa denk gelen hızlarda aerodinamik performanslarının belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Tarımsal traktörler iş makineleridir. Sürücüleri/kullanıcıları uzun saatler boyunca bu iş makinesi üzerinde çalışmaktadır. Tarlada iş koşullarından kullanıcının olumsuz etkilenmesini önlemek, yol içi taşımacılıkta ve muhtelif kullanımlarda kullanıcının iş güvenliğini sağlamak (Oh vd., 2020) için tarımsal traktörlerde sürücü kabini kullanımı çok yaygınlaştığı düşünülmektedir. Fakat bu görüşe dair sayısal bir veri bulunamamıştır. Traktör kabinleriyle ilgili yapılan bilimsel çalışmalar genellikle titreşim (Zheng vd., 2019) ve yapısal özellikler üzerinedir (Karakuşak & Yetkin, 2020; Kumar vd., 2015). Konuyla ilgili yaptığımız araştırmalarda ülkemizde 10 adet kabin üreticisi bulunduğu ve 2021 yılı itibarıyla 68000 adet traktör kabini üretildiği tespit edilmiştir (Anonim, 2022). Diğer taraftan 2022 yılında ülkemizde 82500 traktör üretildiği, ithalat ihracat dengesinde ise 2021 yılında ihracatın ithalattan yaklaşık 10000 adet fazla olduğu görülmektedir (İleri, 2023). Bu durumda ülkemizde kalan net yeni traktör sayısının neredeyse tamamına karşılık bir kabin üretildiği anlaşılmaktadır. Tarımsal traktörlerde sürücü kabini kullanımının iş güvenliği açısından bariz olan etkisine rağmen kabin kullanımı yasal bir zorunluluk değildir. Bu nedenle traktörlerdeki kabin geometrisinin bireysel aerodinamik etkisinin de belirlenmesi gerektiği düşünülmüştür.

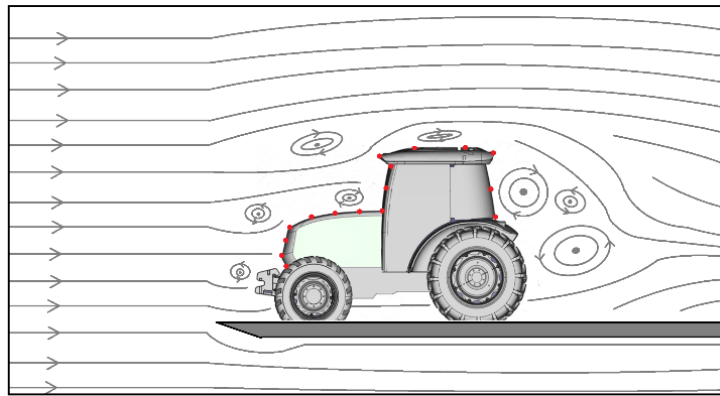
Bu çalışmada tanımlanan ve daha sonra üzerinde deneysel araştırma yapılan problemin anlaşılabilirliği için öncelikle Şekil 1'deki şematik görselde tarımsal traktörün seyri sırasında üzerine etki eden direnç kuvvetlerinin anlaşılması gerekmektedir. Şekilde gösterilen sembollerin açıklamaları referanslar listesinden önce kısaltmalar bölümünde açıklanmıştır. Şekilde lastiklere etkiyen yuvarlanma direnci, varsa traktörün çektiği bir yükten dolayı etkiyen çeki kuvveti, ivmelenme ve frenleme sırasında oluşan atalet kuvveti ve ilerleme yönünün tersine etkiyen aerodinamik direnç kuvveti görülmektedir. Bahsedilen kuvvetlerden aerodinamik direnç kuvveti, ilerleme hızının karesiyle orantılı olduğu için yol içi taşımacılığa karşılık gelen hızlarda üssel olarak artmaktadır. Artan traktör hızlarına bağlı olarak aerodinamik direnç kuvvetinin diğer direnç kuvvetlerinden izole bir şekilde belirlenmesi bu çalışmadaki problemlerden biridir. Bu kuvvetin kullanıcının bulunduğu bölümün tasarımına göre değişip değişmediği de

araştırmanın diğer bir sorusudur. Yöntem bölümünde izah edileceği üzere problem deneysel bir yolla incelenmiştir. Traktör şekli kendine has bir geometriye sahiptir. Yine de belirli bir geometri üzerinde çalışabilmek için Erkunt Traktör A.Ş.'nin ticari bir modeli seçilmiş ve araştırmadaki parametre izolasyonuna göre geometri üzerinde değişiklikler ve basitleştirmeler yapılarak geometri çalışmaya uygun hale getirilmiştir. Araştırma öncesinde, aerodinamik dirence yol açan fiziksel olguların aslında traktörün yüzeyindeki basınç dağılımının yüzey integrali ile bulunan kuvvet olduğu anlaşılmıştır. Yani traktörün üst akımına bakan yüzeylerde oluşan yüksek basınç bölgeleri ile traktörün art akım yönüne bakan yüzeylerdeki alçak basınç bölgeleri arasındaki basınç farkı hareket yönüne zıt bir kuvvet oluşturmaktadır. Bu açıklama doğal olarak konuyla ilgili literatürün ve teorik kaynakların bir sonucudur (Çengel & Cimbala, 2018; Wong, 2008). Burada yüksek basıncın sebebi traktör yüzeylerine dik temas eden havanın toplam basıncının statik basınca dönüşmesidir. Diğer taraftan traktör yüzeylerine paralel akışta Bernoulli prensibine uygun olarak hız arttıkça statik basınç azalmaktadır. Ayrıca bazı yüzeylerde akış ayrılmaları olacağı ve akış ayrılmalarına paralel dönümlü akış bölgelerinin oluşabileceği de çalışma öncesinde öngörülmüştür. Bu durumun izahına yönelik şematik bir görsel Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Seyir Halindeki Tarımsal Traktöre Etkiyen Direnç Kuvvetlerinin Şematik Gösterimi

Şekil 1'de a doğrusal ivme (m/s^2), F_C çeki kuvveti (N), F_D aerodinamik direnç kuvveti (N), F_R yuvarlanma direnci (N), F_{Rf} ön tekerlekteki yuvarlanma direnci (N), F_{Rr} arka tekerlekteki yuvarlanma direnci (N), F_T tahrik kuvveti (N), F_{Tf} ön tekerlekteki tahrik kuvveti (N), F_{Tr} arka tekerlekteki tahrik kuvveti (N), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), M_T tahrik torku (Nm), V ilerleme hızı (m/s), W traktör ağırlığı (N), W_f traktörün ön aks ağırlığı (N), W_r traktörün arka aks ağırlığı (N) göstermektedir.



Şekil 2. Traktörün Seyri Sırasında Etrafındaki Zaman Ortalamalı Akım Çizgilerinin Şematik Sunumu

Literatürde iş makineleri ve ticari çekiciler için çok sayıda aerodinamik inceleme bulunmaktadır (Chowdhury vd., 2019; Martini vd., 2011; Modi vd., 1995; Drollinger, 1987). Bahsedilen çalışmalarda seyir halindeki araçların geometrik parametrelerinin aerodinamik dirence etkileri sunulmaktadır (Cooper, 2004; Wood & Bauer, 2003). Bazı çalışmalarda geometriler üzerinde değişiklikler denenerek aerodinamik direnç azaltılmaya çalışılmaktadır (Chilbule vd., 2014; Van Raemdonck & Van Tooren, 2008). Dolayısıyla aerodinamik direncin azaltılmasına yönelik bazı

sistemik yaklaşımlar ve ortak çözümler ortaya çıkmıştır (Peng vd., 2018; McAuliffe, 2015). Genellikle sunulan çözümler aktif ve pasif olarak ikiye ayrılabilir (Biswas vd., 2019; Hol & Agrewale, 2019). Aktif çözümlerde bir miktar enerji harcanarak akış üzerinde değişiklik yapılırken pasif yöntemler genellikle taşıt geometrisindeki değişikliklerdir (Vignesh vd., 2019; Sivaraj vd., 2018). Sıklıkla kullanılan çözümlerin tarımsal traktör aerodinamiğine de uyarlanması öngörülebilir. Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde genellikle rüzgâr tüneli ve ölçekli modeller kullanıldığı anlaşılmaktadır (Gulavani vd., 2019). Deneysel yöntemde de ortak bir sürecin işletildiği görülmektedir (Jacuzzi & Granlund, 2019). Genellikle ölçekli modellerde incelenmesi istenen geometrik parametreler belirlenerek diğer etkenler izole edilmekte, bu iş geometri üzerinde basitleştirmeler yapılarak uygulanmaktadır (Ahmed vd., 1984). Daha sonra sabit tutulan geometrik modele farklı hızlarda hava akışı tek bir doğrultuda uygulanmaktadır (Cogotti vd., 2017). Burada bir Reynolds sayısı (Re) aralığında deneyler gerçekleştirilmekte ve Re sayısı artarken aerodinamik direnç katsayısının değişmediği aralık tespit edilmektedir (Dalesio vd., 2017). Böylece elde edilen boyutsuz katsayı ile gerçek yol koşullarına denk gelen Re sayılarına ekstrapolasyon yapılarak gerçek durum hakkında yorum yapılmaktadır (Bayındırlı vd., 2018; Bayındırlı, 2015). Deneysel çalışmaların ayrıca sayısal çalışmaların doğrulanmasında kullanıldığı (Palanivendhan vd., 2021) ve daha sonra sayısal çalışmalarla detaylı incelemeler yapılan örnekler de sıklıkla karşılaşılmaktadır (Bauskar vd., 2019). Yine literatür incelemelerinde denenen geometrik değişikliklerin marjinal bir değişikliğe neden olmadığı (Saleh & Ali, 2020), yine de elde edilen %1-5 arasındaki değişimlerin taşıtlardaki yoğun kullanım ve büyük enerji tüketimi dikkate alındığında önemli addedildiği görülmektedir (Patidar vd., 2015; Van Raemdonck & Van Tooren, 2008).

Doğrudan traktör aerodinamiği üzerine yapılmış deneysel bir bilimsel çalışma bulunamamıştır. Literatürde karşılaşılan üç traktör aerodinamiği çalışmasından ikisinde traktör geometrisi bir sayısal ağ yöntemini denemek için karmaşık bir geometri arayan araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Hsu vd., 2016; Xu vd., 2016). Araştırmacılar 0,8 civarında bir aerodinamik direnç katsayısı (C_D) bulmuşlardır. Fakat araştırmacılar herhangi bir aerodinamik direnç kuvveti vermediği ve traktör boyutları da net tarif edilmediği için aerodinamik direnç kuvveti (F_D) hesaplanamamaktadır. Ayrıca Reynolds sayısı bağımsızlığı da net biçimde tarif edilmemiştir. Diğer çalışma ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanarak kabinli ve platformlu traktör geometrisinin C_D ve F_D değerini vermekte ve daha çok HAD yöntemi üzerinde durmaktadır (Canlı vd., 2022). Bahsedilen son çalışmada herhangi bir deneysel doğrulama ve inceleme bulunmamaktadır.

Giriş bölümünde tarif edilen motivasyon ve problem tarifine istinaden, literatür incelemesinden de yola çıkılarak bu çalışmada tarımsal traktörleri temsilen bir temel geometri seçilmiş ve bu geometrinin kabinli, platformlu ve yuvarlanma durumunda kullanıcı güvenliği için koruma çubuklu türevleri aerodinamik açıdan deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel incelemede bir rüzgâr tüneli ve ölçekli modeller kullanılmıştır. Bu yolla aerodinamik direnç kuvveti traktörün seyir halinde üzerine etkileyen diğer etkenlerden izole edilmiş olmaktadır. Ayrıca traktör yüzeyindeki gözeneklilik, ısı değiştiriciler ve/veya klima sistemi gibi ek hava akışına neden olacak yükler, yolun ve tekerlerin bağıl hareketleri gibi bazı etkenler de çalışmada göz ardı edilmiştir. Böylece sadece traktörde incelenen geometrik parametrelerin etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Göz ardı edilen aerodinamik etkilerin gelecek çalışmalarla olay fiziğinin gerçeğe yaklaştırılması için eklenebileceği öngörülebilir. Elde edilen sonuçlar ilgili sektörde traktör kabinlerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir, ayrıca tarımsal traktörlerin yol içi taşımacılıkta çevresel ve ekonomik etkileri incelenirken aerodinamik etkilerin incelenmesinde yararlanılabilecektir. Yazının devamında, yöntem bölümünde, kullanılan yaklaşımın detayları sunulmuştur. Daha sonra elde edilen nicel sonuçlar grafiksel şekilde sonuçlar ve tartışma başlığı altında sunulmuş ve burada sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç bölümünde ise çalışmanın nihai çıktılarına değinilmiştir.

YÖNTEM

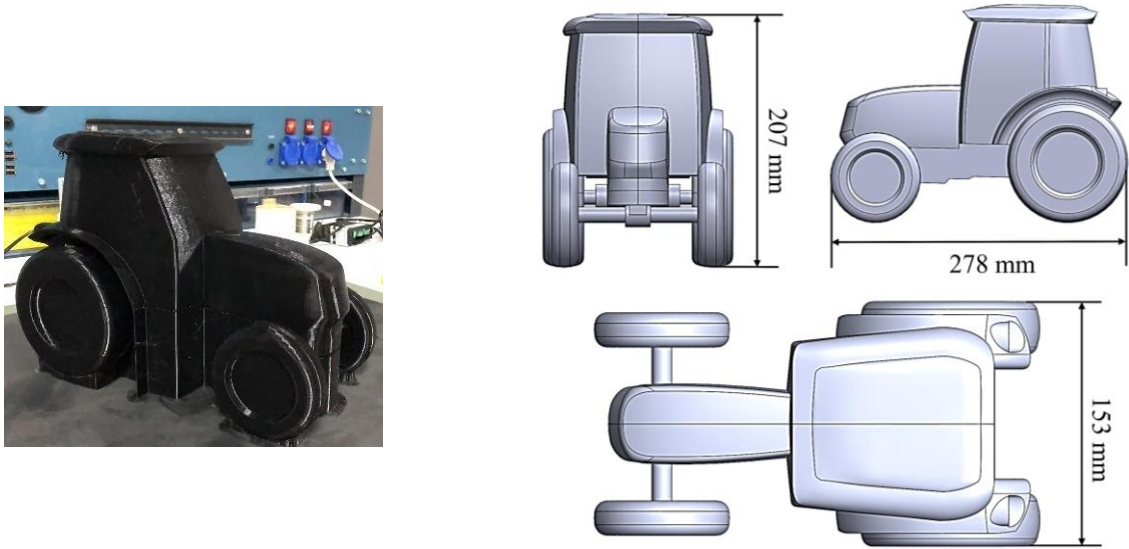
Bu çalışmada deneyler Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Prof. Dr. Şinasi YETKİN Araştırma ve Uygulama Tesisleri'nde bulunan 500×500×1500 mm deney odasına sahip rüzgâr tüneline yapılmıştır. Deneyler için 1:13 ölçekli traktör modelleri hazırlanmıştır. Ölçek oranının sebebi rüzgâr tüneli blokaj oranını literatürde önerilen 0,1 değerinde tutmaktır (Çengel & Cimbala, 2018). Rüzgâr tüneline; 5,6, 11,1, 16,7, 22,2, 27,8 ve 33,3 m/s olmak üzere 6 farklı serbest akış hızında model traktörün simetri ekseninde statik basınç dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca bir yük hücresi kullanılarak F_D ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan traktör geometrisi ve formu, Erkunt marka Nimet 75E serisi traktörden uyarlanmıştır.

Ölçekli olarak üretilen traktör modeline ait bir örnek görsel ve ölçüleri Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 4'te ise ölçeklenmemiş durumdaki traktör geometrilerinin seyir doğrultusuna göre ön izdüşüm alanlarının değişimi gösterilmiştir. Burada amaç, ölçülen F_D değerleri boyutsuz hale getirilip C_D olarak ifade edilirken kullanılan izdüşüm

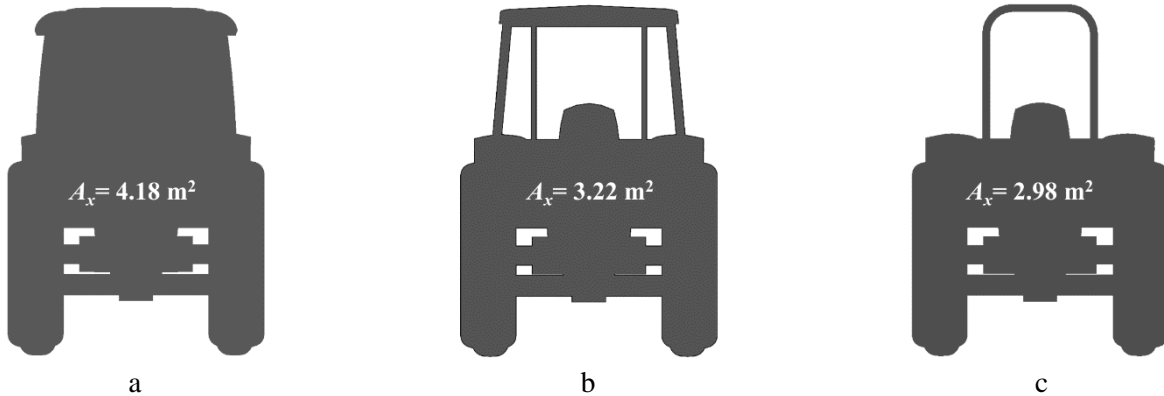
alanındaki değişimi vurgulamaktır. Aslında geometri değişimlerinin mutlak etkisini karşılaştırmak için F_D kullanmak gerekir. Çünkü enerji tüketimine neden olan fiziksel olgu F_D 'dir. Fakat sonuçların gerçek boyutlara ekstrapolasyonu ve sonuçların bir geometri tipi için evrenselleştirilmesi için de C_D gereklidir. Yine de okuyucunun kıyasları C_D üzerinden yapması durumunda, farklı ön izdüşümlerine göre hesaplanan C_D değerlerinin yanıltıcı olacağı hatırlatılmalıdır. Bu noktada C_D 'nin F_D 'den nasıl çekildiği denklem (1) ile aşağıda gösterilmiştir.

$$C_D = \frac{2F_D}{A_x \rho V^2} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de A_x hava akış yönüne dik model kesit alanını (m^2) ve ρ hava yoğunluğunu (kg/m^3) göstermektedir. Kullanılan rüzgâr tünelinin bir görseli Şekil 5'te sunulmaktadır. Aynı rüzgâr tünelinin şematik tanımı ise Şekil 6'da verilmiştir.



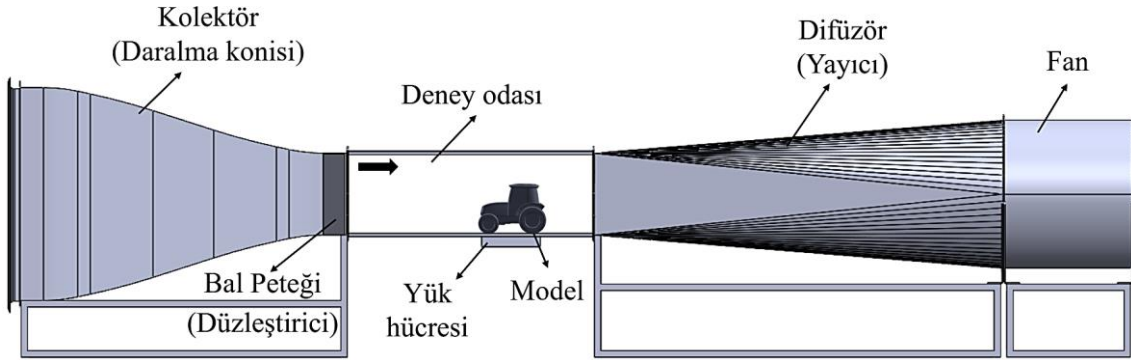
Şekil 3. a. Üç Boyutlu Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Bir Ölçekli Model Görseli. b. 1:13 Ölçeğindeki Modelin Ölçüleri



Şekil 4. a. Kabinli Geometri. b. Platformlu Geometri. c. Koruma Çubuklu Geometri.

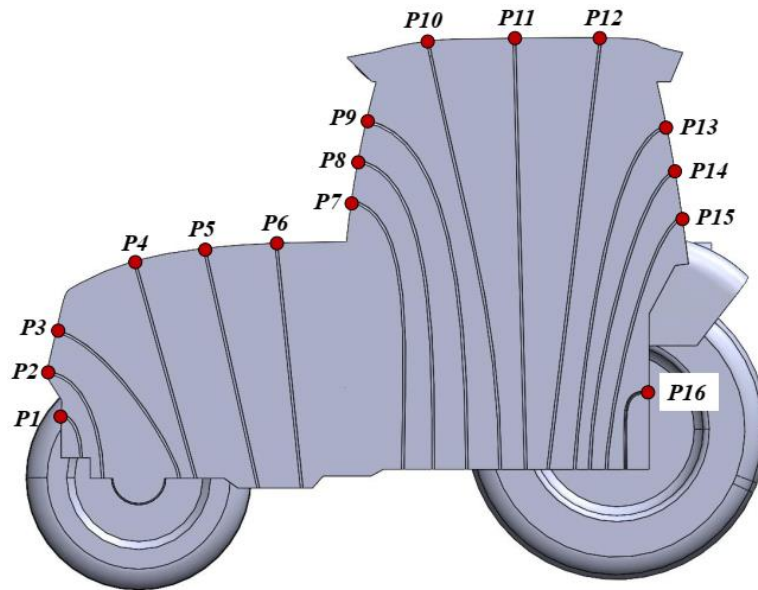


Şekil 5. Rüzgâr Tüneline Dair Görsel



Şekil 6. Rüzgâr Tünelinin Şematik Tarifi

Deneyleri yapılan modellerde simetri ekseninde basınç dağılımının belirlenebilmesi için Şekil 8'deki gibi bir tasarım yapılmıştır.



Şekil 7. Basınç Ölçme Deliklerinin Dağılımı

Basınç ölçüm sonuçlarının boyutsuz basınç katsayısı (C_p) cinsinden gösterimi eşitlik (2)'de sunulmuştur.

$$C_p = \frac{2P}{\rho V^2} \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki P sembolü model üzerinde herhangi bir noktadaki statik basınç değerini (Pa) göstermektedir. Re 'nin hesaplanmasında (3) nolu ifadeden faydalanılmıştır. Bütün veri indirgeme ve hesaplama adımlarında havanın viskozitesi ve yoğunluğu değerleri, deneylerin yapıldığı sırada ölçülen atmosfer basıncına ve sıcaklığına bağlı değerler termodinamik tablolardan ve ifadelerden çekilmiştir.

$$Re = \frac{V \rho L_c}{\mu} \quad (3)$$

Eşitlik (3)'de yer alan L_c karakteristik uzunluğu ifade etmektedir ve eşitlik (4)'te yer alan eşdeğer hidrolik çap kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca μ dinamik viskoziteyi (kg/ms) göstermektedir. Doğrudan izdüşüm alanının karekökünü almak da benzer bir sonuç vermektedir çünkü traktör geometrisinin izdüşüm alanı 1 değerine yakın en-boy oranı ile dikdörtgene yakındır.

$$L_c = D_h = \frac{4A_x}{P_A} \quad (4)$$

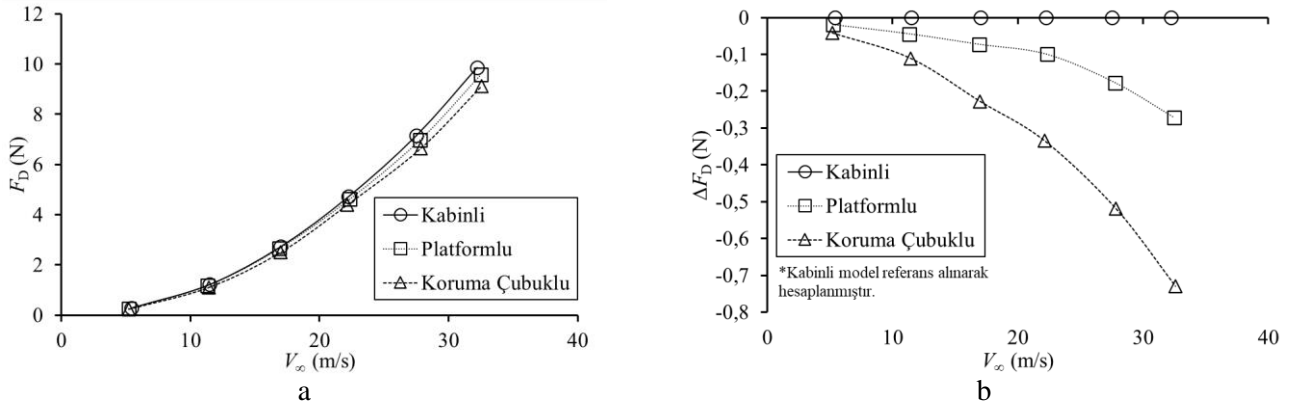
Eşitlik (4)'te gösterilen P_A ön izdüşüm alanının çevresidir (m). Veri indirgeme ve hesaplamalarda kullanılan hava hızı ölçümü için sıcak tel hız ölçümü kullanılmıştır. Traktör modelinin yukarı akımında, akış düzleştirici bal peteğinden sonra kanalın orta noktasına uzanan akışa dik sıcak tel sondası ile ölçülen hız değeri hesaplamalarda ve sonuçlarda kullanılmıştır. Kuvvet ölçümünde üç eksenli bir yük hücresinden faydalanılmıştır. Basınç ölçümü için ise basınç deliği sayısı kadar basınç ölçer kullanılmıştır. Fark basınç ölçerlerin bir ucu atmosfere açık bırakılmıştır. Böylece basınç sensörlerinden gösterge basınç değerleri okunmuştur. Ölçümler bir PLC ile kayıt altına alınmış ve ayrıca bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Veri indirgemedede kullanılan değerler için deney sırasında kararlı rejimde yaklaşık 120 saniyelik süre boyunca okunan değerlerin zaman ortalaması alınmıştır. Ölçümler 1 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir. Sensörlerin 1 saniyelik cevap süreleri içinde kendi içindeki okumaları PLC tarafından ortalananmaktadır. PLC aynı zamanda hava hızının ayarlanmasında kullanılan fan motorunu da kontrol etmektedir ve elektrik motorunu bir sürücü vasıtasıyla sürmektedir.

Yapılan deneysel çalışmanın belirsizliği kuvvet ölçümünde %0,01, hız ölçümünde %3,62-6,69 ve C_D hesabında %7,36-13,45 aralıklarında bulunmuştur. Ölçülen parametrenin değeri küçüldükçe bağlı belirsizlik artmaktadır. Burada, belirsizliğin standart sapmadan farklı olduğu, bu çalışmadaki deneysel tekrarlarda standart sapmanın sifira yaklaştığı ve dolayısıyla karşılaştırmalı sonuçların güvenilir olduğu vurgulanmalıdır. Belirsizlik, mutlak değerler cinsinden farklı bir tesiste yapılacak deneylerde elde edilebilecek sonuçlarla mevcut sonuçlar arasındaki yüzde fark gibi düşünülmelidir. Deneysel belirsizlik hesabı Holman (2011)'a göre yapılmıştır.

Rüzgâr tüneli deneylerinde tünelde elde edilebilen asgari ve azami hızlar arasında 6 farklı hızda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Veri indirgeme ile boyutsuz parametreler hesaplanmış ve özellikle C_D 'nin Re 'den bağımsız hale geldiği, diğer bir değişle Re artsa da sabit kaldığı aralığın elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef gerçekleştiği için ilave önlemlere gerek kalmamıştır. Elde edilen C_D 'nin kullanılmasıyla gerçek boyuttaki traktörlere etkiyecek F_D 'nin hesaplanması mümkün olmaktadır. Diğer taraftan F_D 'nin ölçekli modellerde karşılaştırmalı yorumlarda kullanılması, geometrilerin etkisi açısından önemli ve gereklidir. Benzer şekilde basınç ölçüm sonuçları farklı hızlarda farklı mutlak değerler almasına rağmen C_p 'nin Re bağımsızlığından sonra neredeyse aynı dağılımı göstermesi hem Re bağımsızlığına bir delil hem de gerçek boyutlu traktörlerdeki mutlak basınç dağılımına ekstrapolasyonda bir araçtır.

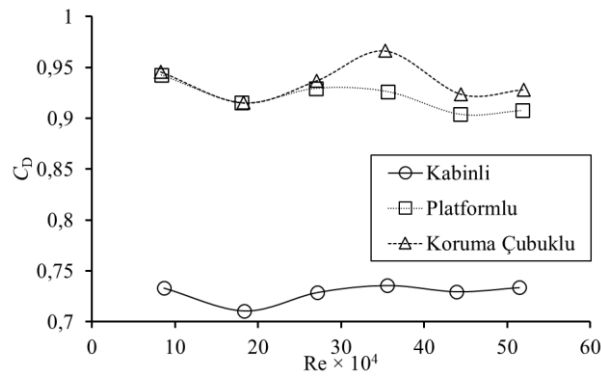
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde sunulan ilk grafik, incelenen ölçekli modellerin farklı rüzgâr tüneli hava akım hızlarında maruz kaldıkları hava direnci kuvvetinin değişimidir ve Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 8'de sunulan iki grafikten soldaki mutlak kuvvet değerlerini gösterirken sağdaki grafik kabinli traktör temel alınarak diğer modellerde oluşan kuvvetlerin farklarını göstermektedir.



Şekil 8. a. Ölçekli Modellerin Maruz Kaldıkları Hava Direnci Değerlerinin Rüzgâr Tüneli Hava Akım Hızıyla Değişimi. **b.** Kabinli Traktör Modeli Temel Alınarak Diğer Modellerde Gerçekleşen Kuvvet Farkları

Şekil 8 incelendiğinde artan seyir hızı ile traktör modelleri arasındaki aerodinamik direnç kuvveti farkının arttığı görülmektedir. En büyük aerodinamik direnç kuvveti kabinli traktörde gerçekleşirken platformlu modelde direnç değeri bir miktar azalmakta ve en düşük direnç kuvvetleri koruma çubuklu modelde görülmektedir. Bu durumun sebebi akışa dik izdüşüm alanındaki azalma olarak yorumlanabilir. Bu noktada küçük kuvvet farklarının mutlak değerleri okuyucuyu yanıltmamalıdır. Traktör modelleri ölçekli olduğu için bu küçük mutlak değerler oluşmaktadır. Gerçek boyutlu traktörlerde oluşacak farkların kabaca 13 kat daha fazla olacağı öngörülebilir. Bu durumla ilgili bir hesaplama yazının devamında verilmiştir. Kuvvetin hava hızı ile doğrusal olmayan artışı, diğer bir ifade ile üstel artışının sebebi akışın hızın karesiyle orantılı olarak artan kinetik enerjisidir. Eşitlik (1) incelenerek bu durum daha iyi anlaşılabilir. Bu noktada C_D 'nin değişiminin de sonuca etkisi olacağı fikri oluşabilir. Şekil 9'da C_D 'nin Re ile değişimi sunulmuştur. Görüldüğü üzere C_D değerleri Re ile bariz bir şekilde değişmemekte, başka bir ifade ile Re 'den bağımsız sabit bir değere sahip olmaktadır. F_D değerleri yakın mutlak değerler alırken traktör modellerinin ön izdüşüm alanları büyük ölçüde değiştiği için C_D değerleri arasında farklılıklar bulunmaktadır fakat daha önce de izah edildiği üzere burada önemli olan C_D 'nin Re 'ye göre davranışını tespit etmektir. C_D değerleri gerçek boyutlu traktörün belirli bir hızdaki F_D değerini bulmakta kullanılabilir. Artan Re 'ye rağmen C_D değerleri neredeyse sabit kalmaktadır. Gerçek boyutlu traktörlerde seyir halindeki Re değerleri 10^6 mertebesinde olduğu için C_D değerleri bu çalışmada tespit edilen ortalama bir değer olarak alınabilir.



Şekil 9. C_D 'nin Re ile Değişimi

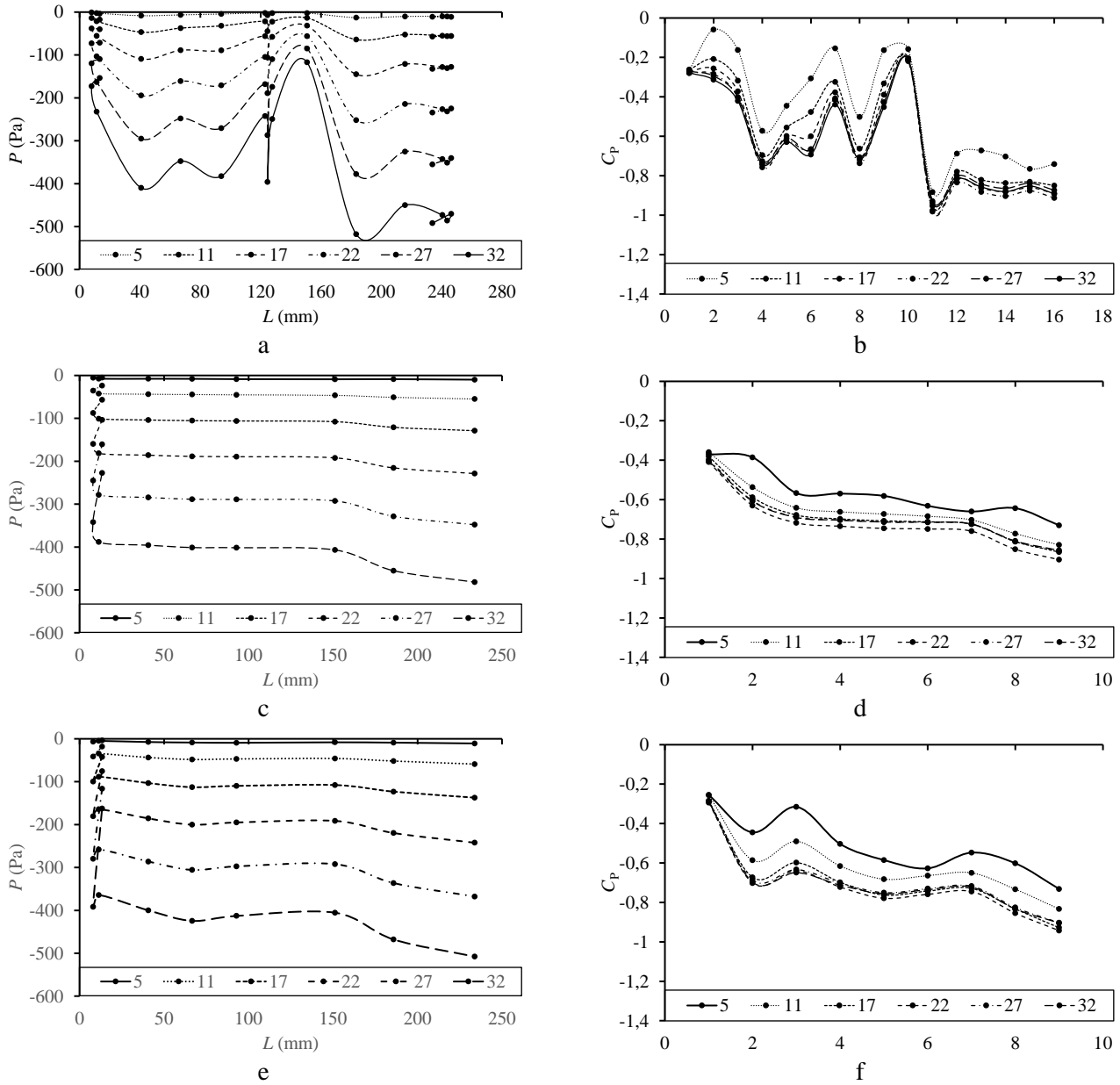
Şekil 8 ve 9 beraber yorumlandığında C_D değerlerinin sabit olduğu kabulüyle F_D değerlerindeki üstel artışın sadece hız artışından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca C_D değerlerinin incelenen aralıkta ve artan Re değerlerine bağlı olarak neredeyse sabit kalması, traktör modelleri ve geometrisi etrafındaki akış şablonunun değişmediğini, sadece etkisinin mutlak değerinin arttığını göstermektedir. Geometriler arasındaki kuvvet farkının mutlak değeri hız arttıkça artmasına rağmen aslında yüzdesel olarak azalmaktadır. Kabinli traktöre kıyasla platformlu traktördeki kuvvet farkı düşük hızlarda %7 iken hız arttıkça %3'e düşmektedir. Benzer şekilde kabinli model ile koruma çubuklu model kıyaslandığında düşük hızlardaki kuvvet farkı %15 iken hız arttıkça fark %7'ye inmektedir. Bununla birlikte aerodinamik direnç kaynaklı yakıt tüketiminin, azalan oransal değere rağmen yüksek hızlarda F_D 'nin artan mutlak

değeri nedeniyle artacağı unutulmamalıdır. C_D 'nin ortalama değerleri kabinli traktör için 0,73, platformlu traktör için 0,92 ve koruma çubuklu traktör modeli için 0,94 olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla 40 km/h sabit seyir hızıyla seyreden gerçek boyutlardaki traktörlerde sırasıyla kabinli, platformlu ve koruma çubuklu traktörlerde 230,74 N, 224,01 N ve 211,82 N aerodinamik direnç kuvveti oluşacaktır. Bu noktada kabinin sağladığı iş güvenliğinin görece az miktardaki direnç artışı karşılığında düşünülebilir. Diğer taraftan kabinin iz düşüm alanını %40 gibi büyük bir oranda arttırmasına rağmen neden aerodinamik direnç kuvvetini çok az arttırdığı sorulabilir. İz düşüm alanı şekil kaynaklı basınç farkından ortaya çıkan aerodinamik direnç kuvvetini oluşturan bir çarpandır fakat aerodinamik direnç kuvvetinin bir diğer bileşeni ise sürtünme kaynaklı direnç kuvvetidir. Kabin olmadığı durumda kullanıcı mahallinde akışa maruz kalan yüzey alanı önemli ölçüde büyümektedir. Böylece hava sürtünmesi kaynaklı sürtünme kuvvetinin oluştuğu yüzey büyümektedir. Ayrıca sürücü bölümündeki yüzey topolojisi büyük değişiklikler göstermektedir. Son olarak sürücü bölümü bir paraşüt benzeri etki oluşturacak şekilde bir boşluk bölümü oluşturmaktadır. Bu bölümde yüksek basınç bölgeleri oluşacağı için aerodinamik direnç kuvvetine katkı oluşacaktır. Yine de bu değerlendirmelerin ölçülen basınç dağılımı sonuçları dikkate alınarak gözden geçirilmesi gerekir.

Şekil 10'da ölçülen basınç dağılımları ve buna göre hesaplanan C_P değerleri, okuma kolaylığı açısından, 6 farklı grafikte sunulmaktadır. Durgun havaya göre akış halindeki havada dinamik basınca dönüşen toplam basıncın değerinden dolayı fark basınç sensörleri negatif gösterge basınç, yani vakum ölçmektedir. Basınç dağılımları traktör modellerinde ölçüm deliğinin konumuna göre çizdirilmiştir. Kabinli traktör modelinde 18 adet delik bulunurken kabin bulunmayan geometrilere 9 adet ölçüm deliği bulunmaktadır. C_P değerlerinin dağılımında ise grafikler delik numarasına göre çizdirilerek daha rahat bir okuma amaçlanmıştır.

Şekil 10 incelenirken bazı hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Öncelikle basınç dağılım grafiklerindeki eğrilerin hava akış hızları ile isimlendirildiği ifade edilmelidir. Traktör modellerinin burun kısmından başlayarak aşağı akım yönünde traktörlerin simetri eksenini ile traktörün üst yüzeylerinin kesişimine açılan deliklerin akış doğrultusundaki konumları milimetre cinsinden ölçülmüş ve buralardaki vakum değerleri kaydedilmiştir. Test sırasındaki hava akış hızı büyüdükçe toplam basınçtan dinamik basınca dönüşen miktar artmakta ve dolayısıyla vakum değeri de mutlak değer olarak artmaktadır. Basınç dağılımı bütün traktör yüzeyinde okunabilseydi, bu dağılımın yüzey integrali de aslında aerodinamik direnç kuvvetini verecekti. Fakat sadece simetri ekseninde bir basınç dağılımı ölçümü yapıldığı için burada daha çok niteliksel bir değerlendirme yapmak daha uygun olacaktır. Basınç dağılımları mutlak değerleri hava artış hızıyla büyük oranda değişmektedir. Fakat eğrilerin değişim davranışlarının benzer olduğu görülmektedir. Bu durum traktör modelleri etrafındaki akışın test edilen her hava akış hızında aynı şekilde davrandığını düşündürmektedir. Dolayısıyla artan hava akış hızı aslında sadece yüzeye etki eden basıncın mutlak değerini arttırmaktadır. Kabinli traktörde akışa daha dik çıkan yüzeylerde vakum değerlerinin en küçük mutlak değerleri aldığı, akışa paralel yüzeylerde vakumun arttığı ve traktörün arka yüzeylerinde ise en büyük vakum değerlerinin oluştuğu görülmektedir. Kabinli traktörde motorun bulunduğu kısma denk gelen bölümde yüzeye etki eden basıncın yaklaşık olarak yola doğru bir kuvvet vektörü oluşturacağı düşünülürse, burun ve kabin ön cam kısımlarında traktör artizi bölgesine doğru yönlenecek kuvvet vektörlerinin traktörün artizindeki yüksek vakum nedeniyle eşdeğerde karşılanamayacağı ve dolayısıyla akış doğrultusunda traktör modeline net bir kuvvet etki edeceği anlaşılmaktadır. Böylece deneylerde okunan aerodinamik direnç kuvvetinin fiziksel nedeni basınç dağılımı ile gösterilmiş olmaktadır. Diğer taraftan platformlu ve koruma çubuklu modellerde kabin kısmındaki düşük vakum değeri oluşmadığı için net aerodinamik kuvvetin daha düşük oluşacağı anlaşılr.

Boyutsuz basınç olan C_P grafiklerinin basınç ölçüm deliklerinin sırasına göre çizdirildiği grafiklerde esas anlaşılacak istenen Re bağımsızlığının sağlanıp sağlanmadığıdır. Çünkü hava akış hızının ortalama değeri kullanılarak hesaplanan dinamik basınç değerine göre normalleştirilen basınç ölçümleri grafikte eş ölçekte gösterilebilmektedir. Boyutsuzlaştırılmamış basınç dağılımlarında farklı hava akış hızları farklı büyüklük mertebelerinde mutlak değerlere neden olmaktadır. Bu nedenle boyutsuzlaştırılmamış sonuçlardaki eğrilerin davranışları net olarak okunamamaktadır. Bu durum özellikle düşük hava hızları için böyledir. Fakat boyutsuzlaştırılmış basınç dağılımlarında, yani C_P grafiklerinde sayısal değerler aynı mertebededir. Böylece eğriler arasında niteliksel bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Re bağımsızlığının sağlandığı durumda C_P eğrilerinin üst üste çakışması beklenir. Çünkü C_D değişmemektedir. Gerçekten de yüksek hava akış hızlarında elde edilen eğrilerin hemen hemen çakıştığı görülmektedir. Böylece deneysel Re aralığında elde edilen C_D değerlerinin Re 'den bağımsız hale geldiği C_P grafikleriyle gösterilmiş olmaktadır. Kabinli modeldeki C_P dalgalanmalarının sebebi akış ayrılmaları ve daha sonra ayrılan akışın yeniden yüzeye tutunup konuma bağlı ivmelenmesidir. Diğer modellerde bu davranış kısmen sadece traktör burun geometrilerinde görülmektedir.



Şekil 10. Basınç Dağılımları ve Hesaplanan C_p Değerleri; Basınç Dağılım Grafikleri Basınç Ölçüm Noktasının Traktör Modelinin Burun Kısmından Başlayarak Art Akım Yönüne Doğru Mesafesine Göre Çizilirken C_p Değerleri Ölçüm Noktası Etiketine Göre Çizilmiştir. **a.** Kabinli Traktör Modeli Basınç Dağılımı **b.** Kabinli Traktör Modeli C_p Değerleri **c.** Platformlu Traktör Modeli Basınç Dağılımı **d.** Platformlu Traktör Modeli C_p Değerleri **e.** Koruma Çubuklu Traktör Modeli Basınç Dağılımı **f.** Koruma Çubuklu Traktör Modeli C_p Değerleri

SONUÇ

Bu çalışmada tarımsal traktörlerin yol içi taşımacılıkta maruz kaldıkları aerodinamik direnç kuvvetinin değeri ve bu değerinin kullanıcı bölümünün tasarımına göre nasıl değişeceği deneysel bir yaklaşım ile incelenmiştir. Deneysel yaklaşımda 3 adet ölçekli traktör modelinden faydalanılmış ve 1:10 blokaj oranına sahip bir rüzgâr tüneli teşkil edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aerodinamik direnç kuvveti, rüzgâr tüneli hava akış hızı ve traktör modellerinin simetri eksenindeki basınç dağılımları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar daha sonra boyutsuzlaştırılarak genelleştirilmiştir. Özellikle aerodinamik direnç katsayısı Re 'den bağımsız halde elde edilerek gerçek boyuttaki traktörlerin yol içi taşımacılıkta maruz kalacakları aerodinamik direnç kuvvetinin tespitine imkân tanıyacak bir veri üretilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda kabin yapısının aerodinamik direnci arttırdığı tespit edilmiştir. Düşük hızlarda kabinli traktör modelleri ile diğer modeller arasındaki aerodinamik direnç farklı yüzdesi daha fazla iken hava hızı arttıkça

bu oran azalmaktadır. Fakat aerodinamik direnç kuvvetinin mutlak değerleri ve dolayısıyla kuvvet farkının mutlak değeri dikkate alındığında düşük hızlarda fark küçükken yüksek hızlarda üssel olarak fark artmaktadır. Dolayısıyla kabinin aerodinamik kaynaklı yakıt tüketiminde ne kadar artışa yol açacağı değerlendirilirken nispeten yüksek yol içi taşımacılık hızlarına odaklanılmalıdır. Böyle bir araştırmaya imkân tanıyacak aerodinamik direnç katsayısı değerleri çalışma içinde sunulmuştur. Çalışmada sunulan başlıca bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kabinli traktöre kıyasla platformlu traktördeki kuvvet farkı düşük hızlarda %7 iken hız arttıkça %3'e düşmektedir.
- Kabinli model ile koruma çubuklu model kıyaslandığında düşük hızlardaki kuvvet farkı %15 iken hız arttıkça fark %7'ye inmektedir.
- C_D 'nin ortalama değerleri kabinli traktör için 0,73, platformlu traktör için 0,92 ve koruma çubuklu traktör modeli için 0,94 olduğu tespit edilmiştir.
- 40 km/h sabit seyir hızıyla seyreden gerçek boyutlardaki traktörlerde kabinli, platformlu ve koruma çubuklu traktörlerde sırasıyla 230,74 N, 224,01 N ve 211,82 N aerodinamik direnç kuvveti oluşacaktır.
- Kabinin sağladığı iş güvenliği dikkate alındığında aerodinamik direnç artışı kabul edilebilir görünmektedir. Kabin hava akış doğrultusuna göre ön iz düşüm alanını yaklaşık %40 arttırmasına rağmen yaklaşık 5 kat daha az aerodinamik kaynaklı direnç artışı oluşmaktadır.
- Aerodinamik direnç kuvvetleri basınç dağılımı grafikleri ile fiziksel olarak açıklanabilmektedir. Ayrıca Re bağımsızlığı da C_P dağılımlarıyla doğrulanabilmektedir.

Gelecekte gerçek işletme koşullarına daha fazla yaklaşabilmek için hem deneysel süreçlerde hem de HAD süreçlerinde traktörde basitleştirilen yüzeylerin orijinallerine yaklaştırılması, motor bölümündeki gözenekliliğin ve hava alıcıların eklenmesi, tekerlerin ve yolun bağlı hareketinin değerlendirmeye alınması, deneysel sonuçların HAD doğrulanmasında kullanılması ve HAD yaklaşımlarının geliştirilmesi, zamana bağlı değişimlerin aydınlatılması, traktörlerle birlikte taşımacılıkta kullanılan tarım arabalarının da değerlendirilmeye katılması gibi konuların çalışılması önerilmekte ve öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 08-M21 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Çalışma aynı zamanda kısmi olarak Hanifi Küçüksarıyıldız'ın doktora tez çalışmasından faydalanmaktadır. Yardımlarından dolayı araştırmacılar Erkunt Traktör A.Ş. firmasına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE transactions*, 473-503.
- Altıntaş, N. (2015). *Eskişehir İli Tarım İşletmelerinde Traktör Kullanımının Ekonomik Analizi*. (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Anonim. (2022). *Tarım Makine Sanayi Etkileşimi Raporu*. Retrieved from Ankara, Türkiye: <https://tarmakbir.org/raporlar/>
- Bauskar, M. P., Dhande, D. Y., Vadgeri, S., & Patil, S. R. (2019). Study of aerodynamic drag of sports utility vehicle by experimental and numerical method. *Materials Today: Proceedings*, 16, 750-757.
- Bayındırlı, C. (2015). *Çekici ve Çekici Römork Kombinasyonlarında Aerodinamik Dirençlerin İncelenmesi*. (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bayındırlı, C., Çelik, M., & Demiralp, M. (2018). Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 785-795.
- Biswas, K., Gadekar, G., & Chalipat, S. (2019). *Development and Prediction of Vehicle Drag Coefficient Using OpenFoam CFD Tool* (0148-7191). Retrieved from India:

- Canlı, E., Kucuksariyildiz, H., & Carman, K. (2022). Impact assessment of new generation high-speed agricultural tractor aerodynamics on transportation fuel consumption and related phenomena. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 6658-6680.
- Chilbule, C., Upadhyay, A., & Mukkamala, Y. (2014). Analyzing the profile modification of truck-trailer to prune the aerodynamic drag and its repercussion on fuel consumption. *Procedia Engineering*, 97, 1208-1219.
- Chowdhury, H., Juwono, R., Zaid, M., Islam, R., Loganathan, B., & Alam, F. (2019). An experimental study on of the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent. *Energy Procedia*, 160, 34-39.
- Cogotti, F., Pfadenhauer, M., & Wiegand, T. (2017). *Potential of Porsche reference cars for aerodynamic development*. Paper presented at the FKFS Conference.
- Cooper, K. R. (2004). Commercial vehicle aerodynamic drag reduction: historical perspective as a guide. In *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains* (pp. 9-28): Springer.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Akışkanlar mekaniği: Temelleri ve uygulamaları* (T. Engin Ed. 3 ed. Vol. 3). Palme Yayınevi: Ankara.
- Dallessio, L., Duncan, B., Chang, C., Gargoloff, J. I., & Tate, E. (2017). Accurate Fuel Economy Prediction via a Realistic Wind Averaged Drag Coefficient. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 10(1), 265-278.
- Drollinger, R. A. (1987). *Heavy duty truck aerodynamics* (0148-7191). Retrieved from SAE Technical Paper, No:870001, USA:
- El Gaouti, Y., Colin, G., Thiam, B., & Mazellier, N. (2021). Online vehicle aerodynamic drag observer with Kalman filters. *IFAC-PapersOnLine*, 54(2), 51-56.
- Gulavani, R. A., Chalipat, S., Dighe, A., & Anwar, F. (2019). *External Aerodynamic Drag Coefficient Prediction of Full Scale Passenger Car Based on Scale Model Assessment* (0148-7191). Retrieved from
- Hol, P. A., & Agrewale, M. R. (2019). *Aerodynamic analysis of passenger car with luggage carrier (roof rack)* (0148-7191). Retrieved from SAE Technical Paper, 2019-26-0067, India:
- Holman, J. P. (2011). *Experimental methods for engineers* (8 th ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc. : Americas, New York.
- Hsu, M.-C., Wang, C., Xu, F., Herrema, A. J., & Krishnamurthy, A. (2016). Direct immersogeometric fluid flow analysis using B-rep CAD models. *Computer Aided Geometric Design*, 43, 143-158.
- Hucho, W.-H. (1990). *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*. Butterworth-Heinemann, London, England.
- İleri, M. S. (2023). *Tarım Makineleri Endüstrisi Sektör İstatistikleri Raporu*. Retrieved from Ankara, Türkiye: <https://tarmakbir.org/wp-content/uploads/2023/02/tarmekstat022023sum.pdf>
- Jacuzzi, E., & Granlund, K. (2019). Passive flow control for drag reduction in vehicle platoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 104-117.
- Karakulak, S. S., & Yetkin, E. (2020). Agricultural Tractor Cabin Safety Analysis and Test Correlation. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 4(1), 1-9.
- Kumar, A., Mahajan, A., Prasanth, S., Darekar, S., Chellan, J., Kumar, K. A., & Kumar, J. K. R. (2015). *Agricultural tractor cabin structure design for durability and rollover protective structure test* (0148-7191). Retrieved from
- Martini, H., Bergqvist, B., Hjelm, L., & Löfdahl, L. (2011). *Influence of different truck and trailer combinations on the aerodynamic drag* (0148-7191). Retrieved from
- Mattetti, M., Maraldi, M., Lenzini, N., Fiorati, S., Sereni, E., & Molari, G. (2021). Outlining the mission profile of agricultural tractors through CAN-BUS data analytics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106078.
- McAuliffe, B. (2015). Improving the aerodynamic efficiency of heavy duty vehicles: Wind tunnel test results of trailer-based drag-reduction technologies. *Report, National Research Council Canada. Aerospace*, 1-87.
- Mederle, M., Urban, A., Fischer, H., Hufnagel, U., & Bernhardt, H. (2015). Optimization potential of a standard tractor in road transportation. *landtechnik*, 70(5), 194-202.

- Modi, V., Hill, S. S., & Yokomizo, T. (1995). Drag reduction of trucks through boundary-layer control. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54, 583-594.
- Oh, J., Choi, K., Son, G.-h., Park, Y.-J., Kang, Y.-S., & Kim, Y.-J. (2020). Flow analysis inside tractor cabin for determining air conditioner vent location. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105199.
- Palanivendhan, M., Chandradass, J., Saravanan, C., Philip, J., & Sharan, R. (2021). Reduction in aerodynamic drag acting on a commercial vehicle by using a dimpled surface. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7072-7078.
- Patidar, A., Gupta, U., & Bansal, A. (2015). *Fuel Efficiency Improvement of Commercial Vehicle by Investigating Drag Resistance* (0148-7191). Retrieved from SAE Technical Paper, 2015-01-2893, India:
- Peng, J., Wang, T., Yang, T., Sun, X., & Li, G. (2018). Research on the aerodynamic characteristics of tractor-trailers with a parametric cab design. *Applied Sciences*, 8(5), 791.
- Saleh, Z., & Ali, A. (2020). *Numerical Investigation of Drag Reduction Techniques in a Car Model*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Sivaraj, G., Parammasivam, K., & Suganya, G. (2018). Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 11(6), 1489-1495.
- Urquhart, M., Varney, M., Sebben, S., & Passmore, M. (2020). Aerodynamic drag improvements on a square-back vehicle at yaw using a tapered cavity and asymmetric flaps. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 86, 108737.
- Van Raemdonck, G. M., & Van Tooren, M. J. (2008). *Design of an Aerodynamic Aid for the Underbody of a Trailer within a Tractor-Trailer Combination*. Paper presented at the BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy.
- Vignesh, S., Gangad, V. S., Jishnu, V., Krishna, A., & Mukkamala, Y. S. (2019). Windscreen angle and Hood inclination optimization for drag reduction in cars. *Procedia Manufacturing*, 30, 685-692.
- Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey.
- Wood, R. M., & Bauer, S. X. (2003). Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks. *SAE transactions*, 143-160.
- Xu, F., Schillinger, D., Kamensky, D., Varduhn, V., Wang, C., & Hsu, M.-C. (2016). The tetrahedral finite cell method for fluids: Immersogeometric analysis of turbulent flow around complex geometries. *Computers & Fluids*, 141, 135-154.
- Zheng, E., Zhong, X., Zhu, R., Xue, J., Cui, S., Gao, H., & Lin, X. (2019). Investigation into the vibration characteristics of agricultural wheeled tractor-implement system with hydro-pneumatic suspension on the front axle. *Biosystems Engineering*, 186, 14-33.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.05.2023
Kabul Tarihi : 15.06.2023

Received Date : 05.05.2023
Accepted Date : 15.06.2023

GERİBESLEME DOĞRUSALLAŞTIRMASI KULLANILARAK KABLO İLE SÜRÜLEN DÜZLEMSEL PARALEL BİR ROBOTUN DENETİMİ

CONTROL OF A CABLE-DRIVEN PLANAR PARALLEL ROBOT WITH FEEDBACK LINEARIZATION

Caner SANCAK¹ (ORCID: 0000-0003-0795-0204)
Mehmet İTİK^{2*} (ORCID: 0000-0002-3827-5697)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye
² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Caner SANCAK, csanca@ktu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, kablo ile sürülen düzlemsel paralel bir robotun konumunun PID denetimi ve geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile birlikte PID denetimi başarımları deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Her iki denetim süreci kararlılık, kalıcı hal cevapları ve bozucu etkilere karşı dayanıklılık bakımından araştırılmıştır. Robotun uç işlemci kütlesi değiştirilerek denetçilerin model belirsizlikleri altındaki davranışları ayrıca incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Çalışmanın sonucu olarak kablo ile sürülen paralel robot (KSPR) denetiminde geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin kullanılmasının kararlılık ve bozucu etkilerin giderilmesinde sadece PID yönteminin kullanılmasına göre daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında, geribesleme doğrusallaştırmasının kullanılması ile kalıcı hal davranışlarında ortalama %40 başarımların sağlanması sağlanmıştır. Son olarak, KSPR'nin geribesleme ile doğrusallaştırılmış PID denetiminde meydana gelebilecek bazı problemler ele alınmış ve bu problemlerin çözümlerine değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablo ile sürülen robot, paralel robot, PID denetim, KSPR, geribesleme doğrusallaştırması

ABSTRACT

In this study, we study the positioning performances of PID control, and PID control used with feedback linearization method on a planar cable-driven parallel robot (CDPR) experimentally. Both control processes are examined in terms of stability, steady-state performances, and robustness to external disturbances. Robot's end-effector mass variations are also investigated to test the controllers under modelling uncertainties. The results obtained from the controllers are then compared and discussed. Results show that, the feedback linearization technique with PID control is superior in stabilization and elimination of disturbance effects than the use of PID control alone. Moreover, steady-state responses of feedback linearization PID control provides %40 performance improvement. Finally, we discuss some problems that may occur in feedback linearized PID control of CDPR and the solutions to these problems are addressed.

Keywords: Cable-driven robot, parallel robot, PID control, CDPR, feedback linearization

GİRİŞ

Kablo ile sürülen paralel robotlar (KSPR'ler) bir uç işlemcinin rijit uzuvlar yerine kablolarla tahrik edildiği paralel mekanizmalardır. Bu yönleri ile, düşük atalet, geniş çalışma uzaylarına erişebilme, yüksek yük/ağırlık oranlarına sahip olma ve daha yüksek çalışma hızlarına ulaşabilme açısından diğer paralel robotlara göre üstünlük sunmaktadırlar.

KSPR'lerin kablo ile sürülmesinin getirdiği faydalarla birlikte kabloların bası kuvveti taşıyamaması nedeni ile bu robotlarda tasarım ve denetim süreci problemleri de ortaya çıkmaktadır. Bası kuvvetinin yerine geçmesi ve rijitliği artırmak için, bu robotlarda serbestlik derecesinden bir fazla eyletici (actuator) yani bir fazla kablo kullanılması gerekmektedir. Bu durumda artıksıl eyletme (redundant actuation) durumu meydana gelmekte, robotun kinematik analizi ve uygun denetçi tasarlama süreci zorlaşmaktadır (Gosselin, 2014). Endüstriyel uygulamalarda KSPR'lerin yaygınlaşması için ise hassas denetimleri gereklidir. Literatürde KSPR'ler için farklı denetim yöntemleri önerilmiştir. Yanai vd., (2002) genel olarak bu robotların denetimi için geribeslemeli anti-swing olarak adlandırılan bir yöntem sunmuşlardır. Robotun salınım yapmasını engellemek ve hassas bir denetim için çalışmalarında ters dinamikleri (inverse dynamics) dikkate almışlardır. Alp & Agrawal (2002) Lyapunov denetçi yöntemi ve geribesleme doğrusallaştırma tekniği kullanarak altı serbestlik dereceli kablolu robotun denetimini benzetimde ve deneysel ortamda gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, sürtünmelerin dikkate alınacak kadar hataya sebep olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir. Gürbüz bir denetim yöntemi olan kayan kipli denetim (sliding mode control) yöntemi de bu robotlara uygulanmıştır (Bak vd., 2016; Korayem vd., 2012; Oh & Agrawal, 2004; Sancak vd., 2019). Yapılan bu çalışmalarda bozucu etkilerin giderildiği ve verilen kablo gerilimi kısıtlarını sağlayarak yüksek başarımla robotun denetlediği gösterilmiştir. Tüm bu ileri denetim yöntemleri ile KSPR'lerin denetiminde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Fakat tüm bu yöntemler pratikte hem tasarım hem de endüstriyel denetim sistemlerinde kullanılması açısından oldukça karmaşıktır. Ayrıca denetçi parametrelerinin ayarlanması özel uzmanlık gerektirdiği için sahadaki mühendisler tarafından yapılabilmesi zaman alıcıdır.

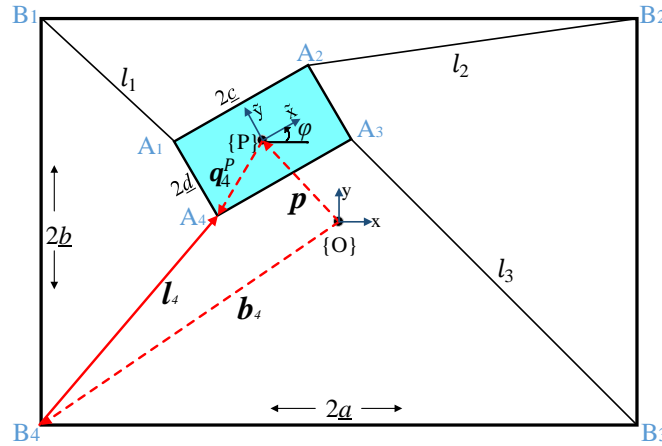
Endüstriyel uygulamalarda en yaygın denetim türü olarak tasarım ve uygulama kolaylığı sebebiyle klasik orantı-integral-türev (PID) denetçileri kullanılmaktadır. Diğer yöntemlerden farklı olarak, PID denetçi çok fazla gelişmiş denetim teorisi bilgisi gerektirmemektedir. Bu durum, PID denetçileri endüstrideki denetim uygulayıcıları arasında daha popüler hale getirmiştir. Bu yüzden birçok çalışmada KSPR'ler, çeşitli denetim görevlerini yerine getirmede geribesleme doğrusallaştırma (feedback linearization) tekniği ile birlikte PID denetim yöntemi kullanılarak denetlenmiştir (Sancak & İtik, 2022; Williams vd., 2003). Ayrıca, bilinen sınırlı belirsizliklerin üstesinden gelmek için gürbüz bir PID denetleyici Khosravi & Taghirad (2014) çalışmasında sunulmuştur. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar PID denetimin kolay uygulama imkânı tanınmasından dolayı KSPR'lerin endüstriyel uygulamalardaki denetimi açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır. KSPR'lerin denetiminde geri besleme doğrusallaştırması tekniği, sunduğu avantajlar nedeni ile sıklıkla kullanılmaktadır. Bu teknik, yazarlar tarafından yapılan diğer denetim çalışmalarında da (Sancak vd., 2019; Sancak & İtik, 2022; Sancak vd., 2023) farklı denetçiler ile kullanılarak robot denetimi sağlanmıştır.

PID denetçilerin birçok avantajı olmasına rağmen, KSPR'lerin doğrusal olmayan bağlaşıklık dinamiklerinin üstesinden gelmek ve hassas yörünge izleme cevabı elde etmek için başarımları yetersiz kalabilir. Özellikle uç işlemcinin taşıdığı yük değişimleri robotun yörünge takip başarımını etkilemektedir. Literatürde dört kablo ile sürülen düzlemsel bir robot için uç işlemci kütle değişiminin konum takibi başarımına etkisini üzerine yapılan çalışmalar ise kısıtlıdır. Özellikle PID ve geribesleme doğrusallaştırma tekniği ile birlikte PID denetçilerin artıksıl sınırlandırılmış düzlemsel KSPR'lerin denetimi esnasında ortaya çıkan uç işlemci kütle değişimi karşısındaki başarımları üzerine bir çalışmaya yazarların bilgisi dahilinde rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında, dört kablo ile sürülen artıksıl sınırlandırılmış düzlemsel KSPR'nin konum denetimi için geleneksel PID denetçi tasarlanmış ve uygulanmıştır. Ardından, geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile birlikte PID denetçi uygulanması çalışması yapılmıştır. Her iki yöntemin KSPR'nin konum takibi başarımını üzerindeki etkileri incelenmiştir. Özellikle uç işlemci kütle değişimleri için başarımlar incelenerek denetçiler kıyaslanmıştır. Böylece, geribesleme doğrusallaştırmasının olduğu ve olmadığı durumlardaki PID denetçi başarımları ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada ilk olarak konu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar ve bu çalışmanın motivasyonu verilmiştir. Daha sonra kullanılan KSPR yapısı sunulmuştur. Ardından robotun kinematığı ve dinamik modeli sunulmuştur. Konum denetimi için tasarlanan denetçiler açıklanmıştır. Deneysel kurulum ve yapılan deneysel çalışmaların sonucu verilmiştir. Son olarak elde edilen genel sonuçlar irdelenmiştir.

DÖRT KABLO İLE SÜRÜLEN DÜZLEMSEL PARALEL ROBOT YAPISI

Bu çalışmada ele alınan KSPR, sabit bir ana çerçevenin köşelerine yerleştirilmiş eyleticiler tarafından uzunluğu değiştirilen dört kablo yardımı ile paralel olarak desteklenmiş ve bir uç işlemci görevi yapan elemandan meydana gelmektedir. Bu KSPR'nin kinematik diyagramı Şekil 1 ile verilmiştir (Sancak, 2022).



Şekil 1. Düzlemsel Paralel Kablo ile Sürülen Robotun Kinematik Diyagramı

Robotun kinematik analizinde iki farklı koordinat sistemi kullanılmıştır. Bunlar; düzlemsel robota ait ana çerçevenin ortasındaki $\{O\}$ sabit referansında bulunan x - y global koordinat sistemi ve hareketli uç işlemcinin ağırlık merkezindeki $\{P\}$ referans noktasında bulunan yerel \tilde{x} - \tilde{y} koordinat sistemidir. Uç işlemci, kabloların eyletici yardımı ile boylarının değiştirilmesi sonucu x - y düzleminde hareket etmektedir. Kabloların bir ucu, dört kablo için sırasıyla A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 noktalarından uç işlemciye, diğer ucu ise B_1 , B_2 , B_3 ve B_4 noktalarında sabit gövde üzerinden eyleticilere (vinçlere) bağlıdır. Burada i . kabloya ait kablo uzunluklarını l_i , ana çerçevenin merkezi ile köşeleri arası mesafeyi b_i , uç işlemcinin merkezi ile köşeleri arasındaki mesafeyi q_i vektörleri ifade etmektedir. Uç işlemci, (x, y, φ) olmak üzere düzlemde üç serbestlik derecesine sahiptir. Konum vektörü p uç işlemcinin $\{O\}$ sabit referansına göre konumunu vermektedir ve yine uç işlemcinin $\{O\}$ referansına göre dönme açısı φ sembolü ile gösterilmiştir. Dikdörtgen yapıya sahip sabit gövdeye ait uzunluk parametreleri x ekseninde a ile y ekseninde ise b sembolleri ile belirtilmiştir. Uç işlemci de dikdörtgen yapıya sahip olup \tilde{x} ekseninde $2c$ ve \tilde{y} ekseninde ise $2d$ uzunluğuna sahiptir.

KİNEMATİK MODEL

Bu çalışmada ele alınan düzlemsel KSPR'nin ters ve ileri kinematik denklemlerinin elde edilmesi ve ileri kinematik denklemlerin çözümü için kullanılan yöntemler aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

KSPR Ters ve İleri Kinematığı

KSPR'ler için ters kinematik, bilinen uç işlemci konumu ve yönelimine karşılık gerekli kablo uzunluklarının (mafsal uzunluğu olarak düşünülebilir) bulunması işlemidir. Bu süreç, her bir kablo için bir kapalı döngü kinematik zincir oluşturularak modellenebilmektedir. Şekil 1'de gösterilen kesikli kırmızı çizgiler tek bir kablo için kinematik zinciri belirtmektedir. Burada gerekli vektörel işlemler (Williams vd., 2003) yapıldığında düzlemsel KSPR için kablo uzunlukları Denklem 1 ile ifade edilebilir.

$$l_i = \sqrt{(x - b_{ix} + q_{ix}^p \cos \varphi - q_{iy}^p \sin \varphi)^2 + (y - b_{iy} + q_{ix}^p \sin \varphi + q_{iy}^p \cos \varphi)^2} \quad (1)$$

Denklemden anlaşılacağı üzere, bilinen (x, y, φ) değerleri yerine yazıldığında her bir kablo uzunluğu bu denklem kullanılarak kolayca elde edilebilmektedir.

KSPR'ler için ileri kinematik problem ise ters kinematik problemin tersi olarak kablo uzunluklarının bilindiği durumda bu uzunlukların vektör kapalılık denklemlerinde yerine konması ile uç işlemciye ait gerçek konumun ve yönelimin bulunması işlemidir. Dört kablo ile sürülen düzlemsel robotun ileri kinematiği için denklem sayısının bilinmeyen sayısından fazla olduğu doğrusal olmayan bağımlı bir denklem sistemi ortaya çıkmaktadır. Bu denklem sisteminin çözümü için ise ve Parikh & Lam (2005) tarafından sunulan ve Sancak vd. (2019) tarafından KSPR'ler için uygulanan yöntem bu çalışmada da kullanılmıştır.

İleri kinematik çözüm için kullanılan yöntem temelde Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Newton-Raphson (NR) yönteminin ardışık olarak kullanılmasına dayanmaktadır. İlk olarak, oluşturulan YSA modeli, kablo uzunlukları ağa verildiğinde çıktı olarak uç işlemcinin konumunu (x, y) ve yönelim açısını (φ) yaklaşık olarak belirlemek için kullanılmıştır. YSA eğitimi için gerekli veri seti ters kinematik denklemin birçok değer için çözülmesi ile elde edilmiştir. Böylece girişleri l_1, l_2, l_3, l_4 olan ve çıkışları ise x, y, φ olan YSA modelinin yapısı oluşturulmuştur. NR yöntemi, YSA ile elde edilen ileri kinematik çözümün geliştirilmesi ile gerçek çözüme çok daha yakın sonuçların edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemde ters kinematik denklem amaç işlevi olarak kullanılmış ve bu işlevin değerinin en küçüklenmesi ile gerçek konumun bulunması hedeflenmiştir. YSA ile elde edilen yaklaşık çözüm NR yöntemi için başlangıç koşulu olarak kullanılmış ve böylece NR yönteminin yakınsaması ve sonuç verme süresi hızlandırılmıştır.

DİNAMİK MODEL

KSPR için dinamik model uç işlemci dinamik modeli ve eyletici dinamik modelinin birleşimi olarak elde edilebilir. Uç işlemcinin dinamik modeli, Newton-Euler denklemleri kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Sancak vd., 2022).

$$\mathbf{H}_{3 \times 4} \mathbf{T}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} m_u \ddot{\mathbf{p}}_{2 \times 1} - m_u \mathbf{g}_{2 \times 1} \\ \mathbf{I}_u \ddot{\boldsymbol{\varphi}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada yapı matrisi \mathbf{H} ;

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -l_1/\|l_1\| & \dots & -l_4/\|l_4\| \\ \mathbf{R}q_1^P \times (-l_1/\|l_1\|) & \dots & \mathbf{R}q_4^P \times (-l_4/\|l_4\|) \end{bmatrix}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir ve kablo kuvvetleri vektörü $\mathbf{T} = [t_1, t_2, t_3, t_4]^T$ 'dir. m_u uç işlemci kütleini, \mathbf{g} : yerçekimi ivmesini, \mathbf{I}_u : uç işlemcinin geometrik merkez eksenlerine göre atalet tensörünü, \mathbf{R} : dönme matrisini ifade etmektedir. Eyletici olarak vinç sisteminin genel dinamik modeli ise aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{T} = \mathbf{r}_d^{-1}{}_{4 \times 4} (\boldsymbol{\tau}_{4 \times 1} - \boldsymbol{\tau}_f{}_{4 \times 1} - \mathbf{I}_{a4 \times 4} \ddot{\boldsymbol{\Omega}}_{4 \times 1} - \mathbf{C}_{4 \times 4} \dot{\boldsymbol{\Omega}}_{4 \times 1}) \quad (3)$$

Burada, vinç sistemi kütleli atalet momenti \mathbf{I}_a , sönüm katsayısı \mathbf{C} ve vinç tamburunun yarıçapı \mathbf{r}_d köşegen matrisleri ile gösterilmiştir. Her eyleticiye ait statik sürtünme torku $\boldsymbol{\tau}_f$, motor torku $\boldsymbol{\tau}$ ve motor açıl konumu $\boldsymbol{\Omega}$ vektörü ile gösterilmiştir. Bu iki denklem birleştirilerek toplam dinamik modelin genel gösterimi ise aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\mathbf{M}_{eq} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{H} \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

Burada;

$\mathbf{M}_{eq}{}_{3 \times 3} = \mathbf{H} \mathbf{I}_a \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{r}_d \begin{bmatrix} m_u \mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_u \end{bmatrix}$, $\mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})_{3 \times 1} = \mathbf{H}(\mathbf{I}_a \ddot{\boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{C} \dot{\boldsymbol{\Omega}}) \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{H} \boldsymbol{\tau}_f + \mathbf{r}_d \begin{bmatrix} -m_u \mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\mathbf{X} = [x, y, \varphi]^T$ ve $\mathbf{g} = [0 \quad -9.81]^T$ dir. Deneylerde kullanılan düzlemsel KSPR'nin dinamik ve kinematik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan bütün tamburların yarıçapı eşit olduğundan \mathbf{r}_d matrisi yerine sayısal r_d değeri kullanılmıştır.

Tablo 1. KSPR Dinamik ve Kinematik Parametreleri

τ_f [Nm]	$0.045^* \mathbf{I}_4$	\underline{a} [mm]	683
I_a [kgm ²]	$0.000178^* \mathbf{I}_4$	\underline{b} [mm]	670
C [Nms]	$0.00055^* \mathbf{I}_4$	\underline{c} [mm]	143
I_u [kgm ²]	0.00178	\underline{d} [mm]	98
m_u [kg]	0.5	r_d [mm]	25

KONUM DENETİMİ

KSPR'nin konum denetimi için iki farklı yöntem kullanılmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemler: (i) klasik bir PID denetçi ve (ii) sistem dinamiğinin geribesleme doğrusallaştırması ile denetim sürecine eklendiği bir PID denetçi (PID+GD)'dir. Bu denetçi tasarımları aşağıdaki kısımlarda açıklanmaktadır.

Klasik PID Denetçi Tasarımı

PID denetim yöntemi ile denetim için tasarlanan denetçinin yapısı oran, türev ve integral kazanç parametreleri ile aşağıdaki eşitlikteki gibi verilebilir.

$$\mathbf{u} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (5)$$

Burada $\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$ vektörü KSPR için olay uzayında üretilen denetim girdisidir. İstenilen konum ile referans arasındaki hata ise,

$$\mathbf{e} = \mathbf{X}_{ref} - \mathbf{X} \quad (6)$$

olarak tanımlıdır. Burada \mathbf{X} robotun durum vektörünü, \mathbf{X}_{ref} ise referans vektörünü temsil etmektedir. Denetim girdisinin ($\mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$) KSPR'ye uygulanmasında ise pozitif kablo kuvvetlerini sağlayan $\boldsymbol{\tau}$ değerlerinin bulunması için tork dağıtım algoritması kullanılmıştır.

Kullanılan algoritma aşağıdaki denklemler ile açıklanabilir. Temelde yapılan işlem $\mathbf{u} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau}$ denkleminin özel çözümüne bir miktar homojen çözüm ekleyerek bütün kablolar için gerilim değerlerinin pozitif olmasını sağlamaktır. Ele alınan KSPR için denetimde kullanılan tork değerleri aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r}_d \mathbf{T} = \mathbf{H}^\dagger \mathbf{u} + \xi \mathbf{N}_0 = \begin{bmatrix} \tau_{p(1)} \\ \tau_{p(2)} \\ \tau_{p(3)} \\ \tau_{p(4)} \end{bmatrix} + \xi \begin{bmatrix} n_{0(1)} \\ n_{0(2)} \\ n_{0(3)} \\ n_{0(4)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Bu denklemde ξ değeri, özel çözüm ($\mathbf{H}^\dagger \mathbf{u} = [\tau_{p(1)} \dots \tau_{p(4)}]^T$) ile elde edilen girdi torklarından en küçük olanın değerini, homojen çözüm ($\xi \mathbf{N}_0 = \xi [n_{0(1)} \dots n_{0(4)}]^T$) ekleyerek belirli bir pozitif τ_{min} değerinde sabit tutmak için kullanılmaktadır. \mathbf{N}_0 vektörü \mathbf{H} yapı matrisinin boş uzayını temsil etmektedir. Denetim sürecinde ξ değeri, özel çözümde negatif olan her tork değeri için Denklem 8 kullanarak hesaplanmış ve ardından her denetim döngüsünde en büyük değere sahip olan ξ değeri sonuç olarak seçilmiştir.

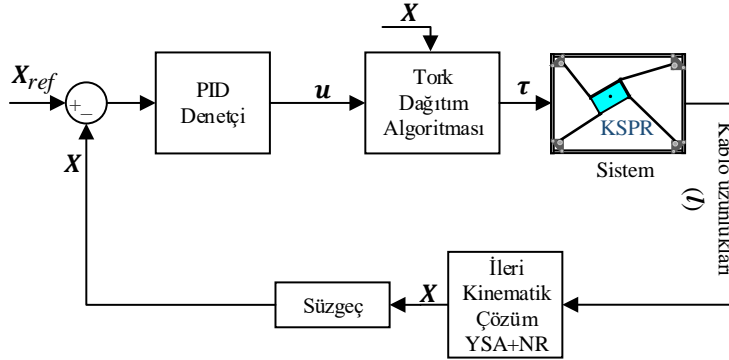
$$\xi_i = \frac{\tau_{min} - \tau_{p(i)}}{n_{0(i)}} \quad i = 1,2,3,4 \quad (8)$$

Bu hesaplama ile özel çözümün en küçük bileşeninin istenen tork τ_{min} değerine eşitlenmesi ve Denklem 7 kullanılarak diğer girdilerin uygun şekilde bulunması sağlanmıştır.

Denetim için üretilen girdi sistem modelinde yerine konulduğunda ise aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\mathbf{M}_{eq} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{N}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}) = \mathbf{K}_p \mathbf{e} + \mathbf{K}_i \int \mathbf{e} dt + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} \quad (9)$$

Bu eşitlikte kapalı döngü dinamikleri, doğrusal olmayan terimler (N) içermektedir. Bu nedenle, sistem kararlılığının sağlanması PID denetçi parametrelerinin hassas bir şekilde seçilmesine bağlıdır. Deneylerde kullanılan denetçinin yapısı Şekil 2’de gösterilmektedir. Ayrıca, deneylerde geribesleme için algılayıcı gürültüsünün önüne geçmede 15 Hz kesme frekansına sahip ikinci dereceden bir Butterworth süzgeci kullanılmıştır.



Şekil 2. Klasik PID Denetçi Denetim Şeması

Geribesleme Doğrusallaştırması ile PID Denetçi Tasarımı (PID+GD)

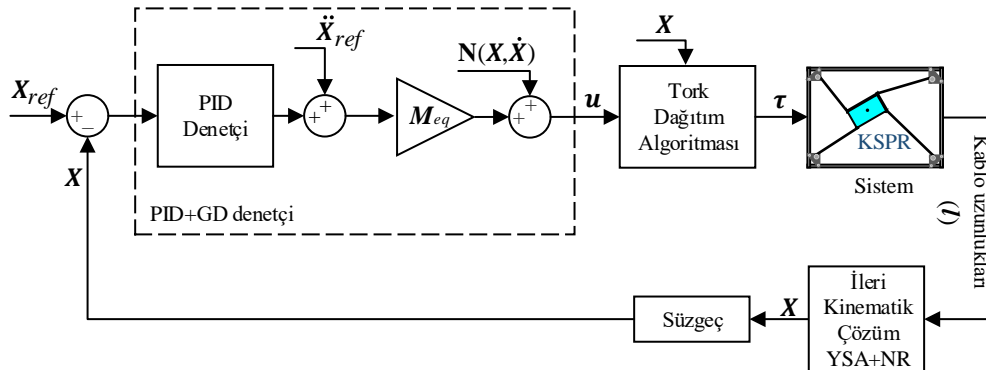
Bu kısımda, düzlemsel KSPR’nin konum denetimi için geribesleme doğrusallaştırması yapılarak ve PID denetçi kullanılarak denetim sağlanmıştır. Geribesleme doğrusallaştırması ile klasik PID kapalı döngü dinamik denkleminde bulunan doğrusal olmayan terimler elenmektedir. Bu durumda kapalı döngü dinamikleri için kararlılık sadece PID denetçi parametrelerinin seçimi ile kolayca sağlanmaktadır. Bu yöntem için, üretilen denetim girdisi aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$u = H\tau = M_{eq} \left(\ddot{X}_{ref} + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} \right) + N(X, \dot{X}) \quad (10)$$

Bu denetim girdisinin sistem modelinde yerine konulması ile kapalı döngü dinamikleri aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\ddot{e} + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} = 0 \quad (11)$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü üzere kapalı döngü dinamiklerinde doğrusal olmayan terimler gözükmemektedir. Böylece bu sistemin kararlılığı doğrusal sistemlerin kararlılığı teorisi kullanılarak PID parametrelerinin uygun seçimi ile sağlanabilir. Tasarlanan denetçinin yapısı Şekil 3’te verilmektedir. Tasarlanan PID denetçilerin kazanç parametreleri deneysel çalışmalarda deneme yanılma yöntemi ile elde edilmiştir ve Tablo 2’de verilmektedir.



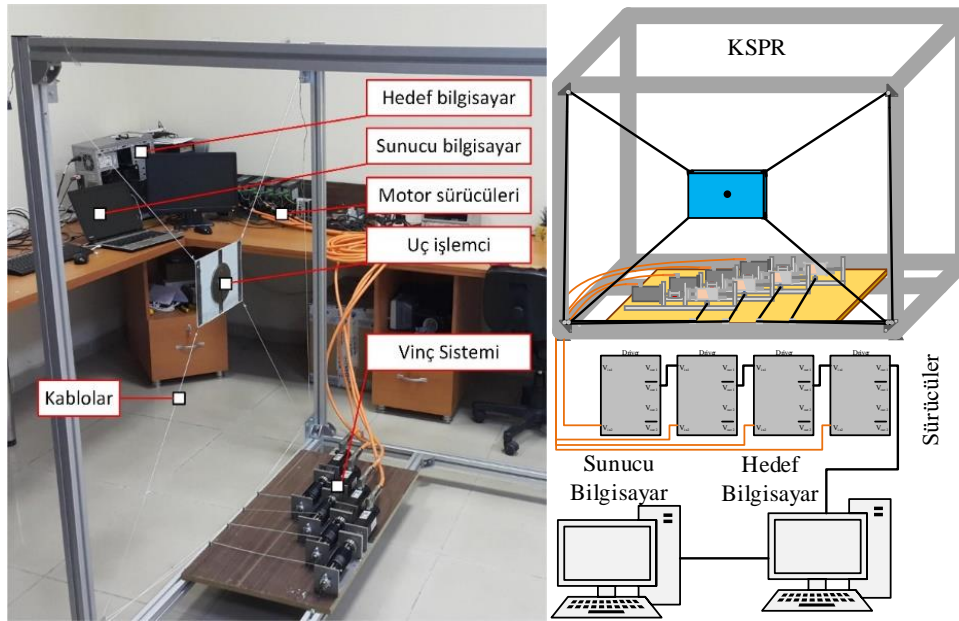
Şekil 3. PID+GD Denetçi Denetim Şeması

Tablo 2. PID ve PID+GD Denetçi parametreleri

PID		PID+GD			
K_p	diag (12.5, 12.5, 0.15)	diag (1000, 1000, 750)	τ_{maks} [Nm]	1.4	
K_i	diag (375, 375, 1)	diag (10000, 5000, 7500)	τ_{min} [Nm]	0.12	
K_d	diag (1.25, 1.25, 0.005)	diag (50, 50, 25)	h [s]	0.002	

DENEYSSEL KURULUM

Deney düzeneği kurulumunda ilk olarak 4 adet vinç sisteminin tasarlanması ve üretimi yapılmıştır. Bu vinçler kabloların uzamasını ve kışalmasını sağlamaktadır. 1 mm çapında SK75 Dyneema ip kablo olarak kullanılmıştır. Kablolar yüksek çeki yüklerine dayanabilmektedir ve elastik uzaması aynı boyuttaki çelik kablodan düşüktür. Deney düzeneğinin bir resmi ve şematik gösterimi Şekil 4'te görülebilir. Tork denetimi yapabilen 4 adet Kollmorgen AKM24D servo motor ve Kollmorgen AKD P00306 NBCC-E000 motor sürücüleri vinçlerin tahriki için kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneği gövdesi $45 \times 45 \text{ mm}^2$ alüminyum sigma profillerle oluşturulmuştur. Uç işlemci, zemine dik bir düzlemde kablo uzunluğunun vinçler ile değiştirilmesi sonucu hareket ettirilmektedir. Robotun denetimi için Matlab/Simulink Real-Time ortamı kullanılmıştır. Vinç ve makaraların viskoz sönümleme katsayısı C_i ve sürtünme torkları her bir sistem için deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değer ve vinçlerdeki sabit sürtünme değeri τ_{fi} deneysel sistem için değişebildiğinden ortalama bir değer olarak kullanılmıştır.



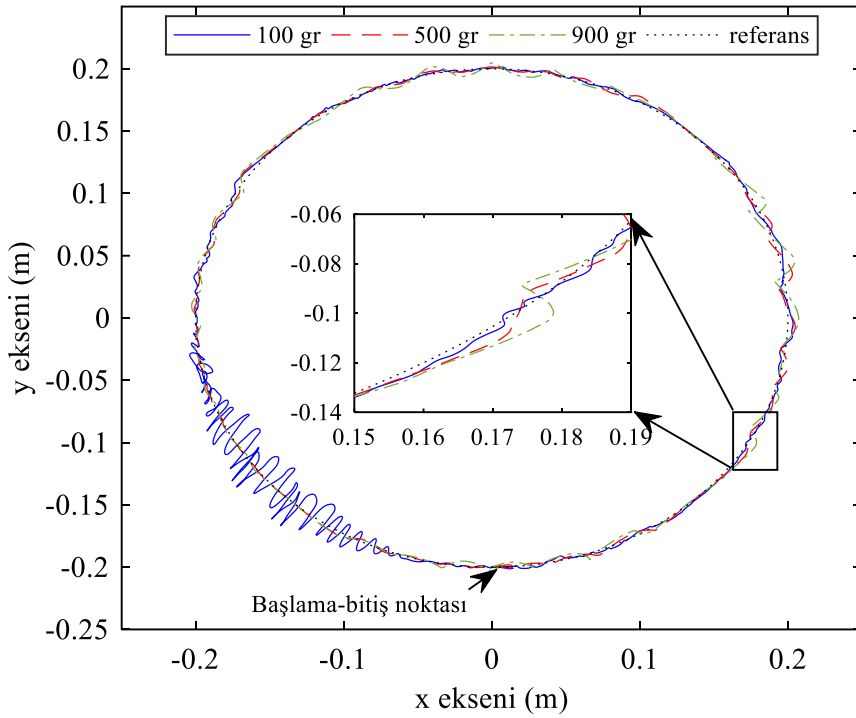
Şekil 4. Deney Düzeneği Resmi (Solda), Deney Düzeneği Şematiği (Sağda)

PID ve GD+PID Denetçiler ile Denetim Sonuçları

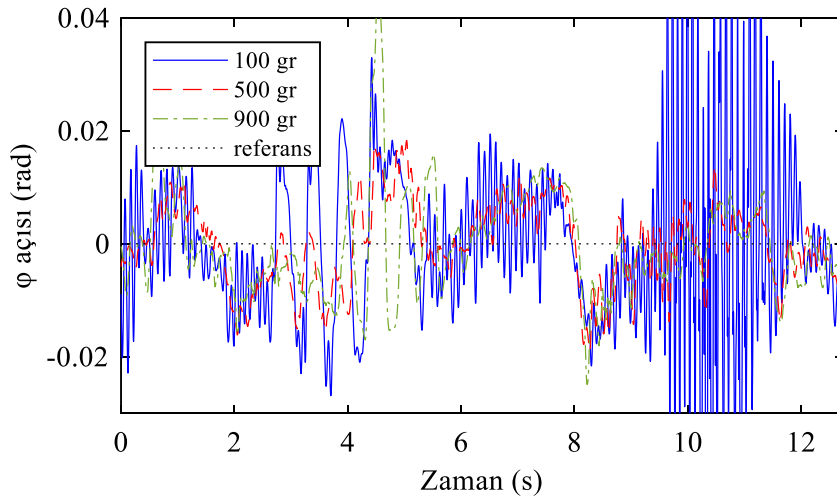
Deneylerde, önerilen denetleyicilerin başarımını test etmede uç işlemci dönme açısı (φ) için sabit ve $x - y$ eksenleri için sinüzoidal referans sinyalleri seçilmiştir. Bu referans sinyali $x-y$ düzleminde dairesel bir yörüngeye karşılık gelmektedir. Kullanılan referans sinyalleri x -ekseni için $x_d = 0.2\sin(0.5t)$ ve y -ekseni için $y_d = -0.2\cos(0.5t)$ olarak seçilmiştir. Düzlemde dönme açısı için referans sinyali ise $\varphi_d = 0$ rad olarak seçilmiştir. Bu sinyallerin seçimi ile birlikte uç işlemci düzlemde dairesel hareket yaparken aynı zamanda yönelimini koruması amaçlanmıştır. Uç işlemcinin kütlesi 500 gramdır ve denetçiler deneysel olarak bu kütle değeri için tasarlanmıştır. Ardından bu denetçiler uç işlemci kütlesinin 100 ve 900 gram olduğu durumlarda test edilmiştir. Bu çalışmalarla, tasarlanan denetçilerin model belirsizlikleri altındaki başarımının incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, düzlemde dairesel referansın takibinde farklı kütleler için PID denetçinin cevapları Şekil 5'te verilmiştir. Tüm denetim eksenleri için zaman cevapları ise Şekil 6'da görülmektedir.

Şekil 5'te görüldüğü üzere farklı uç işlemci kütleleri için farklı denetim sonuçları meydana gelmektedir. Uç işlemci kütlesinin 100 gram olduğu durumda yörünge üzerindeki bazı noktalarda denetim süreci salınımlı bir şekilde

ilerlemektedir. Bu durum doğrusal olmayan etkilerin denetçi başarımına etkisi veya belirsiz etkilerin yörüngedeki bazı noktalarda artması sonucu meydana gelmiş olabilir. Uç işlemci kütlelerinin 900 gram olması durumunda denetimde yüksek salınımların meydana gelmemesine karşın denetim başarımının 500 gram uç işlemci kütleli duruma göre daha düşük olduğu gözükmemektedir. φ açısı denetiminde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirilirse, PID denetçinin tek başına sistemdeki belirsizliklere karşı oldukça dayanıksız olduğunu ve denetçi parametreleri seçiminin sistem başarımında ve kararlılığında oldukça yüksek bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Kararlılığın geniş ölçekte sağlanabilmesi için doğrusal olmayan sistem modeli kullanılarak PID+GD denetçi, yine aynı referans sinyalinin takibi için uygulanmıştır. Bu denetçi için kütle değişimi etkisi altındaki düzlemde denetim cevabı Şekil 7'de verilmektedir.



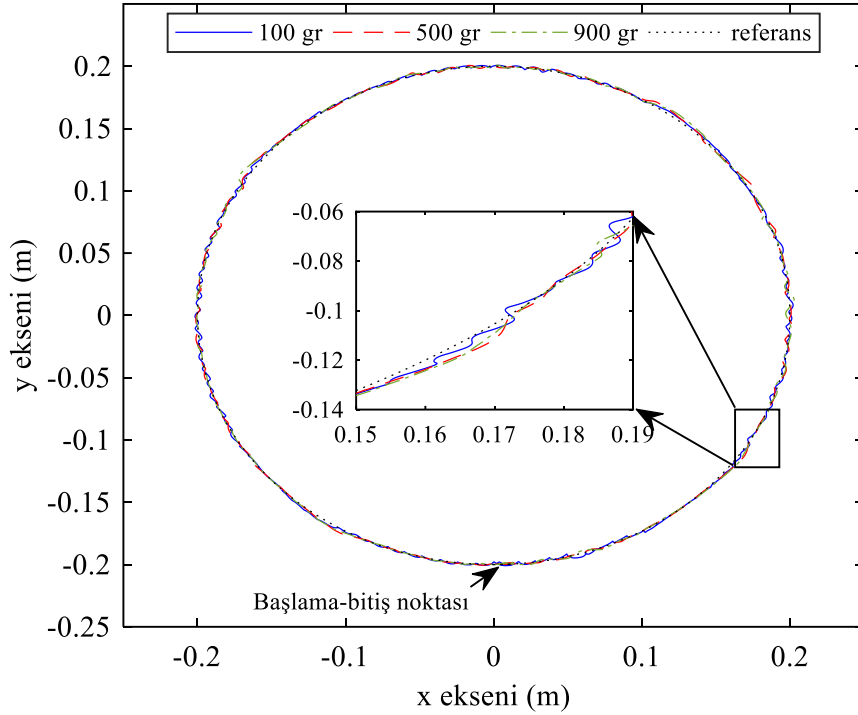
Şekil 5. PID Denetçi ile Düzlemde Dairesel Yörünge Takip Cevabı



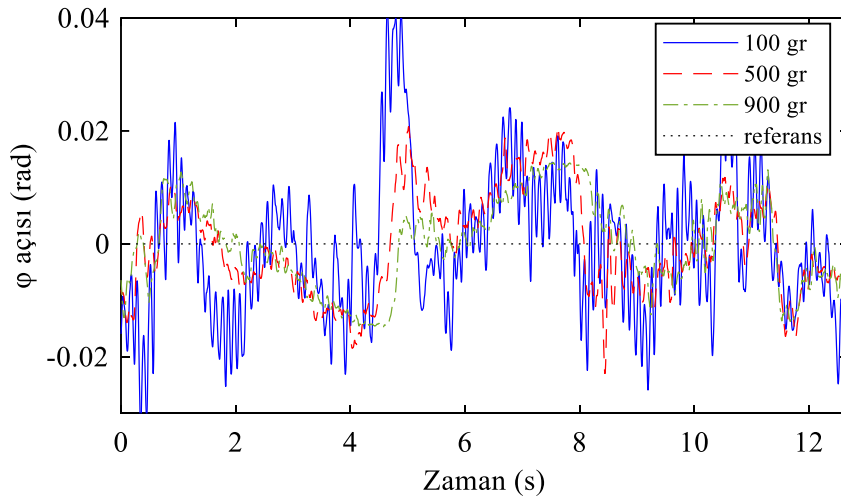
Şekil 6. PID Denetçi ile, φ Açısı Denetim Cevabı

Şekil 7'de verilen cevaplar PID denetim ile karşılaştırıldığında, PID denetimdeki yüksek salımlı cevaplar PID+GD denetçi kullanılması durumunda gözükmemektedir. Her bir kütle durumu için denetimde kararsızlığa neden olabilecek bir cevap görülmediği gibi denetim başarımı da küçük farklılıklarla korunmuştur. Bu farklılıkların ilki, kütlelerin 100 gram olması durumunda diğer kütlelere göre daha salımlı bir denetim cevabı elde edilmesi olarak verilebilir. Geribesleme doğrusallaştırması tekniği ile 500 gram ağırlığında bir kütle için üretilen denetim girdisinin deneylerde daha düşük kütleli bir sistemi denetlemesi bu etkinin başlıca nedenlerindedir. Daha açık olarak

üretilen yüksek kütle için üretilen denetim girdisi düşük kütle için daha hızlı hareket ederek salınım yapmasına neden olmaktadır. Kütle artırılması durumunda ise denetim başarımı bir miktar azalmaktadır. Fakat bu miktar sadece PID denetçi kullanılması durumuna göre oldukça azdır. Geribesleme doğrusallaştırması ile denetim kararlılığı ve belirsizliklere karşı dayanıklılık iyileştirilmiştir. PID+GD denetçi başarımının kütle değişiminden düşük oranda etkilenmesi durumu φ açısı için Şekil 8'de daha net olarak gözükmemektedir. Bu şekillerin verilere dökülmesi için Tablo 3'te düzlemde dairesel yörünge takibi için hesaplanan kök ortalama kare hataları (RMSE) verilmektedir. Deneyler esnasında üretilen denetim girdilerinin ortalama büyüklüğünün sunulması için ise kök ortalama kare (RMS) değeri cinsinden hesaplama yapılmış ve tabloya eklenmiştir.



Şekil 7. PID+GD Denetçi ile Düzlemde Dairesel Yörünge Takip Cevabı



Şekil 8. PID+GD Denetçi ile φ Açısı Denetim Cevabı

Genel olarak PID+GD denetçi başarımı sadece PID denetçinin düzlemdeki başarımından ortalama %40 daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Bu oran, denetçinin tasarlandığı 500 gram kütle değeri için ise %25 civarındadır. Diğer kütle değerlerinde ise PID+GD denetçi daha yüksek oranlar ile üstündür. Bu durum büyük oranda PID+GD denetçinin sağladığı geniş kararlılık bölgesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. PID denetçinin RMSE değerlerine bakıldığında kütle değişiminde yüksek denetim başarımı farklılıklarına ulaşıldığı çıkarılabilir. En yüksek PID denetçi başarımı 500 gram kütle için elde edilmiştir. Fakat, kütle artırıldığında ve azaltıldığında %100'e yakın hata meydana gelmiştir. Dönme açısı için hata, kütle artımı ile %25 civarına yükselmiştir. PID+GD denetçinin düzlemdeki başarımı ise kütle

azalması ile dikkate değer ölçüde değişmemiştir. Fakat artırıldığı zaman başarımda yaklaşık %7'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Bu denetçi ile kütle arttıkça φ eksenini için hata değerlerinin azaldığı gözükmemektedir. Bu durum, KSPR'nin geometrik özellikleri nedeni ile φ açısının denetim girdisinden en çok etkilenen eksen olmasından kaynaklanmaktadır. Deneylerde bozucu etkilerin φ eksenini üzerinde etkisinin fazla olması nedeni ile RMSE değeri açısından farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Denetimde uygulanan ortalama tork değeri ise PID+GD denetçi için beklenildiği gibi kütle arttıkça artmaktadır Fakat PID denetçide 100 gram için elde edilen ortalama tork değerleri yüksektir. Buda denetim sürecinde meydana gelen salınımların denetim için gereken girdi torkunu artırdığını göstermektedir. Genel olarak denetçiler arasında yüksek bir girdi tork değeri farkı görülmemiştir.

Tablo 3. Tasarlanan PID Denetçilerin Dairesel Yörünge Takibinde Deneysel Kök Ortalama Kare Hataları Değeri ve Girdi Torkları İçin Kök Ortalama Kare Değeri

Kütle (gr)	Eksen	PID+GD RMSE (m)*10 ⁻⁴	PID RMSE (m)*10 ⁻⁴	PID+GD Tork RMS (Nm)	PID Tork RMS (Nm)
100	x	15	29	0,3105	0,4732
	y	14	38		
	φ	123	166		
500	x	15	20	0,4597	0,4136
	y	15	21		
	φ	92	74		
900	x	17	39	0,6894	0,5886
	y	16	37		
	φ	80	93		

SONUÇLAR

Bu çalışma ile birlikte geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin denetim başarımına etkilerinin bir KSPR üzerinde deneysel olarak incelemesi sunulmuştur. Denetim için geribesleme doğrusallaştırmasının kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için PID denetçiler tasarlanmış ve düzlemsel KSPR üzerinde uygulanmıştır. Sadece PID denetçi ile denetimin sağlanması durumunda kararlılığın garanti edilemediği hem teorik hem de deneysel olarak gösterilmiştir. Sistem belirsizlikleri için geniş bir kararlılık bölgesi sağlamanın PID denetçi parametrelerinin iyi ayarlanmasına bağlı olduğu ve bu nedenle bozucu etkilerin daha etkin giderilmesinde agresif bir denetçi veya ani salınımları engellemek için yumuşak bir denetçi tasarlanmasının kararsızlığa neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Geribesleme doğrusallaştırılması tekniği kullanıldığında sistem dinamikleri geri beslenmiş ve yörünge takibinde denetim PID denetçi ile sağlanmıştır. Doğrusal olmayan model etkilerinin geribesleme ile giderilmesi sonucu PID denetçi başarımı, yörünge takibi ve bozucu etkilerin elenmesinde önemli oranda artırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile geribesleme doğrusallaştırmasının düzlemsel KSPR denetimi üzerindeki etkisi, bozucu ve doğrusal olmayan etkiler altında başarılı sonuçlar verdiği ve ortaya çıkabilecek denetim başarımı azalmasının nedenleri ortaya konmuştur.

KSPR denetiminde sadece PID denetçi kullanmanın pratik bir sonuç olacağı fakat meydana gelebilecek kararsızlık problemlerine bir çözüm bulmanın zor olacağı söylenilebilir. Bu durumda, denetimde geribesleme doğrusallaştırması tekniğinin kullanılması KSPR'ler için önerilmektedir. Bunun yanında, PID denetçi yerine farklı denetim yöntemleri kullanılarak denetim başarımı da artırılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince FBA-2018-7415 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Destekleri için Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alp, A. B., & Agrawal, S. K. (2002). Cable suspended robots: Feedback controllers with positive inputs. *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No. CH37301)*, 1, 815–820.
- Bak, J.-H., Yoon, J. H., Hwang, S. W., & Park, J. H. (2016). Sliding-mode control of cable-driven parallel robots with elastic cables. *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1057–1060.
- Gosselin, C. (2014). Cable-driven parallel mechanisms: state of the art and perspectives. *Mechanical Engineering Reviews*, 1(1), DSM0004--DSM0004.
- Khosravi, M. A., & Taghirad, H. D. (2014). Robust PID control of fully-constrained cable driven parallel robots. *Mechatronics*, 24(2), 87–97.
- Korayem, M. H., Tourajizadeh, H., Jalali, M., & Omid, E. (2012). Optimal path planning of spatial cable robot using optimal sliding mode control. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(5), 168.
- Oh, S.-R., & Agrawal, S. K. (2004). Nonlinear sliding mode control and feasible workspace analysis for a cable suspended robot with input constraints and disturbances. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, 5, 4631–4636.
- Parikh, P. J., & Lam, S. S. Y. (2005). A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(1), 18–25.
- Sancak, C. (2022). *Kablo ile sürülen paralel bir robotun tahmin ve öğrenme temelli yöntemler ile konum ve düzlem dışı titreşim denetimi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.
- Sancak, C., & İtik, M. (2022). Out-of-plane Vibration Suppression and Position Control of a Planar Cable-driven Robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27(3), 1311–1320. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3089588>
- Sancak, C., İtik, M., & Nguyen, T. T. (2023). Position Control of a Fully Constrained Planar Cable-Driven Parallel Robot With Unknown or Partially Known Dynamics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 28(3), 1605-1615 doi: 10.1109/TMECH.2022.3228444.
- Sancak, C., Yamac, F., & İtik, M. (2022). Position control of a planar cable-driven parallel robot using reinforcement learning. *Robotica*, 40(10), 3378–3395.
- Sancak, C., Yamaç, F., & İtik, M. (2019). Kablo ile sürülen düzlemsel paralel bir robotun ileri kinematik çözümü ve kontrolü. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(Özel Sayı), 862–874. <https://doi.org/10.36306/konjes.622283>
- Williams, R. L., Gallina, P., & Vadia, J. (2003). Planar translational cable-direct-driven robots. *Journal of Robotic Systems*, 20(3), 107–120.
- Yanai, N., Yamamoto, M., & Mohri, A. (2002). Anti-sway control for wire-suspended mechanism based on dynamics compensation. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*, 4, 4287–4292.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.05.2023
Kabul Tarihi : 19.07.2023

Received Date : 06.05.2023
Accepted Date : 19.07.2023

BEYİN MR GÖRÜNTÜLERİNDEN TÜMÖR TESPİTİ İÇİN DERİN ÖĞRENMEYE DAYALI HİBRİT MODELLER

DEEP LEARNING BASED HYBRID MODELS FOR TUMOR DETECTION FROM BRAIN MR IMAGES

İclal ÖZCAN* (ORCID: 0000-0001-7414-7425)
Serkan ÖZTÜRK² (ORCID: 0000-0002-0309-3420)

^{1,2}Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İclal ÖZCAN, iclaltemizsoy@erciyes.edu.tr

ÖZET

İnsan hücrelerinin aşırı bölünmeye bağlı anormal bir şekilde çoğalmasına tümör denmektedir. Vücudun birçok noktasında oluşabilen tümörler, oluştuğu yere göre tehlikelilik derecesine sahiptir. Beyin, tümör oluşumunda en tehlikeli bölgelerden birisidir. Beyin bölgesindeki tümörlerin tespiti için son yıllarda yoğun çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapay zeka temelli yöntemler bu çalışmaların başında gelmektedir. Bir derin öğrenme yöntemi olan evrişimli sinir ağları (CNN) sınıflandırma, özellik çıkarma ve transfer öğrenme amaçlarıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada CNN yöntemi beyin MR görüntülerinden özellik çıkarma amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda ön eğitilmiş CNN modellerinden DarkNet53 modeli özellik çıkarması için seçilmiştir. DarkNet53 modelinin özellik çıkarıcı katmanları sırasıyla conv52, res23, avg1 ve conv53 katmanlarıdır. Özellik çıkarımından sonra özellik seçimi işlemi uygulanmıştır. Relief ve Ki-Kare Test yöntemleri özellik seçici yöntemler olarak seçilmiştir. Özellik çıkarımından sonra klasik makine öğrenme yöntemlerinden birisi olan destek vektör makineleri algoritması sınıflandırıcı yöntem olarak belirlenmiştir. Önerilen yöntem, "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veri seti üzerinde denenmiştir. Deneysel sonuçlara göre: res23 katmanının özellik çıkarıcı, Ki-Kare Test yönteminin özellik seçici olarak belirlendiği önerilen yöntemle en iyi sonuç elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beyin MR görüntüleri, tümör tespiti, derin özellikler, özellik seçimi, SVM.

ABSTRACT

An abnormal proliferation of human cells due to excessive division is called a tumor. Tumors, which can form in many parts of the body, have a degree of danger according to where they occur. The brain is one of the most dangerous areas of tumor formation. Intense studies have been carried out in recent years for the detection of tumors in the brain region. Artificial intelligence-based methods are at the forefront of these studies. Convolutional neural networks (CNN), a deep learning method, are used for classification, feature extraction and transfer learning purposes. In this study, CNN method was used for feature extraction from brain MR images. In this context, DarkNet53 model, one of the pre-trained CNN models, was selected for feature extraction. The feature extractor layers of the DarkNet53 model are conv52, res23, avg1, and conv53, respectively. After feature extraction, feature selection process was applied. Relief and Chi-Square Test methods were chosen as feature-selective methods. After feature extraction, the support vector machine algorithm, which is one of the classical machine learning methods, was determined as the classifier method. The proposed method has been tested on the "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" dataset. According to the experimental results, the best result was obtained with the proposed method in which the res23 layer was determined as feature extractor and the Chi-Square Test method as feature selective.

Keywords: Brain MR images, tumor detection, deep features, feature selection, SVM.

To Cite: ÖZCAN, İ. & ÖZTÜRK, S., (2023). BEYİN MR GÖRÜNTÜLERİNDEN TÜMÖR TESPİTİ İÇİN DERİN ÖĞRENMEYE DAYALI HİBRİT MODELLER. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 718-733.

GİRİŞ

İnsan hücrelerinin aşırı bölünmesi ile anormal şekilde çoğalmasına tümör denir. Tümör, vücudun birçok farklı noktasında oluşabilmektedir. Oluştığı yere, büyüklüğüne, türüne göre durumun ciddiyeti değişkenlik gösterir. Ölümcül olabilen bir hastalık olan beyin tümörü, insan hayatını tehdit etmektedir. Bir doktorun tümörü doğru ve hızlı bir şekilde teşhis etmesi zor bir iştir (Pranitha vd., 2022). Tümörün büyümeden alınması çoğu hastada yaşamının devamı için önemlidir. Erken teşhis bunun için çok önemli ve hayatidir. Bilgisayarlı tomografi (BT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) tümörün erken evrelerinde teşhis edilmesine yardımcı olabilecek hücre boyutu, konumu veya şekli gibi beyin dokularındaki anomalileri incelemek için yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir (Tiwari vd., 2020).

Bu çalışmada ön eğitilmiş CNN modeli DarkNet53 kullanılarak 4 farklı katmanından çıkarılan derin özellikler ve SVM algoritması kullanılarak beyin MR görüntülerinden tümör tespit sistemi geliştirilmiştir. Sistem temelde 3 ana fazdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki özellik çıkarmadır. Özellik çıkarma için güçlü bir yöntem olan ön eğitilmiş evrişimli sinir ağlarından (CNN) faydalanılmıştır. CNN'ler görüntülerden ayırt edici anlamlı özellikler çıkarma konusunda başarılıdır. Bu sebeple nesne algılama, görüntü sınıflandırma ve bölütleme gibi görevler için idealdir. Bu başarı, ön eğitilmiş CNN modellerinin özellik çıkarmı fazında tercih edilmesinde ana sebeptir. İkinci fazda ise özellik seçme işlemi yapılmaktadır. Özellik seçimi ile yüksek boyutlu özelliklere sahip veriler için özellik seçme algoritmaları kullanarak boyut indirgeme hedeflenmiştir. Bu fazda Relief ve Ki-Kare Test yöntemleri tercih edilmiştir. Relief algoritması gürültülü verilerdeki gürbüzlüğü, büyük veri setlerindeki etkinliği, özellik önem puanlarının yorumlanabilirliği ve çeşitli uygulamalardaki kullanılabilirliği gibi avantajlarından dolayı tercih edilmiştir. Bir diğer özellik seçici olarak kullanılan Ki-Kare test tekniği; özelliklerin ilgi düzeyinin değerlendirilebilmesi, sadelik ve yorumlanabilirlik gibi avantajlarından dolayı tercih edilmiştir. Son fazda ise popüler bir klasik makine öğrenme yöntemi olan SVM ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. SVM; ezberlemeye karşı dayanıklı bir algoritmadır. Ayrıca az veri ile etkili öğrenme gerçekleştirebilen bir yapıya sahiptir. Sistem "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veri seti üzerinde değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki planlaması şu şekildedir: Bölüm 2'de beyin MR görüntülerinden tümör tespiti üzerine sınıflandırma çalışmaları literatür taramasında toplanmıştır. Bölüm 3'te tümör sınıflandırması için geliştirilmiş yöntem tüm fazlarıyla detaylı olarak anlatılmış olup, yöntemin "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veri seti üzerindeki başarımı Bölüm 4 ile incelenmiştir. Son bölümde değerlendirme ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

LİTERATÜR İNCELEMESİ

Makine öğrenme yöntemleri kullanılarak tümör tespiti üzerine çokça çalışma yapılmıştır. Raporun bu bölümünde yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Sachdeva ve ekibi, genetik algoritma (GA) ve destek vektör makinelerinin (SVM) kullanıldığı yeni hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Genetik algoritma bu çalışmanın özellik seçimi fazında yer almıştır. SVM sınıflandırıcı ile elde edilen doğruluk oranı, GA optimizasyon tekniği kullanılarak %52,9'dan %93,5'e kadar çıkarılmıştır (Sachdeva vd., 2011). Geleneksel özellik çıkarma yöntemlerinden elde edilen özelliklerle, derin özellikler kullanılarak elde edilen sonuçlar kadar başarı genelde elde edilememektedir. Russakovsky ve ark. ön eğitilmiş CNN modelleri kullanarak derin özellik tabanlı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem ile %95'e kadar doğruluk oranı elde etmişlerdir (Russakovsky vd., 2015). Heba M ve ekibi, beyin tümörünün üç türü olan glioblastoma (en yaygın), sarkom (en yaygın ikinci) ve metastatik bronkojenik kanser (en yaygın üçüncü) türleri için CNN tabanlı bir sınıflandırma yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntem %84 doğruluk oranı ile başarı sağlamıştır (Mohsen vd., 2018). Histopatoloji sınıflandırma görevleri ve histopatoloji görüntü segmentasyonu için, Yan Xu ve ark., nispeten minimal eğitim verilerine dayalı olarak derin konvolüsyonel etkinleştirici özellikler üretmişlerdir. Histopatoloji fotoğrafları çok büyük olduğundan, bir görüntüyü sınıflandırmak üzere gereken özellik vektörlerinin sayısını azaltmak için özellik havuzu kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre %97,5 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir (Xu vd., 2015). Özellik seçimi ve SVM ile sınıflandırma içeren bütünleşik yöntemle, I Zacharaki ve ekibi, beyin tümör tespiti üzerine çalışmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre %97 doğruluk oranı elde edilmiştir (Zacharaki vd., 2009). Bir CNN sınıflandırmasına dayalı otomatik beyin tümör tespit sistemi, 2018'de Seetha J. ve S Selvakumar (Seetha ve Raja, 2018) tarafından önerilmiştir. Yaptıkları çalışmada %98,6 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Beyin tümörlerinin sınıflandırılması ve segmentasyonu için Amin Javeria ve ekibi tarafından derin sinir ağları tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir (Amin vd., 2018). Önerilen model 7 katmanlı olup içerisinde 5 evrişim, 6 ReLU ve 1 softmax işlemi barındırmaktadır. %89,5 doğruluk oranında başarı deneysel sonuçlara göre elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veri seti farklı çalışmalarda deneysel simülasyonlarda yer almıştır. Siddique ve ekibi derin evrişimli sinir ağı temelli beyin tümör tespit çalışmaları yapmıştır. Deneysel kurulumda veri seti 207 görüntü eğitim, 24 görüntü test ve 22 görüntü validasyon olarak ayrılmıştır. VGG16 modeline benzer bir mimarinin kurulduğu önerilen yöntemle %96 oranında başarı elde edilmiştir (Siddique vd., 2020). Febrianto ve arkadaşları, MR görüntülerinden tümör tespiti üzerine 2 CNN modeli geliştirmişlerdir. 253 veri barındıran veri setini veri çoğullama işlemi uygulayarak 2065 görüntülü çoğullanmış bir veri setine çevirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında %93'e kadar başarı elde etmişlerdir (Febrianto vd., 2020). U-Net kullanarak beyin görüntülerinden anomali tespiti çalışması, Rai ve Chatterjee tarafından gerçekleştirilmiştir. %80 eğitim %20 test verisi olacak şekilde veri bölütlemesi yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre kırılmış MR görüntülerinde %98, kırılmamış görüntülerde %94 doğruluk oranı elde edilmiştir (Rai ve Chatterjee, 2021).

MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada beyin MR görüntülerinden tümör tespiti için derin öğrenme tabanlı hibrit bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem 3 fazdan oluşmaktadır. İlk faz ile MR görüntülerinden özellikler çıkarılmaktadır. İkinci fazda yüksek boyutlu özelliklere sahip veriler için özellik seçme algoritmaları kullanarak boyut indirgeme hedeflenmiştir. Son fazda SVM algoritması ile sınıflandırma yapılmaktadır. Önerilen sistem ayrıntılı olarak aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur:

Özellik Çıkarma Yöntemleri

Özellik çıkarımı, ham veriyi, orijinal veri setindeki bilgileri korurken işlenebilecek sayısal özelliklere dönüştürme sürecini ifade etmektedir. Makine öğrenimini doğrudan ham verilere uygulamaktan daha iyi sonuçlar vermektedir (Mathworks, 2019). Bu çalışmada özellik çıkarımı için etkin bir yöntem olan ön eğitilmiş CNN modelleri kullanılmıştır.

Ön Eğitilmiş CNN Modelleri

Evrişimli sinir ağları (convolutional neural networks, CNN) özelleşmiş ve çok katmana sahip özel bir yapay sinir ağı sistemidir (Krizhevsky vd., 2017). En az bir evrişim katmanı barındırması gereken CNN temel olarak, evrişim katmanı, ortaklama katmanı, aktivasyon fonksiyonları, tam bağlı katman, kayıp katmanı, düzenleme ve optimizasyon bileşenlerinden oluşmaktadır (Krizhevsky vd., 2017).

Daha önceden eğitilmiş ve başarılı olmuş CNN modelleri ön eğitilmiş CNN modelleri olarak adlandırılırlar. Bu modeller transfer öğrenme, özellik çıkarımı ve sınıflandırma amaçlarıyla kullanılabilir (Özcan ve Basturk). Ön eğitilmiş modelden genellikle son katmanlardan birisi belirlenerek derin özelliklerin çıkarımı sağlanmaktadır.

DarkNet53 CNN Modeli

Bu çalışmada özellik çıkarımı için Darknet53 ön eğitilmiş CNN modelinin 'conv52', 'res23', 'avg1' ve 'conv53' katmanları özellik çıkarıcı katmanlar olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntemde kullanılacak olan katmanlara ait detaylı bilgi Tablo 1 ile sunulmuştur.

Tablo 1. Özellik Çıkarıcı Katmanlara Ait Bilgiler

Katman Sırası	Adı	Açıklama	Özellik Sayısı
177	conv52	Konvolüsyon Katmanı	65536
180	res23	Ekleme Katmanı	65536
181	avg1	Ortalamaya Ortaklama Katmanı	1024
182	conv53	Konvolüsyon Katmanı	1000

Özellik Seçme Yöntemleri

Bir model oluşturmak için özellik seçme algoritmaları kullanılarak veri setinden en iyi alt kümenin seçimidir (Budak, 2018). Özellik seçiminin avantajları;

- Özellik kümesinin boyutunu küçültmek ve kullanılan algoritmanın performansını artırmak,
- Gürültüyü veriyi ortadan kaldırır ve veri kalitesini geliştirir,
- Veri depolamak için gerekli olan hafızayı azaltır ve kaynak tasarrufu sağlar,
- Modelin performansını iyileştirir.

Özellik Seçme Yöntemlerini 3 gruba ayrılabilir (Hakverdi, 2019);

- Filtre Yöntemleri
- Sarma Yöntemleri
- Gömülü Yöntemler

Özellik seçme için Filtre yöntemleri olarak; Fisher Skor, t-Skor, Welch t-İstatiği, Ki-Kare testi, One-R, ve Relief gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kullanım esnekliği, nispeten hızlı ve genel kabul görmüş yöntem olan Relief ve Ki-Kare testi kullanılmıştır.

Relief Algoritması

Bu yöntem Kira ve Rendell tarafından önerilmiştir (Wikipedia, 2013). Özellikleri aralarındaki ilişkiye göre ağırlıklandırılan bir özellik seçme yöntemidir. Relief methodu, veri setinden bir örneğin kendi sınıfındaki diğer örneklerle yakınlığı ve farklı sınıflara uzaklığına bağlı olarak işlemi gerçekleştirir.

Relief Algoritması Adımları:

Adım 1. Bir örneğin kendi sınıfına ait en yakın örnekteki ilgili özellik değeri ve farklı sınıfa sahip en yakın örnekteki ilgili özellik değerinin belirlenmesi (Budak, 2018),

Adım 2. İlgili özelliğin ağırlığının hesaplanması (Budak, 2018), formül n kere tekrarlanarak hesaplanmaktadır.

$$W_i = W_{i-1} - (x_i - nearHit_i)^2 + (x_i - nearMiss_i)^2 \quad (1)$$

x_i = i. örneği temsil etmektedir,

n = örnek sayısını,

W_i = i özelliğinin ağırlığını (önem derecesi),

$nearHit_i$ = aynı sınıfa sahip en yakın örnekteki ilgili özellik değerini göstermektedir.

$nearMiss_i$ = farklı sınıfa sahip en yakın örnekteki ilgili özellik değerini göstermektedir.

Adım 3. Özelliklerin ağırlıklarına göre sıralanması ve belirli bir eşik değeri veren üstteki k adet özelliğin seçilmesi (Budak, 2018).

Ki-Kare Testi

Bu yöntem Liu ve Setiono tarafından önerilmiştir (Liu ve Setiono, 1997). İki değişken arasındaki ilişkinin bağımlı mı bağımsız mı olduğunu belirlemeye yarayan yöntemdir. Yöntemi ikiye ayırırsak, ilk kısımda özelliklerin sınıflara göre Ki-Karesi hesaplanır daha sonraki kısımda ise serbestlik derecesi ve belirlenen önemlilik seviyesine göre Ki-kaynaşımı prensibi ile Ki-Kare değerlerine bakılarak veri seti içerisindeki tutarsız özelliklerin bulunana kadar özelliklerin ayrıştırılmasıdır (Sahin, 2017).

Denklem şu şekildedir:

$$X^2 = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^k \frac{(A_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (2)$$

$$E_{ij} = \frac{R_i * C_j}{N} \quad (3)$$

k = Sınıf Sayısı

A_{ij} = Gözlenen Değer

E_{ij} = Beklenen Değer

R_i = Aralık (i. satırdaki)

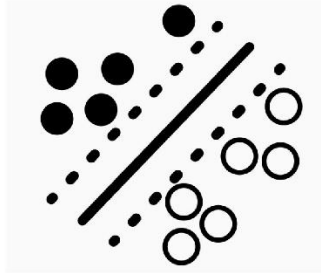
C_j = Sınıf (j. sütundaki)

N = Ana kütle Hacmi

SVM Algoritması

Regresyon ve sınıflandırma problemlerinde kullanılabilen SVM algoritması 1992 yılında Vapnik ve arkadaşları tarafından önerilmiştir (Boser vd., 1992). Bu çalışmada sınıflandırma işlemi gerçekleştirmek üzere SVM

kullanılmıştır. Uygulaması kolay esnek bir algoritma olan SVM, yapısal risk minimizasyonu ve istatistiksel öğrenme teorisine dayanmaktadır. Bir düzlemde bulunan iki grup arasına bir sınır çizgisi çekilerek iki grup ayrılabilir. Bu sınır çizgisinin bulunacağı konum iki grubun üyelerine en uzak olan konumda olmalıdır. Algoritma, bu sınırın nasıl çizileceği konusunda görev almaktadır. Overfitting (ezberleme) sorununun bulunmaması ve yüksek doğruluk oranları gibi avantajlarının olmasıyla birlikte, olasılıksal tahminler yürütememe ve çekirdek fonksiyonlarının pozitif tanımlı sürekli fonksiyonlar olma zorunluluğu dezavantajları vardır (Tas, 2016). SVM için örnek gösterim Şekil 1 ile sunulduğu gibidir. Burada iki farklı sınıfı ayıran bir vektör çizimi gösterilmektedir. Bu vektör öyle bir noktadan çizilebilmeli ki sınıfları ayırma gücü kuvvetli olabilsin. Hiper düzlem (hyperline) bu vektörün SVM'deki karşılığıdır.



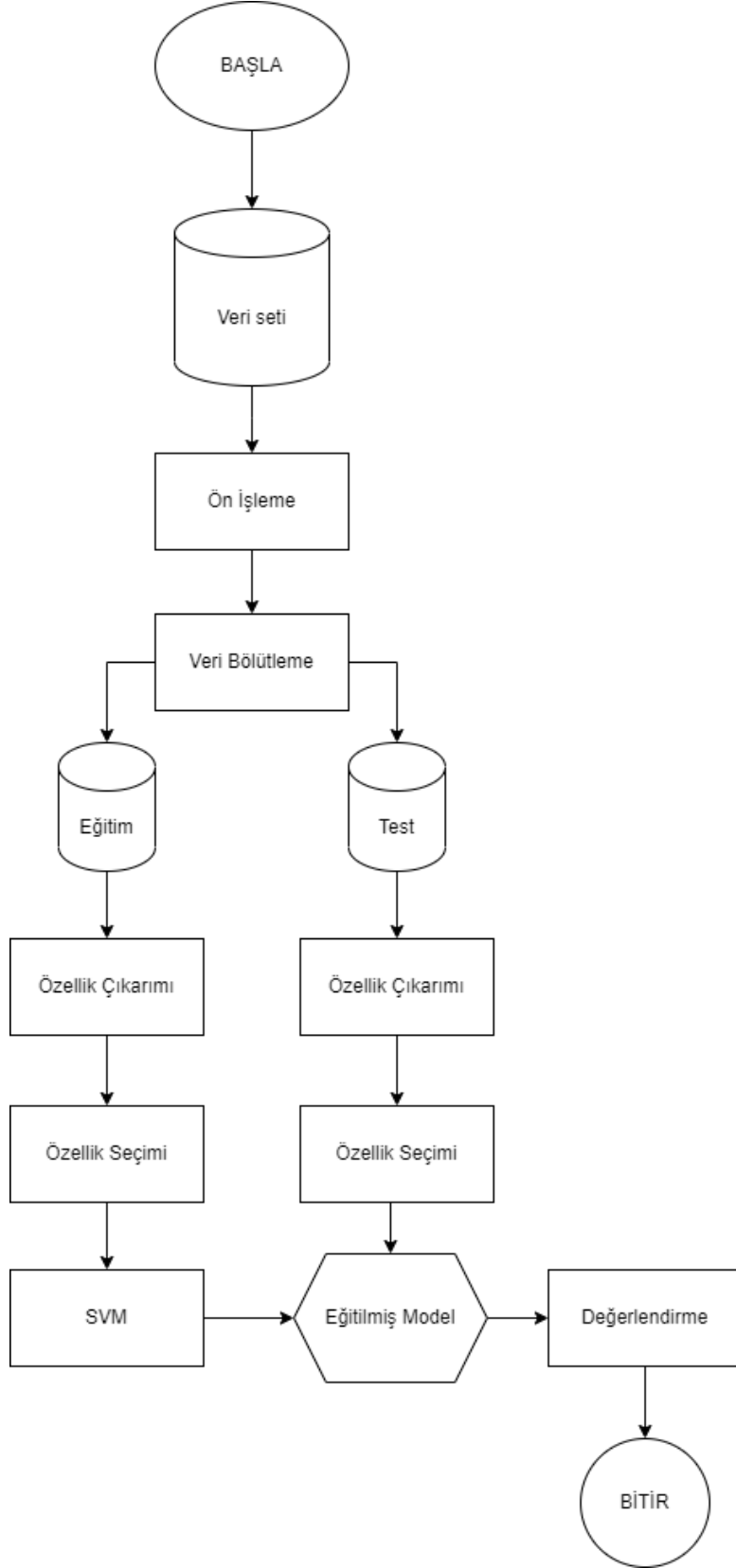
Şekil 1. SVM Gösterimi

Önerilen Yöntem

Bu çalışmada beyin MR görüntülerinden tümör tespiti yapan bir sınıflandırma sistemi önerilmiştir. Bu yöntem özellik çıkarma, özellik seçme ve sınıflandırma temel fazlarından oluşmaktadır. Önerilen yöntem Şekil 2 ile sunulmuştur.

Bu yöntemde izlenen adımlar şu şekildedir:

- Adım 1. Sisteme öncelikle simülasyon aşamalarında kullanılacak olan veri seti yükle.
- Adım 2. Özellik çıkarımında kullanılacak olan ön eğitilmiş CNN modeline göre imgelere ön işleme adımları uygula.
 - Adım 2.1. İmge boyutu 1 mi? 1 ise 3 boyutlu hale getir.
 - Adım 2.2. İmgenin genişliğini ve yüksekliğini 256 X 256 olarak yeniden ölçeklendir.
- Adım 3. Veri setini %70 Eğitim %30 Test verisi olacak şekilde bölütle.
- Adım 4. Ön eğitilmiş CNN ile eğitim verisinden özellik çıkar.
 - Adım 4.1. darknet53 ön eğitilmiş CNN modelini yükle.
 - Adım 4.2. Özellik çıkarıcı katmanı belirle.
 - Adım 4.3. Eğitim verisi, darknet53 modeli ve özellik çıkarıcı katmanı kullanarak derin özellikleri çıkar.
- Adım 5. Özellik seçimi gerçekleştir.
 - Adım 5.1. Adım 4'te çıkarılan özellikleri ve etiketleri özellik seçici algoritmaya girdi olarak ver.
 - Adım 5.2. Özelliklerin sınıflandırmayı etkilediği ağırlık skorları ve özellik önem sırasını değişkenlere ata.
 - Adım 5.3. Özellik boyutu kaç özelliğe indirilecekse önem sırasına göre ilk o kadar özelliği ayıkla.
- Adım 6. Seçilmiş özellikleri ve etiketleri SVM algoritmasına gönder ve eğitimi gerçekleştir.
- Adım 7. Ön eğitilmiş CNN ile test verisinden özellik çıkar.
 - Adım 7.1. Test verisi, darknet53 modeli ve özellik çıkarıcı katmanı kullanarak derin özellikleri çıkar.
- Adım 8. Özellik seçimi gerçekleştir.
 - Adım 8.1. Özellik boyutu kaç özelliğe indirilecekse önem sırasına göre ilk o kadar özelliği ayıkla.
- Adım 9. Değerlendirme
 - Adım 9.1. Adım 6 ile elde edilen eğitilmiş model ile Adım 8 ile elde edilen test verisi seçilmiş özellikleri predict komutuna girdi olarak gönderilir.
 - Adım 9.2. Sistemin test verisi üzerindeki başarımı sonuç olarak döndürülür.



Şekil 2. Önerilen Yöntem

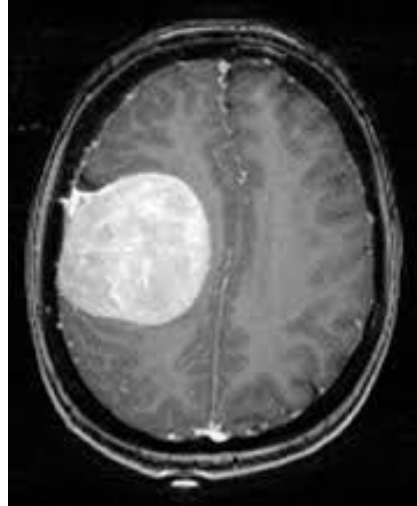
Bu çalışmada simülasyonlarda kullanılmak üzere 4'ü özellik seçici barındırmayan, 2'si barındıran toplamda 6 yöntem türetilmiştir. Bu yöntemler M1'den M6'ya kadar isimlendirilmiştir. Yöntemlere ait bilgiler Tablo 2 ile gösterildiği gibidir.

Tablo 2. Önerilen Yöntemler

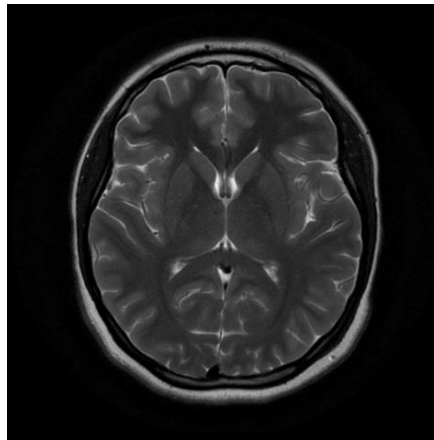
Model Adı	Özellik Çıkarıcı	Özellik Seçici
M1	conv52	Yok
M2	res23	Yok
M3	avg1	Yok
M4	conv53	Yok
M5	res23	Relief
M6	res23	Ki-Kare Test

Kullanılan Veri Seti

Bu çalışmada önerilen yöntemin simülasyonlarında kullanılmak üzere public bir veri seti olan "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veri seti (Chakrabarty, 2018) kullanılmıştır. Bu veri seti toplamda iki sınıftan oluşmaktadır. Bunlar tümörün varlığını belirten yes sınıfı, tümör olmadığını belirten no sınıfıdır. Veri setinde; yes sınıfına ait 155 örnek, no sınıfına ait 98 örnek olmak üzere toplamda 253 örnek imge bulunmaktadır. Veri setine ait örnek imgeler Şekil 3-4 ile sunulmuştur. Şekil 3 tümör olan beyin MR görüntüsünü içerirken Şekil 4 tümör olmayan beyin MR görüntüsünü içermektedir.



Şekil 3. Tümör Olan Beyin MR Görüntüsü



Şekil 4. Tümör Olmayan Beyin MR Görüntüsü

DENEYSEL SONUÇLAR

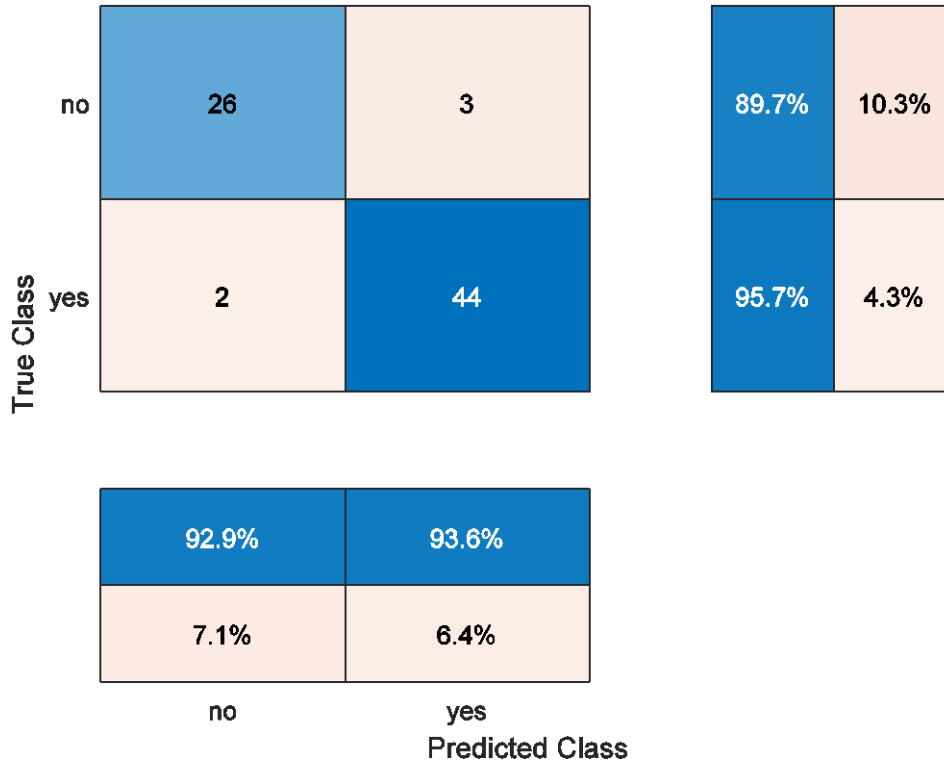
Deneysel çalışmalar her bir önerilen yöntem için ayrı ayrı uygulanmış olup elde edilen deneysel sonuçlar şu şekildedir:

M1 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

M1 yöntemi ile eğitim ve test verilerinden 65536 tane özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Özellik seçicinin kullanılmadığı bu yöntem eğitim verileri ile eğitilmiş ve test verisi üzerinde doğruluk kriterinin performans metriği olacağı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma 30 defa koşurulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 3 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %93,33 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 5 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 26 tane no sınıfına ait örnek no (%89,7), 3 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%10,3); gerçekte 44 tane yes sınıfı yes (%95,7), 2 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%4,3). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,9169'dur. 30 koşma için geçen toplam süre 3,7572 saniyedir.

Tablo 3. M1 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,9333	11	0,9333	21	0,9067
2	0,9200	12	0,9333	22	0,9200
3	0,9067	13	0,9200	23	0,9200
4	0,9333	14	0,9067	24	0,9200
5	0,9200	15	0,9200	25	0,9333
6	0,8800	16	0,9067	26	0,9067
7	0,9200	17	0,9200	27	0,9200
8	0,9200	18	0,9200	28	0,9200
9	0,9067	19	0,9200	29	0,8933
10	0,9200	20	0,9200	30	0,9067



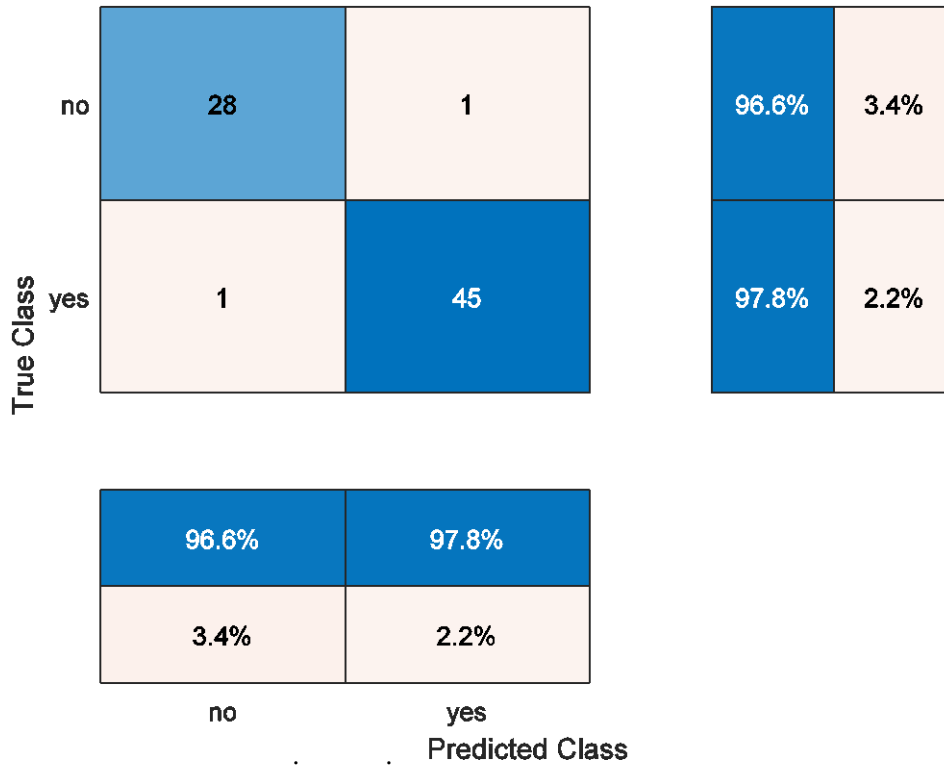
Şekil 5. M1 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

M2 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

M2 yöntemi ile eğitim ve test verilerinden 65536 tane özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Özellik seçicinin kullanılmadığı bu yöntem eğitim verileri ile eğitilmiş ve test verisi üzerinde doğruluk kriterinin performans metriği olacağı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma 30 defa koşturulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 4 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %97,33 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 6 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 28 tane no sınıfına ait örnek no (%96,6), 1 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%3,4); gerçekte 45 tane yes sınıfı yes (%97,8), 1 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%2,2). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,9267'dir. 30 koşma için geçen toplam süre 3,2163 saniyedir.

Tablo 4. M2 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,9467	11	0,9200	21	0,8800
2	0,9200	12	0,9200	22	0,9067
3	0,9200	13	0,9067	23	0,9200
4	0,9600	14	0,9733	24	0,9067
5	0,9200	15	0,9067	25	0,9067
6	0,9067	16	0,9733	26	0,9200
7	0,9200	17	0,9333	27	0,9467
8	0,9067	18	0,9333	28	0,9067
9	0,9467	19	0,9467	29	0,9333
10	0,9200	20	0,9200	30	0,9733



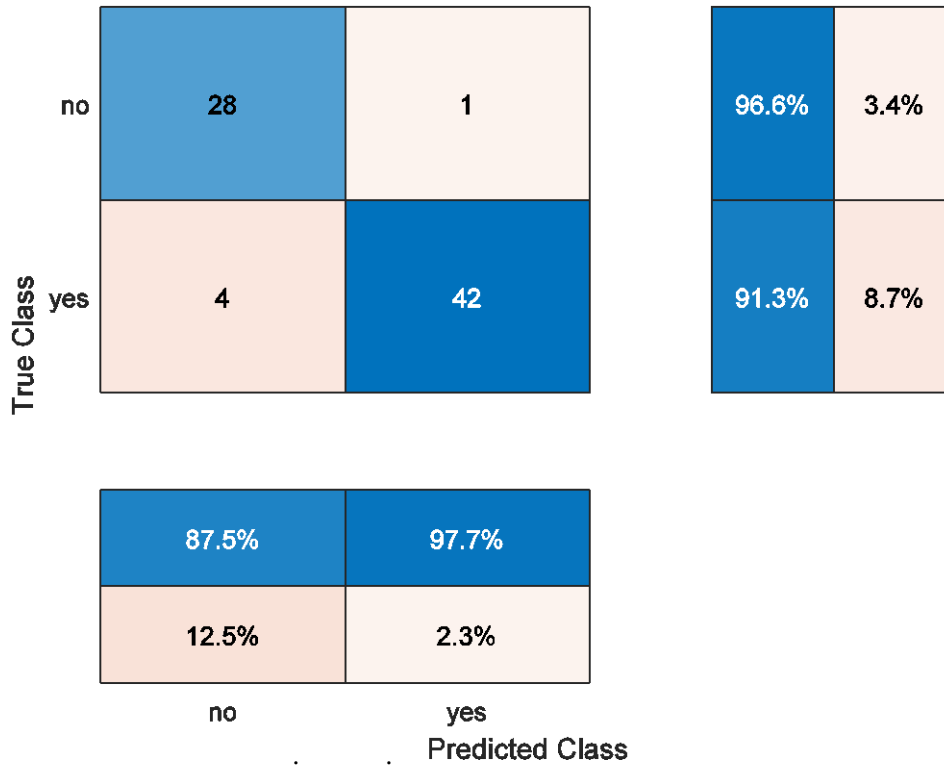
Şekil 6. M2 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

M3 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

M3 yöntemi ile eğitim ve test verilerinden 1024 tane özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Özellik seçicinin kullanılmadığı bu yöntem eğitim verileri ile eğitilmiş ve test verisi üzerinde doğruluk kriterinin performans metriği olacağı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma 30 defa koşturulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 5 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %93,33 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 7 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 28 tane no sınıfına ait örnek no (%96,6), 1 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%3,4); gerçekte 42 tane yes sınıfı yes (%91,3), 4 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%8,7). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,8871'dir. 30 koşma için geçen toplam süre 1,8258 saniyedir.

Tablo 5. M3 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,8933	11	0,8933	21	0,9067
2	0,8800	12	0,8667	22	0,8933
3	0,8800	13	0,9067	23	0,8933
4	0,8933	14	0,8533	24	0,8667
5	0,8800	15	0,8667	25	0,8800
6	0,8533	16	0,8667	26	0,8667
7	0,9067	17	0,8933	27	0,8667
8	0,8800	18	0,8800	28	0,9200
9	0,9067	19	0,9200	29	0,8667
10	0,9333	20	0,8933	30	0,9067



Şekil 7. M3 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

M4 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

M4 yöntemi ile eğitim ve test verilerinden 1000 tane özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Özellik seçicinin kullanılmadığı bu yöntem eğitim verileri ile eğitilmiş ve test verisi üzerinde doğruluk kriterinin performans metriği olacağı şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma 30 defa koşturulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 6 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %89,33 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 8 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 27 tane no sınıfına ait örnek no (%93,1), 2 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%6,9); gerçekte 40 tane yes sınıfı yes (%87,0), 6 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%13,0). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,8351'dir. 30 koşma için geçen toplam süre 1,4582 saniyedir.

Tablo 6. M4 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,8267	11	0,8267	21	0,8133
2	0,8533	12	0,8933	22	0,8400
3	0,8000	13	0,8133	23	0,8800
4	0,8533	14	0,8400	24	0,8667
5	0,8267	15	0,8133	25	0,7867
6	0,7333	16	0,8000	26	0,8667
7	0,8667	17	0,8267	27	0,8400
8	0,8667	18	0,8267	28	0,8133
9	0,8533	19	0,8400	29	0,8267
10	0,8667	20	0,8400	30	0,8533



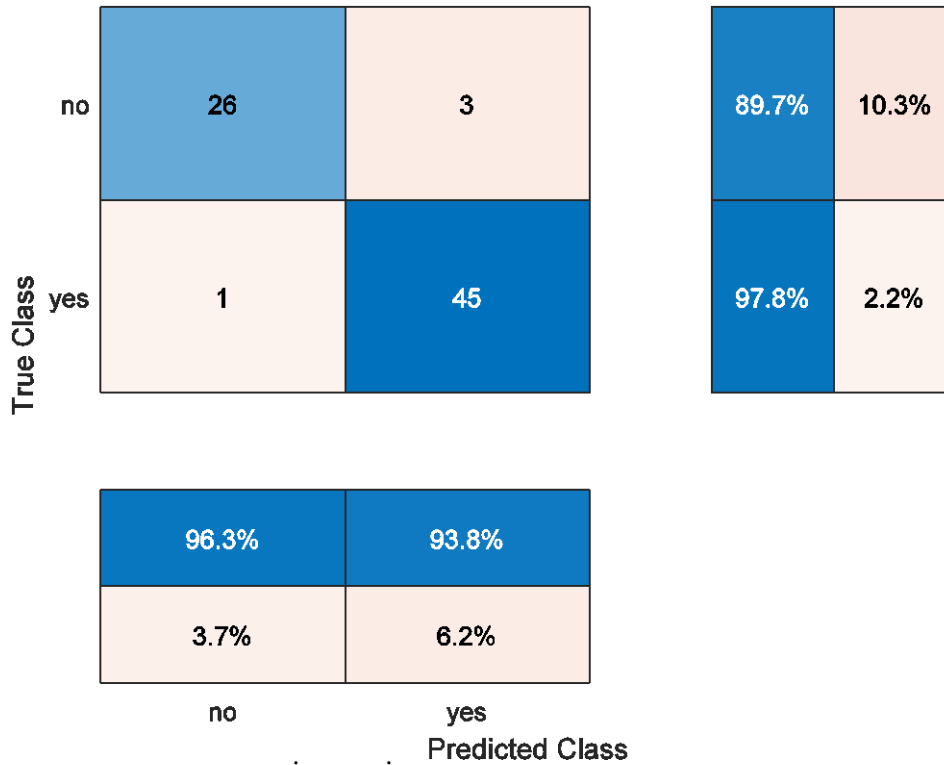
Şekil 8. M4 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

M5 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

M1, M2, M3, M4 yöntemlerinden en başarılı sonuç res23 katmanının özellik çıkarıcı olarak kullanıldığı M2 yöntemidir. Bu nedenle özellik seçici olarak Relief algoritmasının kullanıldığı M5 yönteminde özellik çıkarıcı olarak res23 katmanı kullanılmıştır. Res23 katmanı ile bir görüntüden 65536 tane özellik çıkarılırken özellik seçiminde 6500 özellik tercih edilmiştir. Çalışma 30 defa koşturulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 7 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %94,67 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 9 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 26 tane no sınıfına ait örnek no (%89,7), 3 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%10,3); gerçekte 45 tane yes sınıfı yes (%97,8), 1 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%2,2). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,9227'dir. 30 koşma için geçen toplam süre 1,0203 saniyedir.

Tablo 7. M5 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,8933	11	0,9200	21	0,9067
2	0,9200	12	0,9333	22	0,9200
3	0,9200	13	0,8933	23	0,9333
4	0,9067	14	0,9333	24	0,9200
5	0,9200	15	0,9333	25	0,9200
6	0,9333	16	0,9067	26	0,9200
7	0,9467	17	0,9200	27	0,9200
8	0,9333	18	0,9333	28	0,9467
9	0,9333	19	0,9200	29	0,9333
10	0,9200	20	0,9200	30	0,9200



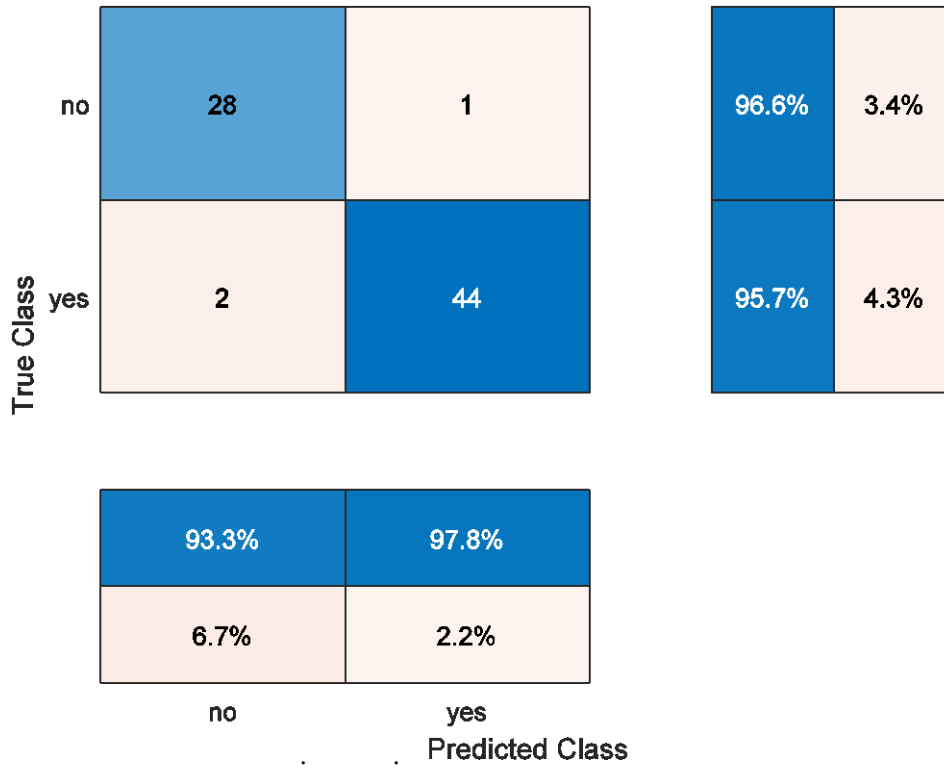
Şekil 9. M5 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

M6 Yöntemi İle Elde Edilen Sonuçlar

Özellik seçici olarak Ki-Kare Test yönteminin kullanıldığı M6 yönteminde özellik çıkarıcı olarak res23 katmanı kullanılmıştır. Res23 katmanı ile bir görüntüden 65536 tane özellik çıkarılırken özellik seçiminde 6500 özellik tercih edilmiştir. Çalışma 30 defa koşturulmuştur. 30 koşmaya ait doğruluk oranları Tablo 8 ile sunulmuştur. Bu koşmalar içerisinde en başarılı doğruluk oranı yüzde cinsinden %96,00 olarak elde edilmiştir. En başarılı sonuca ait karmaşıklık matrisi Şekil 10 ile gösterilmiştir. Şekle göre gerçekte 28 tane no sınıfına ait örnek no (%96,6), 1 tane no sınıfına ait örnek yes olarak tahmin edilirken (%3,4); gerçekte 44 tane yes sınıfı yes (%95,7), 2 tane yes sınıfına ait örnek no olarak tahmin edilmiştir (%4,3). Ayrıca tüm koşmalara ait ortalama doğruluk değeri 0,9328'dir. 30 koşma için geçen toplam süre 0,9453 saniyedir.

Tablo 8. M6 Yöntemi İçin Elde Edilen Doğruluk Oranları

Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı	Koşma	Doğruluk Oranı
1	0,9200	11	0,9467	21	0,9600
2	0,9333	12	0,9600	22	0,9600
3	0,9067	13	0,9200	23	0,9200
4	0,9600	14	0,9067	24	0,9200
5	0,9200	15	0,9600	25	0,9600
6	0,9200	16	0,9200	26	0,9200
7	0,9467	17	0,9333	27	0,9333
8	0,9200	18	0,9067	28	0,9467
9	0,9333	19	0,9067	29	0,9467
10	0,9333	20	0,9067	30	0,9600



Şekil 10. M6 İçin En İyi Koşmaya Ait Karmaşıklık Matrisi

Tüm simülasyon sonuçlarını değerlendirmek için Tablo 9 hazırlanmıştır. Bu tabloya göre tüm koşmalar içerisinde en iyi başarı oranı %97,33 ile M2 yönteminden elde edilmiştir. Daha kabul edilir bir başarı kriteri olan ortalama doğruluk oranı değerine göre ise %93,28 ile M6 yöntemi en başarılı sonucu vermiştir. Yöntemlerin performansını karşılaştırmak için kullanılabilir bir diğer metrik; zamansal karmaşıklığıdır. Her bir yöntem için 30'ar koşma süresince saniye cinsinden geçen zaman, yöntemlerin zamansal karmaşıklığını vermektedir. Bu kapsamda en iyi zamansal karmaşıklık değeri 0,9453 sn ile M6 yönteminden elde edilmiştir.

Önerilen modellerin literatürde yer alan diğer çalışmalarla karşılaştırılması Tablo 10 ile sunulduğu gibidir. Veri bölütleme tipi farklı olsa da önerilen yöntemin literatürde yer alan diğer çalışmalar kadar başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 9. Önerilen Yöntemlerin Performans Değerlendirmesi

Yöntem	Özellik Çıkarıcı	Özellik Seçici	En İyi Başarı (%)	Ortalama Başarı (%)	Zamansal Karmaşıklık (sn)
M1	conv52	Yok	93,33	91,69	3,7572
M2	res23	Yok	97,33	92,67	3,2163
M3	avg1	Yok	93,33	88,71	1,8258
M4	conv53	Yok	89,33	83,51	1,4582
M5	res23	Relief	94,67	92,27	1,0203
M6	res23	Ki-Kare Test	96	93,28	0,9453

Tablo 10. Önerilen Yöntemlerin Diğer Çalışmalarla Karşılaştırılması

Çalışma	Algoritma	Veri Bölütleme	Sınıflandırma Başarısı
Amin ve ekibi, 2018	7 layered 2D CNN	Bilinmiyor	%95,1
Mohsen ve ekibi, 2017	SMO + SVM	7-kat çaprazlama %80 eğitim - %10	%93,9
Siddique ve ekibi, 2020	DCNN (VGG16) DarkNet53 + Ki-Kare	validasyon - %10 test	%96,0
Önerilen Model (M6)	Test + SVM	%70 eğitim- %30 test	%96,0

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada beyin MR görüntüleri kullanılarak tümör tespiti üzerine yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Geliştirilen yöntem 3 ana fazdan oluşmaktadır. Birinci fazda DarkNet53 ön eğitilmiş CNN modeli kullanılarak özellik çıkarımı gerçekleştirilmektedir. DarkNet53 modelinin 'conv52', 'res23', 'avg1' ve 'conv53' katmanları özellik çıkarıcı katmanlar olarak kullanılmıştır. İkinci fazda özellik seçimi işlemi yapılmıştır. Relief ve Ki-Kare Test Algoritmaları özellik seçiminde tercih edilmiştir. Son fazda ise sıklıkla kullanılan popüler bir sınıflandırma yöntemi olan SVM algoritması kullanılmıştır. Özellik çıkarıcı katman ve özellik seçme yöntemlerinin ikili kombinasyonuna göre 6 farklı model (M1, M2, M3, M4, M5, M6) önerilmiştir.

Önerilen yöntemlerin eğitimi için kamuya açık "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" veriseti kullanılmıştır. **yes** ve **no** sınıflarına sahip görüntülerden oluşan bu veri seti %70 eğitim %30 test olacak şekilde ayrılmıştır. Doğruluk oranı ve zamansal karmaşıklık, performans metriği olarak kullanılmıştır. Her bir yöntem 30 defa koşturulmuştur.

Deneysel sonuçlara göre koşmalar içerisinde en iyi başarı oranı (%97,33) M2 ile edilirken, ortalama başarı oranlarına bakıldığında en iyi ortalama başarı oranı (%93,28) 'res23' katmanının özellik çıkarıcı, Ki-Kare Test algoritmasının özellik seçici olarak kullanıldığı M6 ile elde edilmiştir. Zamansal karmaşıklıklar incelendiğinde M6 modeli ile en hızlı (0,9453 sn) yöntem elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda beyin tümör tespiti için farklı veri setleri kullanılacaktır. Ayrıca mevcut yöntemler farklı özellik çıkarıcı ve seçici yöntemlerle geliştirilecek ve performans analizi yapılacaktır. Buna ilaveten, önerilen yöntemde kullanılan hiperparametreler seçme algoritmaları ile optimize edilerek performans artırımı yapılacak sonuçlar karşılaştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- Amin, J., Sharif, M., Yasmin, M., & Fernandes, S.L. (2018). Big data analysis for brain tumor detection: Deep convolutional neural networks. *Future Generation Computer Systems*, 87,290–297. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.04.065>.
- Boser, B.E., Guyon, I.M., & Vapnik, V.N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, 144–152. <https://doi.org/10.1145/130385.130401>.
- Budak, H. (2018). Özellik seçim yöntemleri ve yeni bir yaklaşım. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22:21–31. DOI: 10.19113/sdufbed.01653.
- Febrianto, D., Soesanti, I., & Nugroho, H. (2020). Convolutional neural network for brain tumor detection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 771, 012031, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/771/1/012031>.
- Fırat HAKVERDİ, (2019), Veri Önleme. <https://prezi.com/p/vk31emxjhl4y/veri-on-isleme/>, online; accessed 14 December 2022.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G.E. (2017). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6):84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>.
- Ozcan, T., & Basturk, A. (2021). Performance improvement of pre-trained convolutional neural networks for action recognition. *The Computer Journal*, 64(11), 1715-1730. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxaa029>
- Liu, H., & Setiono, R. (1997). Feature selection via discretization. *IEEE Transactions on knowledge and Data Engineering*, 9(4), 642-645. <https://doi.org/10.1109/69.617056>.
- Mathworks, (2019). Feature Extraction, <https://www.mathworks.com/discovery/feature-extraction.html>, online; accessed 17 December 2022.
- Mohsen, H., El-Dahshan, E., El-Horbaty, E., & Salem, A. (2017). Brain tumor type classification based on support vector machine in magnetic resonance images. *Annals Of "Dunarea De Jos" University Of Galati, Mathematics, Physics, Theoretical mechanics, Fascicle II, Year IX (XL), 1*.
- Mohsen, H., El-Dahshan, E.S.A., El-Horbaty, E.S.M., & Salem, A.B.M. (2018). Classification using deep learning neural networks for brain tumors. *Future Computing and Informatics Journal*, 3(1):68–71. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2017.12.001>.
- NAVONEEL CHAKRABARTY, (2018). Brain MRI Images for Brain Tumor Detection, <https://www.kaggle.com/datasets/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection?resource=download>, online; accessed 14 December 2022.
- Oğuzhan Taş, (2016). Destek Vektör Makineleri, <https://www.slideshare.net/oguzhantas/destek-vekr-makineleri-support-vector-machine>, online; accessed 15 December 2022.
- Pranitha, K., Vurukonda, N., & Nayak, R.K. (2022). A Comprehensive Survey on MRI Images Classification for Brain Tumor Identification using Deep Learning Techniques. *2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, 1206–1212, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOSEC54921.2022.9951913>.
- Rai, H.M. & Chatterjee, K. (2021). 2D MRI image analysis and brain tumor detection using deep learning CNN model LeU-Net. *Multimedia Tools and Applications*, 80(28):36111–36141. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11504-9>.
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., Huang, Z., Karpathy, A., Khosla, A., Bernstein, M., et al. (2015). Imagenet large scale visual recognition challenge. *International journal of computer vision*, 115(3):211–252. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>.
- Sachdeva, J., Kumar, V., Gupta, I., Khandelwal, N., & Ahuja, C.K. (2011). Multiclass brain tumor classification using GA-SVM. *2011 Developments in E-systems Engineering*, 182–187, IEEE. <https://doi.org/10.1109/DeSE.2011.31>.
- Sahin, E. (2017). Özellik seçimi algoritmaları kullanılarak heyelanda etkili faktörlerin belirlenmesi ve heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Doktora Tezi*, İstanbul.

- Seetha, J. & Raja, S.S. (2018). Brain tumor classification using convolutional neural networks. *Biomedical & Pharmacology Journal*, 11(3):1457-1461. <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/1511>.
- Siddique, M.A.B., Sakib, S., Khan, M.M.R., Tanzeem, A.K., Chowdhury, M., & Yasmin, N. (2020). Deep convolutional neural networks model-based brain tumor detection in brain MRI images. *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)*, 909–914, IEEE. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC49090.2020.9243461>.
- Tiwari, A., Srivastava, S., & Pant, M. (2020). Brain tumor segmentation and classification from magnetic resonance images: Review of selected methods from 2014 to 2019. *Pattern Recognition Letters*, 131:244–260. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.11.020>.
- Wikipedia, (2013). Relief (feature selection), [https://en.wikipedia.org/wiki/Relief_\(feature_selection\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Relief_(feature_selection)), online; accessed 14 December 2022.
- Xu, Y., Jia, Z., Ai, Y., Zhang, F., Lai, M., Eric, I., & Chang, C. (2015). Deep convolutional activation features for large scale brain tumor histopathology image classification and segmentation. *2015 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*, 947–951, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2015.7178109>.
- Zacharaki, E.I., Wang, S., Chawla, S., Soo Yoo, D., Wolf, R., Melhem, E.R., & Davatzikos, C. (2009). Classification of brain tumor type and grade using MRI texture and shape in a machine learning scheme. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 62(6):1609–1618. <https://doi.org/10.1002/mrm.22147>.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.05.2023
Kabul Tarihi : 17.08.2023

Received Date : 06.05.2023
Accepted Date : 17.08.2023

GELENEKSEL AHŞAP PİROGRAFI TEKNİĞİNİN MOBİLYA YÜZEYLERİNDE LAZER TEKNOLOJİSİ İLE İNOVASYONU

INNOVATION OF TRADITIONAL WOOD PYROGRAPHY WITH LASER TECHNOLOGY ON FURNITURE SURFACES

Cebrail AÇIK¹ (ORCID: 0000-0002-1094-6946)

¹ Onikişubat İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cebrail AÇIK, cebrail46@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada geleneksel bir ahşap yüzey süsleme yöntemi olan pirografi tekniğinin CNC lazer teknolojisi ile uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç için kavak ağacında elde edilen deney örnekleri üzerine geleneksel ahşap yakma makinesi ve CNC lazer makinesi ile 5 farklı oranda yakma gücü uygulanarak farklı tonlarda renkler elde edilmiştir. Elde edilen renk tonlarının beyazlık değerleri esas alınarak, her iki yöntem için sayısal modelleme yapılmıştır. Modelleme formülleri ve görsel değerlendirmeler yardımıyla iki ayrı yöntemle, aynı renkte ahşap ürün imal edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak geleneksel ahşap yüzey süsleme sanatı pirografi tekniğinin, CNC lazer teknolojisi ile uygulanabilirliği, karşılaştırılması, avantajları ve sınırlılıkları açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Pirografi, lazer, ahşap yakma

ABSTRACT

In this study, the applicability of the pyrography technique, which is a traditional wood surface decoration art, with CNC laser technology was investigated. For this purpose, different color tones were obtained by applying burning power at 5 different rates with conventional wood burning machine and CNC laser machine on experimental samples obtained from poplar wood. Numerical modeling was performed for both methods based on the whiteness values of the obtained color tones. Two different methods were used to produce wooden products of the same color with the help of modeling formulas and visual evaluations. As a result, the applicability, comparison, advantages and limitations of the traditional wood surface decoration art pyrography technique with CNC laser technology were tried to be explained.

Keywords: Pyrography, laser, wood burning

GİRİŞ

Pirografi, yakarak ahşap yüzeyine yazı yazma ve şekil yapma sanatıdır. Pirografi terimi, Yunanca *pur* (ateş) ve *graphos* (yazı) kelimelerinden oluşmuş olup "ateşle yazmak" anlamına gelir. Bu sanatla meşgul olanlara da pirograf denir. Pirografi çalışmasında, genellikle kavak ağacından ince tablalar ya da tahta gibi benzer materyaller üzerine, özel aletler, ateş süngüsü ve hatta güneş ışığını belli bir noktada toplayan mercekler kullanılır. Önce bir gölgeleme yapılır, ardından da çalışma yapılacak konu-resim belirlenir. Gerisi havya ve sanatçının el becerisine kalmıştır. Pyrogravür şeklinde de isimlendirilen sanat, Türkiye’de yeteri kadar bilinmemektedir. Kendi gayretleriyle ahşap yakma sanatına can vermeye çalışan sayılı insan bulunmaktadır. Selçuklu’ da kullanılan pirografi sanatı, Osmanlı’da haberleşme aracı hâline gelmiştir. XIX. Yüzyılda Amerikalılar bu zanaatı sanata çevirmiştir. Batıda ders olarak okutulan ahşap yakma sanatı, Türkiye’de eğitimini vermek bir yana zanaatkarlar tarafından bile yeterince bilinmiyor (Kalaycı, 2014). Günümüze ulaşan en eski pirografi eserleri Peru ve Roma Britanya’sındandır. Bu eserler MS Birinci Yüzyıldan çok öncesine dayanmaktadır. Bu eserler, ahşap yüzeylere çeşitli kalınlık ve uç boyutlarında, ateşle ısıtılan metal çubuklar kullanılarak oluşturulmuştur. Orta Çağ’a gelindiğinde, sıcak kömürlere farklı şekilli uçları olan sivri uçlu küçük maşaların yerleştirilmesine izin veren, kapaklarında delikler olan küçük portatif odun sobaları yapılmıştır. Çalışmaya devam etmek için her zaman sıcak bir maşaya sahip olmak amacıyla birkaç maşa gerekmiştir. Bu odun yakma yöntemine "pokerwork" adı verilmiştir. 1900’lerde pirografi sanatının oluşmasını kolaylaştıran mekanik bir alet icat edildi. Aletin iğne kısmı platinden yapılmıştır ve bir iğne tutucuya vidalanarak bir grafik kalem oluşturulmuştur. Bir tüp benzinle doldurulmuştur. Tüp, benzin dumanlarını şişeden grafik kalemine zorlamak için elle veya ayakla sıkılabilen lastik bir top üzerinde devam etmiştir. Dumanlar iğne ucunda tutuşmuş ve bu iğneyi ısıtmaya devam etmiştir. Sonraki yıllarda ahşabı yakan kalem elektrikli hale geldiğinde pirografi işlemi çok daha verimli ve basit hale gelmiştir. Sanatçı artık odun yakma yerine, çalışmak için sıcaklık kontrollü bir alete sahip olmuştur. Bugün temelde aynı tür aracı kullanıyoruz. Pirografi zanaatı, Amerika Birleşik Devletleri’nde 1880’lerden 1920’lere kadar bir popülerite artışı yaşamıştır.

Pirografi için kullanılan malzemeler organikdir. Bunlar, deri, kemik, mantar, tahta gibi malzemelerdir. Deri üzerine pirografi, deri eşya endüstrisinde kullanıldığı gibi, hayvancılık endüstrisinde hayvanların işaretlenmesi için de kullanılmaktadır. Kemik üzerine pirografi kuyumculuk sektöründe kullanılmaktadır. Bu tip pirografi günümüzde giderek daha az kullanılmaktadır. Çünkü takı tasarımındaki trend mümkün olduğunca ışıltıya sahip olmaktadır. Pirografi, nesnelere ayrıcalık katan bir sanattır. Mantar üzerindeki pirografi, alkollü içecek endüstrisinde, özellikle şarap şişelerinin tıplarını işaretlemek için kullanılır. Bu yöntemi kullanmanın ana avantajı, ıslak koşullarda işaretlemenin silinmemesidir (Petru ve Lunguleasa, 2014).

Ahşap elde edilmesi zor ve pahalı olmasına rağmen, ahşap ürünlere olan talep artmaktadır. Ahşap eserlerin estetik değerini artırmak için lazer teknolojisi kullanılmaktadır. Pirografi için çizim hazırlığı, sanatçılar için zorlu bir iştir. Genellikle lazer teknolojisinde dönüştürülmemiş siyah bir görüntü ve doğal ahşap rengi olmak üzere yalnızca iki renk içerir. Dönüştürülen bir görüntü kullanıldığında, doğal ahşap ve siyah arasında yaklaşık 10 nüans içerebilir. Çünkü model, yalnızca iki renk ve bunların ton değerleri ile sade bir görüntü aracılığıyla sanatsal bir duyguyu temsil etmelidir. Klasik pirografi durumunda, gölgeler cihaz ucunun ısı sıcaklığı değiştirilerek yapılır. Malzemenin değişen ısı sıcaklığı çeşitli şekillerde yapılır. Alet ucu sıcaklığının değiştirilmesi, çalışma hızının değiştirilmesi veya diğer çalışma parametrelerinin değiştirilmesi ile değişik renk tonları elde edilir. Bazen bu parametrelerin yönetimi zordur. Ahşap anatomik olarak karmaşık bir malzeme olduğu için aynı çalışma parametreleri ile aynı rengi elde etmek zordur. Bunun için farklı çalışma parametrelerinde elde edilen renk şablonları kullanılmaktadır. Ahşap heterojen bir malzeme olduğundan, her bir eser için bu şablonların kullanılması tavsiye edilmektedir (Petru, 2015). Bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, fotogerçekçi olmayan işleme (NPR), son yıllarda bilgisayar grafikleri araştırmalarında sıcak noktalardan biri haline gelmiştir. Bu alana giderek daha fazla önem verilmiştir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında NPR, sanatçının çizim stiline yeniden üretilmesini vurgular. Pirografinin kendine has özellikleri vardır. Taşıyıcı yüzeyinde 3D kabartma efektleri oluşturulabilir. Renk koyu, açık kahverengi ve hatta siyahtır. Oyma işi zaman alıcıdır, tamamen elle yapılır ve karmaşık bir tasarımın her çizgisi ayrı ayrı çizilir. Pirografinin özelliklerine dayanarak, bilgisayarla çoğaltarak farklı pirografiler denenebilir. Bilgisayar destekli Pirografiler, dekoratif grafik tasarım, e-kart, reklam ve oyun, animasyon ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılabilir (Wang vd., 2010). Lazer yakma teknolojisi, enerjisi belirli bir dalga boyu için şeffaf olmayan bir malzeme üzerindeki çarpma noktasını ısıtan odaklanmış bir ışık ışınının kontrollü olarak üretilmesinden oluşur. Lazer yakma, malzemenin üst yüzeyden minimum derinliğe kadar çıkarılmasıdır. Lazer markalamadan farklı olan lazer yakma, bir nesneyi yakmak için lazer kullanma yöntemidir. Öte yandan lazer markalama, yüzeyi parçalamadan sadece yüzeyin rengini değiştirir. Ahşap Lazer işaretleyici/oyma makinesi,

adından da anlaşılacağı gibi, ahşap bir parça üzerine desenler veya kaligrafi yazıları yakmak için kullanılır. Makinenin prensibi, bir lazer modülü kullanarak malzemeyi aşındırmaktır. Lazerin geldiği yüzey parçalanarak bilgisayara girilen desenin kazınması sağlanır. Lazer yakma makinesi, çeşitli bilişim tabanlı donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşur. Lazer yakma makinesinin çalışma modeli, minimum eğitimle ticari olarak kullanılabilir. Bu makine lazer markalamanın yanı sıra lazer gravür için de kullanılabilir (Sawant vd., 2022).

Literatürde, pirografi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiştir. Lazer yakma sistemleri için ulaşılabilir renk tonlarının sayısını artıran gerekli veriler ve yöntemler incelenmiştir. Lazer yakma ve lazer karbonizasyon arasında uygun şekilde geçiş yaparak, bir ahşap yüzeyde daha fazla renk tonunu üretilebilirliği açıklanmıştır (Jurek ve Wagnerova, 2021). Pirografiye uygun malzemeler, pirografi aparatı ve çalışma kafaları olmak üzere üç kısımda olmak üzere ahşap pirografi imkânları araştırılmıştır. Ayrıca yakma yöntemlerinin ve ağaç işleme araçlarının bir sentezi yapılmış, her bir malzeme, araç ve kafa işi için avantajları ve dezavantajları sunulmuştur (Petru ve Lunguleasa, 2014). Lazer makinesi için hazırlanan orijinal görüntüye en yakın renk nüanslarına sahip görüntü dönüştürme yöntemi bulunmaya çalışılmış ve çok sayıda renk nüansına sahip yanmış bir görüntü elde etme yöntemleri önerilmiştir. Araştırılan parametre, farklı görüntü dönüştürme yöntemleri kullanılarak lazer teknolojisiyle renk üretimi yapılmış ve görüntü reproduksiyonundaki değişiklikler hem genel olarak hem de her bir renk için analiz edilmiştir (Petru, 2015). Pencere camından süzülen doğrudan güneş radyasyonuna maruz kalma sırasında pirografi sanatının uzun ömürlülüğü için herhangi bir fayda sağlayıp sağlamadıklarını görmek için iki basit yüzey kaplamasının uygulanması araştırılmıştır (Millis, 2017). Pirografi için sayısal görüntüye dayalı simülasyon denemeleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, renk aktarım algoritmasının yüksek hassasiyet, güçlü evrensellik ve daha hızlı hesaplama hızı gibi bazı avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. İlk adım görüntüler arasındaki renk transferi, ikinci adım ise görüntü birleştirme ile pirografi tarzı tablolar çoğaltılmaya çalışılmıştır (Wang vd., 2010). Doğal ışığa maruz kaldığında üç farklı ahşap türüne uygulanan pirografi sanatının renk değişimi incelenmiştir. Numuneler, açıktan karanlığa farklı tonlar üretmek için bir sıcaklık aralığında kontrollü bir şekilde yakılmıştır. Farklı türler ve farklı sıcaklıklara maruz ahşaplar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Pirografinin, karamelleşme ve Maillard reaksiyonlarında birleşen, ağaç bileşenlerinin ısıl bozunması yoluyla oluşan, göç eden ekstraktif maddeler ile renkli reaksiyon ürünleri arasında geliştirilen birkaç işlemin sonucu olduğu açıklanmıştır. Farklı ağaç türüne odaklanan çalışmada, doğal ışığa maruz kalma sırasındaki pirografi örneklerini inceleyerek fotokimyasal sorunları pratik açıdan belirlenmiştir (Millis, 2013).

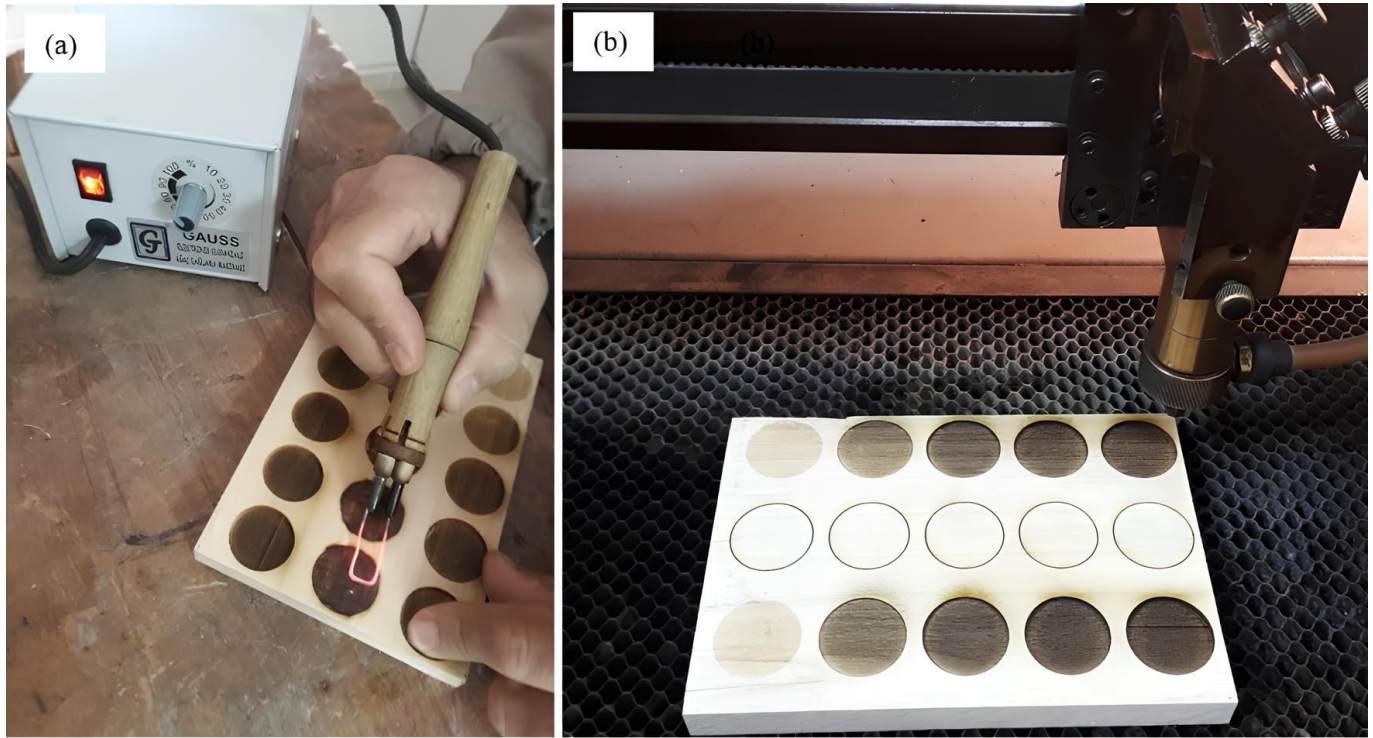
Ahşap yüzeylerinin işlenmesi ve süslenmesi eski çağlardan beri çeşitli mekanik tekniklerle yapılmıştır. Ancak son yıllarda lazer ve CNC teknolojinin gelişmesi ile bu teknikler yerini bilgisayar destekli sistemlere bırakmışlardır. Bu tekniklerden birisi de ahşap yüzeylerinin lazer ışınlarıyla yakılarak renklendirilmesidir. CNC Lazerle masif ahşap, kontrplak, lif levha yüzeylerine oyma işlemi yapılabilir. Lazer oyma işlemi, prensip olarak lazer kesmenin bir kesimdeki çentik genişliğinin aralıksız olarak devam ettirilmesidir. Yani mekanik kesimdeki CNC takım bıçağının oyma genişliğinde işlemin aralıksız devam ettirilerek talaş malzemenin kaldırılması gibidir. Ancak lazer oyma işlemi, oyma derinliği az ve sadece dikey doğrultudaki oymalar için verimlidir. CO₂ lazerler hemen hemen her organik malzemeyi kalıcı olarak markalamak için kullanılabilir. 10.6 µm'lik kızılötesi dalga boyu, ahşap yüzeyini yakar ve genellikle koyu bir kontrast oluşturur, boyalı yüzeyleri ve fotografik emülsiyonları markalar, etkili bir şekilde rengini değiştirebilir. Ahşap malzemelerin lazer ile markalanması, ilgili malzemenin yüzeyden uzaklaştırılması, koyu bir lazer markalamanın oluşan oyuk ve oluşturduğu gölge ile elde edilmesidir. Bu durumda malzemenin kendisi hafif bir karbonizasyona uğramaktadır (Açık, 2022).

Lazerle ahşap yüzey işlemede en önemli konulardan birisi, lazer ışınlarına karşı ahşap yüzeylerinin tepkime metodolojisini açıklayabilmektir. Ahşap yüzeyler üzerine lazer yakma genellikle mobilya veya ahşap ürünün ticari ve estetik değerini arttırmak amacıyla yapılmaktadır. Türkiye’de bu sanatların günden güne yok olmaması için çeşitli kurslar açılarak gençlere bu sanatın öğretilmesi ve sürdürülebilmesinin önemli olduğu, ayrıca ormanlık alanın bol olduğu bölgelerde bu sanatın öğretilerek insanlara bir geçim kaynağı olması ve bölgedeki işsizliği önlemesine katkı sağlayacağı, üretilen ürünlere hediyelik ve turistik eşya özellikleri katılarak turizme ve ülke ekonomisine katkı sağlayacağı vurgulanmıştır (Yanar vd., 2011). Ahşabın yapısı diğer mühendislik malzemelerine göre daha kompleks bir karaktere sahiptir. İstenilen pirografik görüntüyü elde etmek için çeşitli akademik çalışmaların yapılması kaçınılmazdır. Bu konuda yukarıdaki literatür incelemelerinde de görüldüğü gibi ulusal düzeyde bir akademik çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu çalışmada geleneksel pirografi tekniği ile CNC lazer tekniğinin avantajları, dezavantajları ve birbirine dönüştürülebilirliği belirlenmeye çalışılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada %12 rutubet düzeyindeki hava kurusu halde yoğunluğu 398 kg/m^3 olan kavak ağacı kullanılmıştır. Örnekler, tesadüfî seçilen 1. sınıf ağaç malzemenen, düzgün lifli, budaksız, çatlaksız, renk ve yoğunluk farkı olmayan ve diri odun kısımlarından hazırlanmıştır. $20 \times 75 \times 150 \text{ mm}$ ölçülerinde deney örnekleri kesilerek, 120 kum zımpara ile perdah işlemleri yapılmıştır. Çalışmada lazerle pirografi için AYKA marka, 130 watt güç çıkışlı, karbondioksit gazlı, su soğutmalı, 1,5 mm nozul çaplı, $10,6 \mu\text{m}$ dalga boyunda karbondioksit gazlı tüpü bulunan CNC lazer işleme makinesi kullanılmıştır. Ahşap örneklerine CNC lazer makinesinde, makine işlem fonksiyonlarındaki sınırlılıklar da dikkate alınarak, %10, %25, %40, %55 ve %70 oranında lazer gücü ve 300 mm/s sabit yakma hızı uygulanmıştır. Nozul yüksekliği 5 mm sabit tutulmuştur. Burada cihaz yakma hızı kapasitesi en yüksek 500 mm/s olduğundan optimum çalışma koşullarına göre sabit tutulmuştur. Ayrıca cihazda kullanılan odaklama merceğinin (2 inç) optimum verimli olabileceği mesafede nozul yüksekliği sabit tutulmuştur.

Geleneksel pirografi için GAUSS marka 50 watt gücünde sıcaklığı ayarlanabilen ahşap yakma (transformatör) makinesi kullanılmıştır. Çalışmada ahşap örneklerine yakma makinesinde, makine işlem fonksiyonlarındaki sınırlılıklar da dikkate alınarak, %70, %75, %80, %85 ve %90 oranında elektrik gücü uygulanmıştır. Her iki yöntem arasında yapılan karşılaştırmanın güvenli olabilmesi için, iki yöntemde de liflere paralel yönde işlemler yapılmıştır. Geleneksel pirografide yakma hızı el yordamıyla olarak sabit tutulmaya çalışılmıştır. Aşağıda Şekil 1.a' da geleneksel pirografi deney örneği hazırlanma aşaması, Şekil 1.b' de lazer pirografi deney örneği hazırlanma aşaması görülmektedir.



Şekil 1. (a) Geleneksel Pirografi Deney Örneği, (b) Lazer Pirografi Deney Örneği

Renk ölçümleri için ASTM D 2244'de belirtilen esaslara göre 1976 yılında Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından CIELAB renk aralığı tanımlanmıştır. Bu sistemde renk, x, y ve z ekseninde 3 boyut içinde bir nokta olarak temsil edilmektedir. CIE $L^*a^*b^*$ renk sisteminde, renklerdeki farklılıklar ve bunların yerleri L^* , a^* , b^* renk koordinatlarına göre tespit edilmektedir. Burada, L^* siyah-beyaz (siyah için $L^*=0$, beyaz için $L^*=100$) ekseninde, a^* kırmızı-yeşil (pozitif değeri kırmızı, negatif değeri yeşil) ekseninde, b^* ise sarı-mavi (pozitif değeri sarı, negatif değeri mavi) ekseninde yer almaktadır. Ahşap yüzeyindeki yanmalar sonucu oluşan renk farklılıklarında çok hassas olmayan çalışmalarda literatürde genellikle L^* değerleri esas alındığından, bu çalışmada L^* değerleri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır (Millis, 2014). Deneyde kullanılan renk ölçüm cihazı, bir ışık kaynağı ve paralel veya birbirine yaklaşan ışık demetini deney alanına yönelten mercekle sistem, fotosel ve yansıyan ışık konisini alan alıcıdan meydana gelmiştir. Geleneksel yakma ve lazer işleme üst yüzey işlemleri ahşap yüzeylerindeki renk değişimlerine etkisinin araştırılmasına ilişkin renk farklılığı değerleri, regresyon analizi uygulanarak her parametrede 5 adet örnek kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, SPSS istatistik

programı 22. versiyonu kullanılarak %95 güven düzeyi esas alınarak matematiksel modelleme oluşturulmuştur. Yakma gücü bağımsız değişkenleri ile renk farklılığı bağımlı değişkeninin birbiriyle etkileşimi analiz edilmiştir. Matematiksel modelleme aşağıda (1)'deki regresyon denkleminde göre hesaplanmıştır.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X \quad (1)$$

Burada;

\hat{Y} :Bağımlı değişken (Renk değeri),

β_0 :Sabit beta değeri,

β_1 :Bağımsız değişken (yakma gücü) beta değeridir.

CNC lazer makinesi CAD (Computer Aided Design) programı ve CAD'de yapılmış çizimleri makine kodlarına dönüştüren CAM (Computer Aided Manufacturing) programlarının yüklü olduğu bir bilgisayar donanımı ile çalışır. Bu çalışmada Manuel ve CNC lazerle ahşap yüzey süsleme işleminin regresyon modelleme yöntemiyle karşılaştırılabilirliğini belirlemek amacıyla bir vaka çalışması yapılmıştır. Ahşap kutu yüzeylerini oluşturan süsleme motifi yapılacak yakma yolları bir CAD programında çizilmiştir. Motif CNC lazer makinesinin yazılımındaki CAM programına vektörel olarak taşınmıştır. Motif tasarımı, kutuya göre ölçülendirilmiş üretim parametre değerleri belirlenerek üretim tasarımı tamamlanmıştır. Deneyde kullanılan kavak masifinden üretilen ahşap kutuya geleneksel ve CNC lazer işlemlerinin, tasarım ve üretim süreci işlem basamakları bulgular kısmında açıklanmıştır.

BULGULAR

Çalışmada 50 watt gücünde geleneksel (Manuel) ahşap yakma makinesinde %70, %75, %80, %85 ve %90 elektrik gücünde kavak ahşap yüzeylerine yakma işlemleri yapılmıştır. Ayrıca çıkış gücü 130 watt'lık lazerle %10, %25, %40, %55 ve %70 oranında lazer gücünde 300 mm/s sabit yakma hızında lazer işlemi yapılmıştır. İşlem yapılmamış ve işlem yapılmış yüzey renk farklarına ilişkin ölçümler yapılmıştır. Ortalama değerler Tablo 1'de verilmiştir.

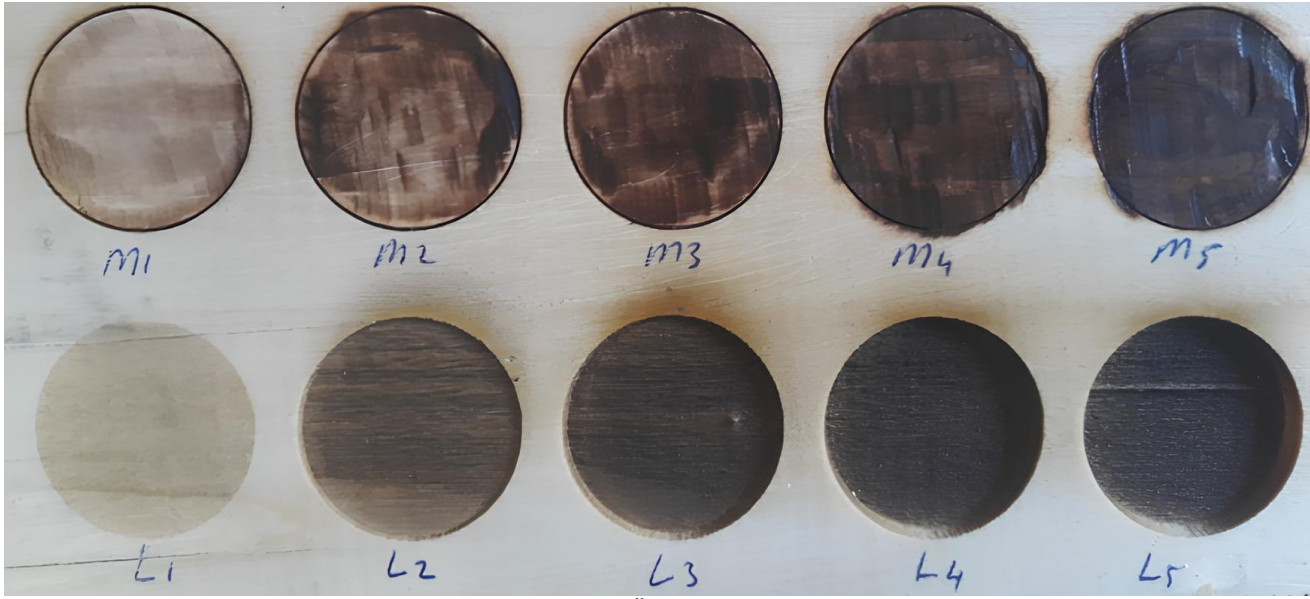
Tablo 1. İşlenmemiş ve İşlenmiş Yüzeylerin Renk Farklarına İlişkin Ortalama L* Değerleri

Geleneksel pirografi			Lazer pirografi		
Güç (%)	Etki gücü (watt)	L*	Güç (%)	Etki gücü (watt)	L*
0	0	77,01	0	0	77,01
70	35	72,20	10	13	68,44
75	37,5	50,29	25	32,5	47,50
80	40	43,12	40	52	37,50
85	42,5	40,56	55	71,5	34,59
90	45	35,00	70	91	33,43

Hem geleneksel pirografide hem de lazer pirografide yakma gücünün artması yakma yüzeylerindeki L* (beyazlık) değerlerini düşürmüştür. Bunu nedeni güç artımı sonucu yakma yüzeylerindeki karbonlaşmanın fazla olmasıdır. 5 farklı orandaki yakma sonucu geleneksel ve lazerle pirografi görüntüsü aşağıda Şekil 2'de görülmektedir. Şekil görsel olarak değerlendirildiğinde lazer pirografinin geleneksel pirografiye göre daha homojen ve mat bir görüntüye sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak geleneksel pirografideki heterojen yakma yüzeyinin el işçiliğindeki hassasiyete göre değişebileceği değerlendirilmektedir. Lazer pirografide az da olsa yakma yüzeylerindeki heterojen bir görüntü oluşmasının nedeninin ahşabın anatomik yapısındaki ilkbahar ve yaz odunu farklılıklarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu neden, geleneksel pirografi için de geçerlidir. Yani ısıyla temas eden ahşap yaz odunu hücreleri ilkbahar odunu hücrelerine göre daha sık dokulu olduğundan daha fazla yanma ve karbonlaşma meydana gelmektedir. Başka çalışmalarda da karbonlaşmanın lignin yoğunluğu fazla olan bölgelerde daha fazla olduğu açıklanmıştır (Millis, 2013). Bunun sonucu yüzeyde renk koyulaşması olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan lazer pirografide yakma gücü arttıkça yakma yüzeyinin yakma yapılmamış yüzeye göre 2 mm 'ye kadar derinlik oluşturduğu saptanmıştır. Bu durum bazı pirografi çalışmalarında dezavantaj olabilir.

Kavak masif malzemelerin işlem görmemiş doğal halde beyazlık değerleri 77,01 olarak ölçülmüştür. Ahşap malzemelerin Manuel ve lazerle farklı yakma gücü parametrelerindeki renk koyuluk oranları da değişmiştir. Yakma

gücü bağımsız değişkenleri ile beyazlık (L^*) değeri bağımlı değişkenleri arasındaki ilişkileri açıklayan regresyon analizi aşağıda Tablo 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Geleneksel Pirografi (Üst Sıra), Lazer Pirografi (Alt Sıra)

Tablo 2. Regresyon Analiz Sonuçları

Değişkenler	Beta(β)	Kısmi Korelasyon(pr)	Önem düzeyi
Manuel Kontrol sabiti	182,829	-	0,000
Manuel yakma Gücü	-1,682	-0,918	0,000
Lazer Kontrol sabiti	66,124	-	0,000
Lazer yakma gücü	-0,543	-0,894	0,000

Yukarıda Tablo 2’deki analiz sonuçlarına göre, Manuel yakma gücü, yakma yüzeyindeki siyah-beyaz eksenindeki beyazlık (L^*) rengini olumsuz ve anlamlı olarak %84 etki büyüklüğünde ($pr^2 = 0.842$) etkilemiştir. Lazer yakma gücü ise yakma yüzeyindeki beyazlık rengini olumsuz ve anlamlı olarak %80 etki büyüklüğünde ($pr^2 = 0.0.799$) etkilemiştir. Yapılan araştırmalarda pirografi için ahşap yakma makinesinin (transformatör) lazerden daha fazla enerji tükettiği belirtilmiştir (Petru ve Lunguleasa, 2014).Yapılan regresyon analiz modelinin, %95 düzeyinde güvenilir olduğu ($p < 0.05$) belirlenmiştir. Beyazlık renk değişimi Manuel pirografide %83 ($R^2 = 0.723$) oranında, lazer pirografide ise %78 ($R^2 = 0.784$) yakma gücü değişkenleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Kavak masifinin matematiksel modelleme sonuçlarına göre Manuel ve lazer pirografi renk karşılaştırmalarını yapabilmek ve beyazlık rengini tahmin etmek için, yukarıdaki Tablo 2’deki veriler kullanılarak aşağıdaki regresyon denklemi oluşturulmuştur. Pirografi için renk dönüşümlerinde teorik modelleme yöntemlerinin güvenilir yöntemlerden olduğu açıklanmıştır (Petru, 2015).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1$$

$$L^* = 182,829 + (\text{Manuel yakma gücü} * -1,682)$$

$$L^* = 66,124 + (\text{lazer yakma gücü} * -0,543)$$

CNC (Bilgisayarlı sayısal kontrol) lazer makinesi, CAD (Computer Aided Design) programı ve CAD’de yapılmış çizimleri makine kodlarına dönüştüren CAM (Computer Aided Manufacturing) programlarının yüklü olduğu bir bilgisayar donanımı ile çalışır. Bu çalışmada Manuel ve CNC lazerle ahşap yüzey süsleme işleminin regresyon modelleme yöntemiyle karşılaştırılabilirliğini belirlemek amacıyla bir vaka çalışması yapılmıştır. Deneyde kullanılan kavak masifinden üretilen ahşap kutuya Manuel ve CNC lazer işlemlerinin, tasarım ve üretim süreci işlem basamakları aşağıda açıklanmıştır.

Ahşap kutu yüzeylerini oluşturan süsleme motifi yapılacak yakma yolları bir CAD programında çizilmiştir. Motif CNC lazer makinesinin yazılımındaki CAM programına vektörel olarak taşınmıştır. Motif tasarımı, kutuya göre ölçülendirilmiş üretim parametre değerleri belirlenerek üretim tasarımı tamamlanmıştır. Motif tasarımında yukarıdaki regresyon analizinde beyaz renk (L^*) değerleri üzerinden hesaplama yapılmıştır. Kutu yüzeyindeki

motif için birbirine kontras oluşturacak üç kademeli renk elde edilmesi hedeflenmiştir. Kavak masifinin işlem görmemiş doğal halde siyah beyaz eksenindeki beyaz değeri (L^*) 77,01 olarak ölçülmüştür. Bu değer siyah yönündeki değişimi Tablo 1'de de görüldüğü gibi, deney çalışma sınırları içerisinde en düşük beyazlık değeri (33,43) %70 lazer yakma gücü parametresinde sağlanmıştır. En yüksek beyazlık değeri (72,20) ise Manuel %70 yakma gücü parametresinde elde edilmiştir. Hedeflenen üç beyazlık renk değeri, deney bulgularındaki maksimum ve minimum değerler arasındaki dağılıma göre 40, 50 ve 60 olarak belirlenmiştir. Lazer yakma hızı deney şartlarındaki gibi 300 mm/s 'de sabit tutulmuştur. Kutu yüzeyine uygulanacak 3 farklı Manuel ve 3 farklı lazer güç parametresi yukarıdaki bulgulardan elde edilen Beyazlık (L^*) yakma tonu regresyon formülünden aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Manuel değerler için;

$$L^*_1/L^*_2/L^*_3 = 182,829 + (\text{Manuel yakma gücü} * -1,682)$$

$$40/50/60 = 182,829 + (\text{Manuel yakma gücü} * -1,682)$$

$$(\text{Manuel yakma gücü} * -1,682) = 182,829 - (40/50/60)$$

$$(\text{Manuel yakma gücü}) = (142,829/132,829/122,829) / 1,682$$

$$L^*_1/L^*_2/L^*_3 = 84,9/78,9/73,02 \text{ olarak belirlenmiştir.}$$

Lazer değerler için;

$$L^*_1/L^*_2/L^*_3 = 66,124 + (\text{lazer yakma gücü} * -0,543)$$

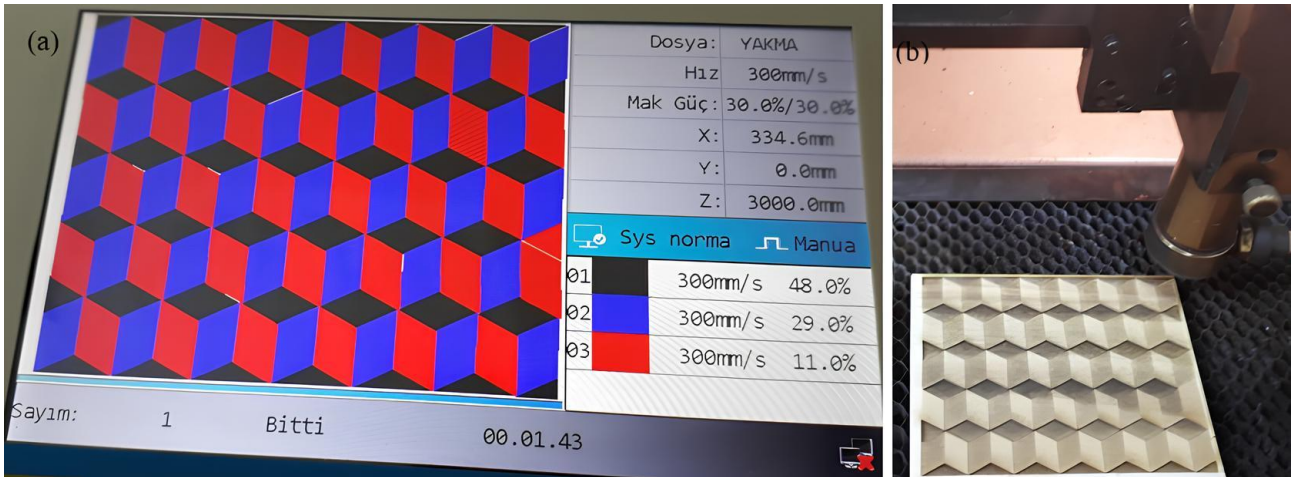
$$40/50/60 = 66,124 + (\text{lazer yakma gücü} * -0,543)$$

$$(\text{lazer yakma gücü} * -0,543) = 66,124 - (40/50/60)$$

$$(\text{lazer yakma gücü}) = (26,124/16,124/6,124) / 0,543$$

$$L^*_1/L^*_2/L^*_3 = 48,1/29,3/11,2 \text{ olarak belirlenmiştir.}$$

300 mm/s yakma hızında beyazlık değeri 30,40 ve 50 öngörülen yakma işlemlerini yapabilmek için gerekli Manuel yakma güç oranları % 84,9, %78,9 ve %73 olarak belirlenmiştir. Lazer yakma güç oranları ise % 48,1, %29 ve %11,2 olarak belirlenmiştir. Elde edilen parametrelerle tasarlanan CAM tasarımı tamamlanarak üretim aşamasına geçilmiştir. Şekil 3.a'da lazer pirografi CAM programındaki üretime hazır hali ve Şekil 3.b'de işlenmiş yüzey gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) CNC Lazerle Ürün İmalat Tasarımı, (b) CAM Üretim Sonuçları

Aşağıda Şekil 4.a'da geleneksel pirografinin beyazlık değerlerini ($L^*_1/L^*_2/L^*_3$) elde etmek için belirlenen % 84,9, %78,9 ve %73 watt güç oranlarında ahşap yakma makinesinde işlenen motifin yakma aşaması verilmiştir. Şekil 4.b'de üretimi tamamlanmış geleneksel ve lazer ahşap kutunun perspektifi gösterilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada geleneksel bir ahşap yüzey süsleme sanatı olan pirografi tekniğinin CNC lazer teknolojisi ile uygulanabilirliği, karşılaştırılması, avantajları ve sınırlılıkları açıklanmaya çalışılmıştır. Geleneksel pirografi tekniğinin, lazer pirografiyeye göre hazırlık aşaması tekil üretimler için daha avantajlı olabilmektedir. Çünkü geleneksel pirografide işlenecek motif, ahşap üzerine amatör yetenekle manuel markalama yöntemi ile yapılmaktadır. Lazer pirografide ise işlenecek objenin önce CAM sistemine vektörel bir karakter olarak aktarılması gerekmektedir.



Şekil 4. (a) Geleneksel Pirografi İşleme Aşaması, (b) Mamül Geleneksel ve Lazer Pirografi Ahşap Kutular

Bu durum hem kalifiye yeterlilik gerektirmekte hem de manuel markalamaya göre fazla zaman almaktadır. Ancak seri üretimlerde Bilgisayar destekli tasarımlar zaman açısından büyük bir avantajdır. Geleneksel pirografi aynı obje içerisinde farklı renk tonlarında daha bağımsız çalışmaya izin verirken, lazer pirografide her objenin içerisi sabit bir tonla renklendirilebilmektedir. Bu durum lazer pirografide geometrik motiflerde avantaj olabilirken, bitki, insan figürü vb. uygulamalarda dezavantaj oluşturabilmektedir. Lazerle pirografide motif tasarımı ve üretim parametre süreci iyi yönetilemez ise, daha koyu renkler elde edilmek istenirken yakma gücü artımından kaynaklanan oyma derinliğinden dolayı yüzeylerde katman farklılıkları dezavantaj olabilir. Ancak iyi bir tasarımda bu katman farkları yüzeye efekt bir görüntüyle daha zengin bir estetik katabilir. Genel olarak geleneksel pirografide daha heterojen ve karbonlaşmış yüzeyler, lazer pirografide ise daha homojen ve doğal ahşap rengine meyilli yüzeyler elde edilmektedir. Öte yandan hem geleneksel pirografide, hem de lazer pirografide matematiksel modelleme yönteminin uygulanabilir olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu iki yöntemin sayısal modellemeyle yaklaşık %4 (pr^2 farkı) oranında bir sapmayla birbirine dönüştürülebilir olduğu sonucuna varılmıştır. İleriki çalışmalarda bu çalışmadaki bulgular referans alınarak, lazer pirografi tekniğinin geleneksel pirografiye göre ahşap türü veya lazer tipine göre uygulanabilirliği, maliyet, zaman vb. verimlilik yönünden karşılaştırılmaları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Açık, C. (2022). Endüstriyel ahşap ürün tasarımında CNC lazerle üretim parametrelerinin araştırılması ve uygulanması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi. 250s. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tarama.jsp>
- Jurek, M., & Wagnerova, R., (2022) Laser beam calibration for wood surface colour treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79, 1097–1107. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01704-3>
- Kalaycı, Ü. (2014). Ahşap yakma (pirografi) sanatı ve bir usta. *Bizim Ahıska Dergisi*. 34, 19 http://ahıska.org.tr/wp_pdf/sayi34/34_10.pdf
- Millis, S., (2013). Understanding pyrography, the photochemistry of “scorched” decoration. *Proligno*, 9, 684-694.
- Millis, S., (2017). In search of a suitable coating for pyrography. *Proligno*, 13, 404-413.
- Petru, A. (2015). Image Conversion for laser pyrography. *Proligno*, 11. 646-653.
- Petru, A., & Unguleasa, A. (2014). The pyrography, from solar radiation to laser radiation. *Advances in Production, Automation and Transportation Systems*. 206-209.
- Sawant, A., Lonkar, S., & Srivastava, H. (2022). Wood laser marker/engraver. *International Journal of Scientific Research*. Volume - 11 | p.75-76. DOI: 10.36106/ijsr
- Wang, D., Jiang, J., & Zhou, S., (2010). Image Based simulation for pyrography style painting. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*. 4:1, 106-111.
- Yanar, A., Kayabaşı, N. & Er, B. (2011). Ordu ilinde üretilen ahşap ürünler ve motif özellikleri. *Art-e Sanat Dergisi*, 4 (8), DOI:10.21602/sgsfds.64349



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.05.2023
Kabul Tarihi : 06.07.2023

Received Date : 15.05.2023
Accepted Date : 06.07.2023

JELATİN ÇÖZELTİLERİNİN FARKLI SICAKLIKLARDA KURUTULMASI; KİNETİK, TERMODİNAMİK ve FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

DRYING OF GELATIN SOLUTIONS AT DIFFERENT TEMPERATURES; EVALUATION OF KINETIC, THERMODYNAMIC AND FUNCTIONAL PROPERTIES

Ümran CANSU^{1*} (ORCID: 0000-0002-0504-8308)
Erdal YILDIRIM² (ORCID: 0000-0002-9309-2420)

¹Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye
²Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ümran CANSU, umrancansu@harran.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, alternatif kaynaklar arasında gösterilen tavuk derisinden elde edilen jelatin çözeltilerinin kurutma sıcaklığına bağlı olarak değişen fizikokimyasal özellikleri ile kurutma kinetiği ve termodinamiği araştırılmıştır. Kurutmanın matematiksel modellenmesi ve termodinamik davranışların tespiti için 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda jelatin çözeltilerinin kuruma miktarı takip edilmiştir. Aynı zamanda üç farklı sıcaklıkta kurutularak elde edilen toz jelatinin fizikokimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki kurutmaya ait deneysel verileri en iyi açıklayan matematiksel modelin Midilli ve Küçük modeli olduğu tespit edilmiştir. Kurutma sürecinin başlangıcında 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda sırasıyla 0.1386, 0.1728, 0.1848 g su/g kuru madde.dak kurutma hızları gözlenmiştir. Efektif difüzyon katsayıları (D_{eff}) ise sıcaklıkla birlikte artarak aynı sıcaklıklar için sırasıyla 1.877×10^{-7} , 2.082×10^{-7} , 2.568×10^{-7} olarak bulunmuştur. Nem difüzyonunu başlatmak için gereken aktivasyon enerjisi (E_a) ise $13.53 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Jelatin çözeltisinde sıcaklığın artmasıyla birlikte Gibbs serbest enerji (ΔG) değerleri artarken entalpi (ΔH) ve entropi (ΔS) değerleri azalmıştır. Jel gücü, 40, 50 ve 60°C'de yapılan kurutmada sırasıyla 343, 291 ve 123 g olarak ölçülmüş ve kurutma sıcaklığının jel gücünü olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, elde edilen jelatin örneklerinin viskozite değerleri sıcaklık ile azalırken su tutma kapasitesi artmıştır. Ancak jelatin örneklerinin termal stabilite değerlerinin (TGA) kurutma sıcaklığından etkilenmediği belirlenmiştir. Sonuçlar, farklı kurutma sıcaklıklarının hem jelatin tozunun kalitesi hem de çözeltisinin kinetik ve termodinamik davranışı üzerinde etkili olduğunu açıkça göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Konveksiyonel kurutma, jelatin, kinetik modelleme, termodinamik, kalite, termal özellikler.

ABSTRACT

In this study, the physicochemical properties, drying kinetics and thermodynamics of gelatin solutions obtained from chicken skin, which is indicated as an alternative source, were investigated as a function of drying temperature. The drying amount of gelatin solutions at 40, 50 and 60°C temperatures were followed for the mathematical modeling of drying and the determination of thermodynamic behavior. Meanwhile, the physicochemical properties of powdered gelatin obtained by drying at three different temperatures were compared. It has been determined that the mathematical model that best explains the experimental data of drying at different temperatures is the "Midilli-Küçük" model. At the beginning of the drying process, 0.1386, 0.1728, 0.1848 g water/g dry matter.min drying rates were observed at 40, 50 and 60°C temperatures, respectively. The effective diffusion coefficients (D_{eff}) increased with temperature and were found to be 1.877×10^{-7} , 2.082×10^{-7} , 2.568×10^{-7} , respectively, for the same temperatures. The activation energy (E_a) required to initiate moisture diffusion was found to be $13.53 \text{ kJ mol}^{-1}$. With the increase

ToCite: CANSU, Ü., & YILDIRIM, E., (2023). JELATİN ÇÖZELTİLERİNİN FARKLI SICAKLIKLARDA KURUTULMASI; KİNETİK, TERMODİNAMİK ve FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 742-752.

in temperature in the gelatin solution, Gibbs free energy (ΔG) values increased, while enthalpy (ΔH) and entropy (ΔS) values decreased. The gel strength was measured as 343 g, 291 g, and 123 g, respectively, for drying conducted at 40, 50, and 60°C. It was determined that the drying temperature had a negative impact on gel strength. Furthermore, while the viscosity values of the obtained gelatin samples decreased with temperature, the water holding capacity increased. However, it was determined that the thermal stability values (TGA) of the gelatin samples were not affected by the drying temperature. The results clearly showed that different drying temperatures had an effect on both the quality of the gelatin powder and the kinetic and thermodynamic behavior of its solution.

Keywords: Conventional drying, gelatin, kinetic modelling, thermodynamics, quality, thermal properties.

GİRİŞ

Jelatin, özellikle gıda endüstrisinde geniş bir uygulama alanına sahip çok fonksiyonlu doğal bir proteindir. Jelatinin çok yönlü oluşu ve işlevsel özellikleri, kullanılan ham madde çeşidine, ön işlem basamaklarına, kurutma yöntemlerine ve ekstraksiyon koşullarına bağlıdır (Rather vd. 2022). Asit veya alkali ön işlem, asit veya alkali konsantrasyonu, ekstraksiyon sıcaklığı, ekstraksiyon süresi, kurutma yöntemi ve sıcaklığı gibi proses koşulları jelatinin verimini, tekstürel, fizikokimyasal ve molekül yapısı ve zincir uzunluğu gibi biyolojik özelliklerini etkilemektedir (Kanwate vd. 2019). Ekstraksiyon işleminden sonra, daha iyi fonksiyonel özelliklere sahip jelatin elde etmek için uygulanacak kurutma işlemi önem arz etmektedir. Endüstriyel üretimde toz jelatin, ekstraksiyon çözeltisinin konvektif sıcak hava kullanılarak elde edilmesiyle ön plana çıkmaktadır. Genel olarak kurutma, eş zamanlı ısı ve kütle transferi nedeniyle jelatin gibi proteinlerin fizikokimyasal dönüşümlerini beraberinde getirmektedir (Dehnad vd. 2016). Kurutma işlemi sırasında, ısı, kovalent ve kovalent olmayan bağların bölünmesini tetikleyebilir ve bu da jelatinin protein yapısının değişmesine neden olabilir. Jelatinin fizikokimyasal özelliklerindeki değişiklikler esas olarak kurutma yöntemlerine ve uygulanan kurutma koşullarına bağlıdır. Bu durumda kurutulan jelatinin kalitesi ve özellikleri kurutma sıcaklığından etkilenmektedir (Kanwate vd. 2019; Dehnad vd. 2016).

Kurutma işlemi jelatin endüstrisinde varyasyonlara sahip olmakla beraber son ürünün kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Kinetik modeller varyasyonların en aza indirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede enerji ve zaman kullanımında en iyi koşullar tespit edilebilecektir. Bu sayede üretim maliyetlerinin minimize edilmesi mümkün olacaktır. Gıda alanında gerçekleştirilen kurutma kinetiği matematiksel modelleme çalışmalarında ince tabaka modelleri ön plana çıkmaktadır. Bu modeller gıda maddesi ile hava arasındaki nem transferine karşı dış direnci dikkate alır ve böylece kurutma davranışının daha iyi tahmin edilmesini sağlar. En yaygın olarak uygulanan ince tabaka modelleri yarı teorik ve ampirik modellerdir. Yarı teorik modeller, Fick'in ikinci yasasının genel seri çözümü basitleştirilerek türetilir ve bir gıda maddesinin geometrisi, difüzyon hızı ve iletkenliği ile ilgili herhangi bir varsayıma ihtiyaç duymazlar (Turan & Fıratlıgil. 2019). Literatürde farklı kurutma sıcaklıklarında gıda maddelerinin kurutulması ve deneysel nem verilerinin matematiksel modeller ile karşılaştırılmasını içeren çalışmalar mevcuttur. Kılıç & Çınar (2019) yaptıkları çalışmada farklı kurutma havası sıcaklıklarında (60, 70 ve 80°C) havuç, kabak ve patlıcanın konvektif sıcak hava kurutma özelliklerini ve kurutma kinetiğini araştırmıştır. Deneysel sonuçlar Henderson ve Pabis, Newton gibi seçilmiş ince tabaka kurutma modellerine ve iki terimli modellere uydurulmuş ve nem içeriğinin deneysel ve tahmin edilen değerleri arasında iyi uyum gözlemlenmiştir. Elma dilimleri ile gerçekleştirilen bir diğer çalışmada farklı kalınlıkların ve nem oranının kurutma kinetiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, Page, Midilli ve Henderson-Pabis modellerine uyarlanarak Henderson-Pabis modelinin elma dilimlerinin kuruma kinetiğini diğer modellere göre daha iyi açıkladığı tespit edilmiştir (Yıldız & Gökayaz, 2020). İnce tabaka halinde kurutulan (40, 50, 60 ve 70°C) fıstık çekirdeklerinin deneysel kurutma verileri matematiksel modeller ile açıklamaya çalışılmıştır. Difüzyon Yaklaşımı, İki Terim, Midilli, Page ve Thompson Modelleri, fıstık çekirdeklerinin ince tabakalar halinde kuruma kinetiğini temsil etmek için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Goneli vd. 2017).

Kurutma işlemleri ile elde edilen deneysel verilerin matematiksel modeller ile açıklanmasına ek olarak kurutmaya ait termodinamik analizler de yapılmaktadır. Termodinamik hesaplamalar ile, ısı ve kurutma ilişkileri, difüzyon katsayılarını ve aktivasyon enerjisi gibi kuruma süresince termodinamik davranışları daha anlaşılır hale getirilmesi sağlanabilmektedir. Morais vd. (2019) çalışmalarında farklı ısı koşulları altında (40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda) 'bacaba' (*Oenocarpus bacaba* Mart.) pulpu kurutulmuş ve işlemin difüzyon katsayıları, aktivasyon enerjisi ve termodinamik özellikleri hesaplanmıştır. Efektif difüzyon katsayıları, 10^{-9} m² s⁻¹ mertebesindeki büyüklüklerle artan sıcaklıkla artmıştır. Aktivasyon enerjisi 37.01 kJ mol⁻¹ olarak bulunmuş ve kurutma işlemi endergonik olarak

karakterize edilmiştir. Bir başka çalışmada ince nohut tabakalarını kurutmak için sıcak hava konvektif kurutucuda 40, 50, 60, 70 ve 80°C kurutma sıcaklıkları kullanılmıştır. Hesaplanan efektif difüzyon katsayıları kullanılarak, aktivasyon enerjisinin yanı sıra işlemin termodinamik özellikleri de belirlenmiştir. Efectif yayılım, kurutma sıcaklığına bağlı olarak 54.0×10^{-11} ile $78.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen değerlerle her modele göre değişmektedir. Entalpi ve entropi değerleri artan sıcaklıkla birlikte azalmış, Gibbs serbest enerjisi sıcaklıkla doğru orantılı olarak bulunmuştur. Kurutma işleminin spontan olmadığı sonucuna varılmıştır (Cavalcanti-Mata vd. 2020). Zencefil için yapılan çalışmada ise kurutma havasının sıcaklığı, hızı ve bağıl nem değerinin kurumaya olan etkileri kinetik olarak incelenmiştir. Farklı sıcaklıklardaki kurumaya ait difüzyon katsayıları 1.346×10^{-7} ila $2.174 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ değerleri arasında bulunarak, kurutma havası sıcaklığının, hızının ve neminin zencefil kurutmasına etki eden önemli parametreler olarak tespit edilmiştir. Deneysel veriler kuruma kinetiği modelleri ile karşılaştırılmış, %99 regresyon katsayısı (R^2) ile en uygun modelin Page modeli olduğu görülmüştür (Parlak, 2014). Patlıcan dilimlerinin kurutma özellikleri ile ilgili yapılan çalışmada sıcaklık ve ön işlemlerin kuruma süresini önemli ölçüde azalttığı ve rehidrasyon kapasitesini arttırdığını göstermiştir. Çalışmaya ait efektif difüzyon katsayı değerleri 2.28×10^{-10} ila $9.52 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ arasında bulunarak kurutma sıcaklığının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kurutma aktivasyon enerjisinin değeri $26.14\text{-}32.69 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak bulunmuştur (Doymaz & Aktaş, 2018).

Bu çalışmada, tavuk derisinden elde edilen jelatin çözeltilerinin konvektif kuruması kinetik ve termodinamik açıdan incelenmiştir. Bu amaçla konvektif sıcak hava kullanılarak 40 50 ve 60°C'lerde jelatin çözeltilerinin kuruması takip edilmiş ve elde edilen veriler ilk defa farklı kinetik modeller ile açıklanmıştır. Farklı kinetik modellere uygulanan kurumaya ait deneysel verilerin matematiksel modellere uygunluğu regresyon katsayısı, hata kareler ortalaması ve ki kare testleri ile araştırılmıştır. Jelatin çözeltilerinin kuruma esnasındaki davranışları ayrıca ısıl davranışları termodinamik açıdan da açıklanmış ve kurumaya ait aktivasyon, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerji değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca farklı sıcaklık değerlerinin jelatinin kalite ve termal özellikleri üzerindeki etkisi jel gücü, viskozite ve termal özellikler ile açıklığa kavuşturulmuştur.

MATERYAL ve METOT

Materyal

Jelatin ekstraksiyonu için kullanılan tavuk derisi yerel marketlerden temin edilmiştir. Tavuk derisinin üzerinde bulunan et parçaları uzaklaştırıldıktan sonra -18°C'de muhafaza edilmiştir.

Ön işlemler ve jelatin ekstraksiyonu

Tavuk derisi dondurarak kurutucu (Armfield, Limited-FT33) kullanılarak 18 saat boyunca kurutulduktan sonra bir kenarı 4 cm olan kare parçalar halinde kesilmiştir. Derinin yapısında bulunan yağın uzaklaştırılması için, 1/25 oranında hekzan ile muamele edilip çalkalamalı inkübatörde (Lab-Line, ABD) 5 saat bekletilmiştir. Yağ ayırma işleminden alınan derilerin üzerinde kalan fazla hekzan 50 °C ayarlanmış etüv yardımıyla uzaklaştırılmıştır (Sarbon vd. 2013).

Protein olmayan kısımların uzaklaştırılması için tavuk derileri 1/25 (g/L) oranında 0.1 M NaOH ile bir saat boyunca muamele edilmiş ve ardından kolajenin suda çözünmesini sağlamak amacıyla 1/20 (g/L) oranında 0.1 M HCl ile muamele edilmiştir. Asit ve alkali işlemleri sonrası deri örnekleri musluk suyuyla 3 defa yıkanmış ve süzümüştür (Cansu & Boran, 2022). Temizleme, alkali ve asit uygulamalarından geçen deri örneklerinden jelatin ekstraksiyonu, 55°C'de 4 saatte gerçekleştirilmiştir. Elde edilen jelatin çözeltisi vakumlu filtrasyon yardımıyla kaba filtreden geçirildikten sonra 2 mg/mL (jelatin/su) oranına gelinceye kadar rotary evaporatörde (IKA, Almanya) konsantre hale getirilmiştir (Sarbon vd. 2013).

Deneysel kurutma yöntemi

Konsantre edilen jelatin çözeltisi 35 cm çapında polipropilen tabaklara 100 mL dökülerek kurutma denemeleri yapılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki kurutma işlemi bir etüv yardımıyla (Mikrotest MKD420, Türkiye) yapılmış ve kurutma işleminin takibi için örnekler her 15 dakikada bir hassas terazide tartılmış ve veriler kaydedilmiştir.

Kinetik modeller ve kurutmanın modellenmesi

Kurutma deneyleri sırasında çözeltinin nem oranı (MR) ve kuruma hızı (DR) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

M_t belirli bir zamandaki nem içeriği (g su/ g kuru madde), M_o başlangıçtaki nem içeriği (g su/ g kuru madde), M_e denge nem içeriği (g su/ g kuru madde), M_{t+dt} t+dt zamanındaki nem içeriği (g su/ g kuru madde), t ise kuruma süresidir (saat). M_e denge nem içeriği sıfır olarak kabul edilmiştir (Özbek & Dadalı. 2007).

Kurutma sürecinde efektif difüzyon, ikinci Fick yasası kullanılarak, sabit difüzyon katsayısı, ihmal edilebilir küçülme ve sabit sıcaklık şartlarında aşağıdaki denklemle hesaplanabilir (Deshmukh vd. 2014):

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemde D_{eff} efektif difüzyon katsayısı ($m^2 s^{-1}$), L ürünün yarı dilim kalınlığıdır ve protein çözeltisi için bu değer 1.592 mm'dir. t ise kuruma süresidir (saniye). Kuruma süresine karşı ln MR grafiğinin eğimi aşağıdaki gibidir:

$$K = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (4)$$

Nem hareketinin hızını veren efektif difüzyon D_{eff} bu eşitlikten hesaplanmaktadır. Belirlenen efektif difüzyon katsayısının kuruma sıcaklığı ile ilişkisi Arrhenius eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$D_{eff} = D_o \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemde D_o ön-üstel faktörü ($m^2 s^{-1}$), E_a aktivasyon enerjisini ($J mol^{-1}$), R gaz sabitini ($8.3143 J mol^{-1} K^{-1}$), T ise kuruma sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Aktivasyon enerjisi $\ln D_{eff}$ değerine karşı $1/T$ grafiğinin eğiminden hesaplanmaktadır. Tavuk derisi jelatin çözeltilerinin farklı sıcaklıklarda kurutma kinetiği için Tablo 1'de verilen modeller kullanılmıştır.

Tablo 1. Kinetik Modeller ve Denklemleri

Kinetik model	Denklem
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Two term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Midilli-Küçük	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Logaritmik	$MR = a \exp(-kt^n) + b$

Kurutma termodinamik parametreler

Aktivasyon enerjisinin değeri, entalpi, entropi ve Gibbs serbest enerjisi gibi farklı termodinamik parametrelerin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Jelatin çözeltileri kurutmanın termodinamik özellikleri Jideani & Mpotokwana (2009) tarafından açıklanan yöntem kullanılarak eşitlik (6), (7) ve (8) yardımıyla elde edilmiştir:

$$\Delta H = E_a - RT \quad (6)$$

$$\Delta S = R \left(\ln A - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (8)$$

Eşitlik (7)'deki k_B ve h_p sırasıyla $1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$ Boltzmann sabiti ve $6.626 \times 10^{-34} Js$ Planck sabitidir.

Toz jelatinlerin fonksiyonel ve termal özellikleri

Jel Gücü ve viskozite analizi

Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş toz jelatin örneklerinin jel gücü analizi için jelatin numunelerinden %6.67'lik konsantrasyonda çözeltiler hazırlandı. Bunun için her bir örnekten 7 g alınarak üzerine 105 mL saf su ilave edilmiş ve su banyosu (Nüve, Ankara, Türkiye) kullanılarak çözdürülmüştür. Çözeltilerden 40 mL alınarak kapaklı polipropilen kaplarda jel oluşumu için 4°C'de 16-18 saat olgunlaştırıldı. Jel gücü analizi 12.7 mm çapında düz silindirik başlık ile tekstür analiz cihazı (TA-XT II, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, İngiltere) kullanılarak ölçüldü (BSI, 1975). Jelatin çözeltilerinin viskozitesi, 60°C'deki su banyosunda termal olarak dengelenmiş cam kalibreli bir kolon viskozimetresi (Cannon Fenske, State College, PA, ABD) ile ölçüldü (GMIA, 2019).

Su bağlama ve yağ tutma kapasitesi

Jelatin numunelerinin su tutma kapasitesi (STK), yağ bağlama kabiliyeti (YBK) Cho vd. (2004) tarafından rapor edilen yöntemler kullanılarak analiz edildi. Sabit tartıma getirilen 50 mL'lik falkon tüplerinin içine tartılan 1'er g jelatin örneklerinin üzerine 10 mL saf su ilave edildi ve 15 dakikada bir çalkalanarak oda sıcaklığında 1 saat bekletildi. Daha sonra 6500 rpm'de 5 dakika santrifüj edilen tüpler filtre kâğıdı üzerinde 45° eğimle yarım saat bekletilerek üst fazın ayrılması sağlandı. Tüp içinde kalan peletin ağırlığı tespit edilerek gram jelatin başına tutulan su miktarı hesaplandı. Yağ bağlama kapasitesi için yukarıdaki prosedürde su yerine bitkisel sıvı yağ kullanılmıştır.

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Farklı kurutma sıcaklıklarından elde edilen jelatin tozlarının termal davranışları, inert gaz atmosferi altında (N₂) ve 30°C'den 800°C'ye kadar 10°C/dak ısıtma hızında çalışan bir Termogravimetrik Analiz Cihazı DTG-60 H (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japonya) ile ölçülmüştür (Nuthong vd. 2009). TGA analizlerinden elde edilen sonuçların 1. türevlerinden yararlanılarak Diferansiyel Termogravimetrik (DTG) sonuçları değerlendirilmiştir.

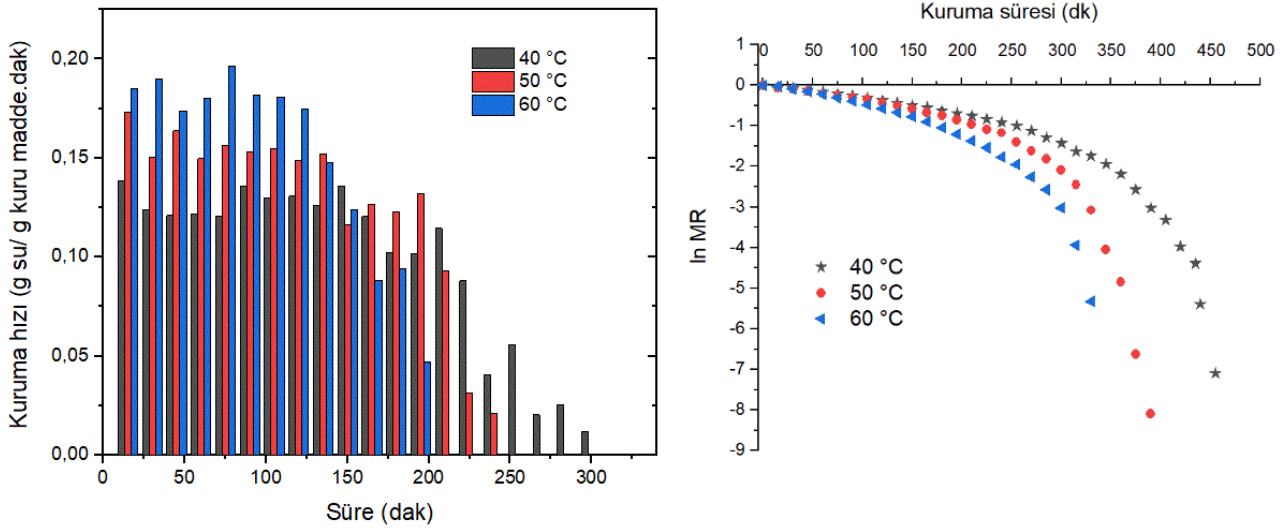
İstatistiksel analizler

Bu çalışmada yapılan tüm analizler en az 3 tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kurutma kinetiği çalışmasında elde edilen veriler ile modellere ait tahmini veriler arasındaki ilişki, SPSS (IBM, statistics 25, New York, USA) paket programının ikili regresyon yöntemi kullanılarak regresyon katsayısı (R²) belirlenmiştir. Ayrıca deneysel ve tahmini verilerin birbirine olan yakınlıkları hata kareler ortalaması (RMSE- root mean square error) ve X² (ki-kare) testleri ile tespit edilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Difüzyon katsayıları ve kuruma hızları

Efektif difüzyon katsayılarının Eşitlik (4)'de tanımlanan eğim ifadesinden hesaplanabilmesi için farklı sıcaklıklarda elde edilen deneysel sonuçların $\ln MR$ değerlerine karşılık kuruma süreleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Eşitlik (5) kullanılarak ön-üstel faktörü (Do) $3.337 \times 10^{-5} m^2 s^{-1}$ ve aktivasyon enerjisi (E_a) ise $13.53 kJ mol^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Yüksek sıcaklıklardaki kurutma sırasında kütle ve ısı transferinin artmasıyla birlikte yüksek efektif difüzyon katsayıları elde edilmiştir (Ismail vd. 2020). Jelatin çözeltilerinde kurutma sıcaklığına bağlı olarak efektif difüzyon katsayılarının artması, çeşitli gıdaların kurutulması ile ilgili yapılan kurutma denemelerinde de görülmektedir (Parlak, 2014; Doymaz & Aktaş, 2018). Jelatin çözeltilerinin 40 50 ve 60°C sabit sıcaklıklardaki tam kuruma süreleri sırasıyla 455, 390 ve 330 dak olarak gerçekleşmiştir. Kuruma süresinin yüksek sıcaklıklarda daha kısa olması efektif difüzyon katsayısının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır ki yüksek sıcaklıklarda suyun daha hızlı buharlaşmasını göstermektedir. Jelatin çözeltilerinin kuruma hızları incelendiğinde (Şekil 1) 60°C'de en yüksek kuruma hızının gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kurutma koşullarının sabit tutulduğu şartlarda, 40°C'de en düşük kuruma hızı ve buna bağlı olarak en uzun kuruma süresi tespit edilmiştir.

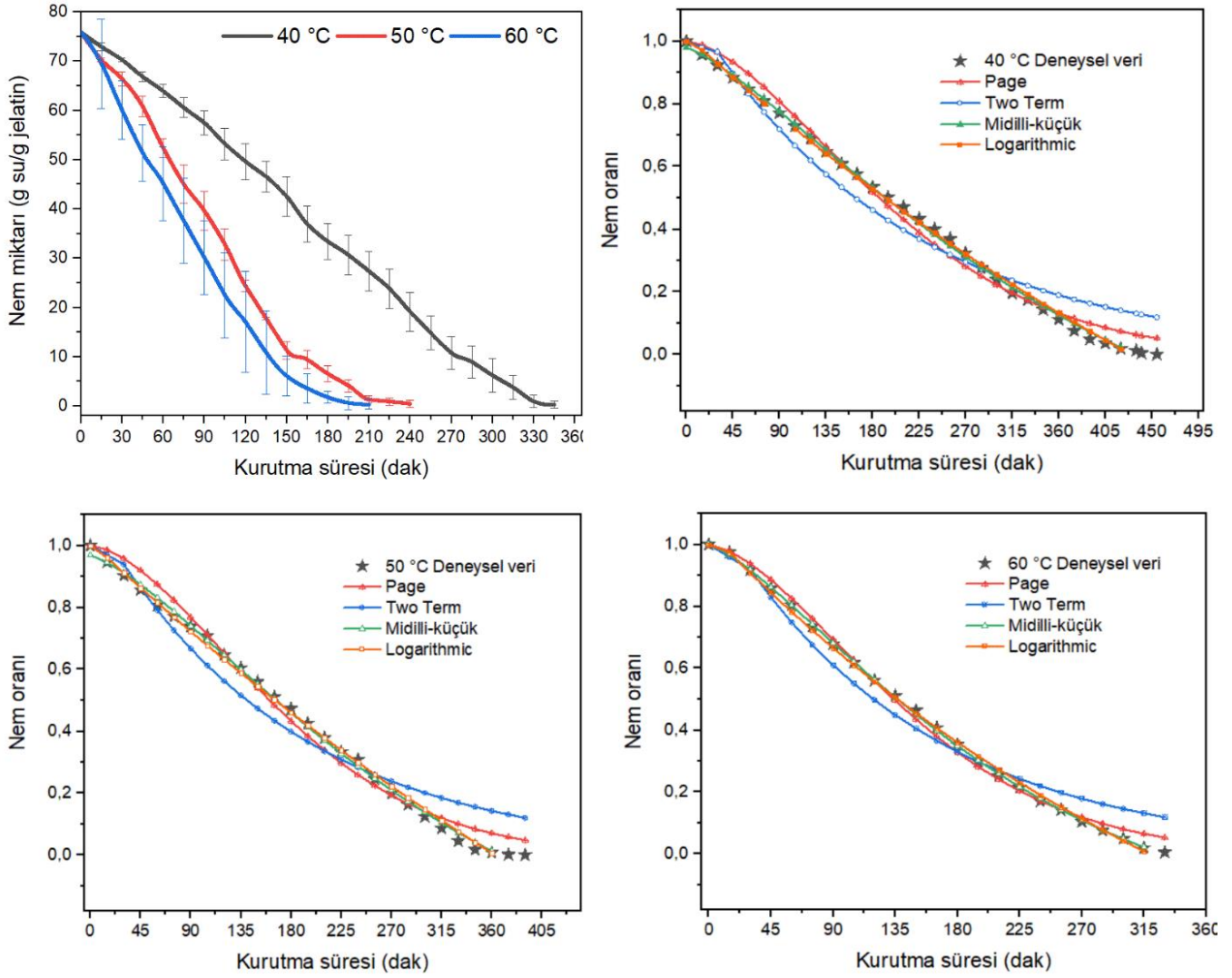


Şekil 1. Jelatin Çözeltilisinin Değişik Sıcaklıklardaki Kuruma Hızları ve Ln MR Değerlerinin Kuruma Sürelerine Karşı Eğrileri

Jelatin çözeltilerinin kuruma kinetiği ve model uyumlulukları

Şekil 2’de 40, 50 ve 60°C sıcaklıklarda jelatin çözeltileri için ortalama deneysel verilerle çizilen nem oranı eğrileri (Eşitlik 1) ve literatürde sıkça kullanılan modellerden elde edilen nem oranı eğrileri gösterilmektedir. Jelatin çözeltilerinin kurutma işlemi kütle kayıpları ve kurutma kabin sıcaklığı takip edilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda çizilen farklı sıcaklıklardaki kuruma eğrileri meyve ve sebze kurutma işlemlerindeki gibi tipik eğriler sergilemiştir. Jelatin çözeltilerinden uzaklaştırılabilecek nem oranının zamana bağlı değişimi Şekil 2’de gösterilmiştir. Jelatin çözeltilerine ait kuruma eğrileri farklı sıcaklıklarda farklı değişimler sergilemiştir. Her üç sıcaklık değeri için zamana bağlı olarak uzaklaşan nem miktarı azalma göstermiş ve bu azalma üstsel olmuştur.

Deneysel kurutma verilerinin matematiksel modellenmesi için uygulanan kinetik modeller Tablo 1’de gösterilmektedir. Jelatin çözeltilerinin farklı kurutma koşulları altında kuruma davranışını açıklamak ve tahmin etmek için seçilen modellere deneysel veriler uygulandı. Seçilen modeller için doğrusal olmayan regresyondan elde edilen model katsayıları ve uyum derecesi parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel veriler ile model uyumluluklarının tespiti için en yüksek R^2 , en düşük RMSE ve X^2 (ki-kare) kriterine göre değerlendirme yapılmıştır (Simpson vd. 2017). Modellerin istatistiksel analizinde en yüksek R^2 değerleri Midilli-Küçük ve Logaritmik modellerinde olup 0.9980 ile 0.9999 arasındadır. Bununla beraber en düşük RMSE ve X^2 (ki-kare) değerleri de aynı modellerde görülmüştür. Ayrıca En düşük RMSE ve X^2 (ki-kare) değerleri, 60°C’lik kurutma sıcaklığı için seçilen tüm modellerde gözlemlenmiştir. Bu, tüm modeller için 60°C’deki deneysel ve tahmin edilen nem oranlarının birbirini olan yakınlığını göstermektedir (Kumar vd. 2019). Nispeten daha yüksek R^2 ve daha düşük RMSE ve X^2 (ki-kare) değerleri Midilli-Küçük modelinde görüldüğünden, jelatin çözeltilerinin kurutma sürecini bütün kurutma sıcaklıkları için en iyi tanımlayan model Midilli-Küçük modeli olmuştur.



Şekil 2. Jelatin Çözeltilisinin Değişik Sıcaklıklardaki Kuruma Eğrileri ve Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Deneysel Verilerin Kinetik Modellerden Elde Edilen Tahmini Verilerle Karşılaştırılması.

Tablo 2. Farklı Sıcaklıklardaki Kurumaya İlişkin Model Verileri ve Uyumluluk İstatistikleri

Model	Sıcaklık (°C)	Katsayılar ve uyumluluk değerleri						
		n	k	R ²	RMSE	χ ²		
Page	40	1,6258	0,0001412	0,9939	0,03725	0,0015		
	50	1,6650	0,0001469	0,9928	0,04095	0,0018		
	60	1,6026	0,0002707	0,9977	0,02249	0,0006		
Two Term	40	a	b	k ₀	k ₁	R ²	RMSE	χ ²
	40	1,1621	-0,1621	0,005122	13,4948	0,9765	0,0726	0,0056
	50	1,1200	-0,1852	0,005949	0,03315	0,9814	0,0716	0,0055
60	1,1277	-0,1367	0,006825	0,05368	0,9900	0,0617	0,0042	
Midilli-Küçük	40	a	b	n	k	R ²	RMSE	χ ²
	40	0,9805	-0,00052	1,3478	0,000491	0,9991	0,0133	0,0002
	50	0,9695	-0,00060	1,4339	0,000313	0,9986	0,0167	0,0003
60	1,0002	-0,00045	1,3688	0,000693	0,9999	0,0052	0,0001	
Logaritmik	40	a	c	k	R ²	RMSE	χ ²	
	40	2,6051	-1,5885	0,001151	0,9986	0,0167	0,0003	
	50	3,1321	-2,1196	0,001075	0,9980	0,0205	0,0005	
60	1,9775	-0,9346	0,002350	0,9988	0,0156	0,0003		

Jelatin çözeltilerinin kuruma termodinamik davranışı

Jelatin çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki kurumasına ait termodinamik davranışları Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kurutma sıcaklıklarında artışla birlikte entalpi değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Düşük entalpi değerlerinin sürecin gerçekleşmesinde daha az enerjiye ihtiyaç olduğunu göstermektedir (Corrêa vd. 2017). Bununla beraber kurumaya ait entropi değerleri de entalpi değerleri gibi sıcaklık yükselmesiyle birlikte azalmaktadır. Yüksek sıcaklıkla birlikte jelatin çözeltilerinin içerisindeki su buharının kısmi basıncı artarak kurutma havasına olan difüzyonu hızlanmakta ve sonuçta entropide düşüş gerçekleşmektedir (Silva vd. 2020). Gibbs serbest enerji değerleri ise entalpi ve entropi değerlerinin aksine sıcaklığın artmasıyla birlikte artmaktadır. Tablo 3'te elde edilen Gibbs serbest enerji değerlerinin pozitif olduğu görülmekte ve kurutma işleminin spontan olmadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 3. Jelatin Çözeltilerinin Kurutma Termodinamik Parametreleri

Sıcaklık (°C)	$\Delta H(kj/mol)$	$\Delta S(kj/mol)$	$\Delta G(kj/mol)$
40	10,9277	-0,3310	114,5339
50	10,8445	-0,3313	117,8453
60	10,7614	-0,3315	121,1593

Kalite ve fonksiyonel bazı özelliklerin kurutma sıcaklığına göre değişimi

Jelatinin temel kalite özellikleri olarak tanımlanan jel gücü ve viskozite değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 40, 50 ve 60°C'deki konvektif kurutma sıcaklıklarında toz jelatinlerin jel güçleri sırasıyla, 343, 291 ve 123 g olarak tespit edilmiştir. Yüksek kurutma sıcaklığı muhtemelen jelatin zincirlerinin parçalanmasına ve daha düşük jel kabiliyetine sahip küçük moleküllere parçalanmasına neden olarak jel gücünde azalmaya neden olmuştur. Zayıf jelatin jeli, düşük molekül ağırlığına sahip protein zincirleri ile ilişkilendirilmiştir (Sae-Leaw vd. 2014). Öyle ki düşük molekül ağırlığına sahip bu zincirlerin jel oluşumunda ara bağlantı bölgelerine bağlanma yetenekleri uzun zincir yapılarına kıyasla daha düşüktür ve nihayetinde daha zayıf jel yapılarına neden olmaktadır. Dolayısıyla jel gücündeki bu azalma yüksek sıcaklık değerlerinde jelatin zincirlerinin daha fazla degradasyona uğradığını göstermektedir (Kanwate vd. 2019). Aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda oluşan düşük moleküllü jelatin zincirleri düşük viskoziteye neden olduğu belirtilmiştir (Tan vd. 2020).

Jelatinin fonksiyonel özelliklerinden olan STK ve YBK değerleri Tablo 4'te verilmiştir. 50 ve 60°C'deki sıcaklıkların jelatin moleküllerinde polar olmayan kısımların artmasına ve su bağlama kapasitesinde bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir (Ninan vd. 2014). Ancak, Cho vd. (2004) yaptığı çalışmada köpek balığı kıkırdak jelatininin sıcak havayla kurutma sırasında daha fazla hidrofobik kalıntıların açığa çıktığını öne sürmüştür.

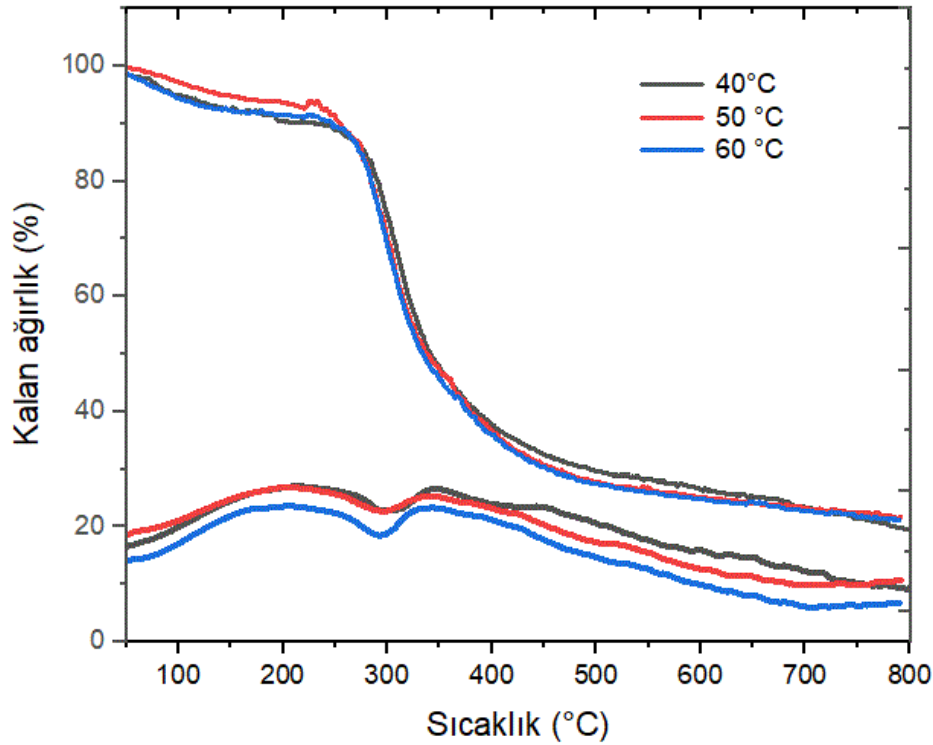
Tablo 4. Jelatinlerin Kalite ve Fonksiyonel Özelliklerinin Değişimi

Örnek	Jel gücü (g)	Viskozite (cP)	STK (g su/g jelatin)	YBK (g yağ/g jelatin)
40°C	343±3,5	4,79±0,03	14,42±0,64	2,52±0,85
50°C	291±2,4	4,28±0,13	18,62±0,14	1,19±0,05
60°C	123±1,7	2,70±0,02	18,94±0,09	1,32±0,003

Termal özelliklerin kuruma sıcaklığına göre değişimi

Farklı sıcaklıklarda kurutulan tavuk derisi jelatinlerinin termal bozunma davranışları Şekil 3'te verilmiştir. Her üç jelatin örneği için bozunma adımları benzer özellikte olduğu belirlenmiştir. Bozunma grafiğinden de anlaşılacağı üzere jelatin örneklerinin sıcaklığa karşı tepkilerinin aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum farklı sıcaklıklarda kurutulan tavuk derisi jelatinlerinin termal stabilitelerini etkilemediği sonucunu doğurmaktadır. Jelatin örnekleri temelde üç bozunma adımı sergilemiştir. Sıcaklık artışı ile oluşan ilk etki, 200°C'nin altındaki sıcaklıkta yaklaşık %10 kütle azalması olarak gerçekleşmiş ve toz örneklerin barındırdığı nem miktarından kaynaklanmıştır (Mondragon vd. 2015). En çok bozunmanın meydana geldiği ikinci aşama ise 200 ile 450°C arasında ve muhtemelen protein bileşenlerinin parçalanmasıyla oluşmuştur. Benzer şekilde yapılan jelatine ait termal çalışmalarda 200-500°C aralığında endotermik etkide maksimum bozunma gösterdiği vurgulanmıştır (Mondragon vd. 2015; Sahraee vd. 2017). DTA piklerinin yansıttığı şekliyle DTA özelliklerinin TGA sonuçlarıyla tutarlı olduğu tespit edilmiştir. DTA eğrileri, ilk aşamanın endotermik olduğunu, diğer iki aşamanın ise ekzotermik olduğunu göstermektedir. Birinci pikteki endotermiklik, enerjinin adsorbe edilmiş su moleküllerini buharlaştırmak için gerekli olduğunu gösterir.

Gözlemlenen ekzotermik bölge ise en fazla bozunmanın olduğu yani yanmaktan veya yeni kimyasal bağlar oluşturmaktan salınan enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 3. Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Jelatinlerin Termal Davranışları

SONUÇ

Kurutma işleminin daha yüksek dehidrasyon kapasitesine sahip olması ve kurutma işlemi sırasındaki gerek kalite gerekse fonksiyonel değişiklikleri en aza indirerek jelatinin özelliklerini koruması önem arz etmektedir. Mevcut çalışmada, Midilli-Küçük matematiksel modelin, jelatin çözeltilerinin deneysel olarak kurutulmasına diğer modellerden daha iyi uyum gösterdiğini tespit edilmiştir. Kurutma sıcaklığının kurutma modeli sabitleri ve istatistiksel değerler üzerindeki etkisi incelendiğinde 40°C sıcaklığın jelatin çözeltilerinin kurutulması için daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, jelatinin kalite parametreleri arasında gösterilen jel gücü ve viskozitenin en yüksek değerlerini sergilediği için daha iyi bir ürün elde etme adına jelatin çözeltilerinin 40°C ile kurutulmasının optimum olduğunu ortaya koymuştur. Ancak jelatin, gıda endüstrisinde farklı amaçlar için farklı formlarda üretildiğinden söz konusu amaca yönelik özellikleri sergilediği sıcaklık dereceleri de seçilebilir.

KAYNAKLAR

Cansu, Ü., & Boran, G. (2022). Kinetic Evaluation of Gelatin Extraction from Chicken Skin and the Effect of Some Extraction Parameters. *Journal of Food Process Engineering*, 45 (4), e13995. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13995>

Cavalcanti-Mata, M. E. R. M., Duarte, M. E. M., Lira, V. V., de Oliveira, R. F., Costa, N. L., & Oliveira, H. M. L. (2020). A New Approach to The Traditional Drying Models for The Thin-Layer Drying Kinetics of Chickpeas. *Journal of Food Process Engineering*, 43(12), e13569. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13569>

Cho, S. M., Kwak, K. S., Park, D. C., Gu, Y. S., Ji, C. I., & Jang, D. H. (2004). Processing Optimization and Functional Properties of Gelatin from Shark (*Isurus oxyrinchus*) Cartilage. *Food Hydrocolloids*, 18, 573–579. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.10.001>

- Corrêa, P. C., de Oliveira, G. H. H., de Oliveira, A. P. L. R., Botelho, F. M., & Goneli, A. L. D. (2017). Thermodynamic Properties of Drying Process and Water Absorption of Rice Grains. *CyTA-Journal of Food*, 15(2), 204-210. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1238012>
- Dehnad, D., Jafari, S. M., & Afrasiabi, M. (2016). Influence of Drying on Functional Properties of Food Biopolymers: from Traditional To Novel Dehydration Techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 116-131. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.002>
- Deshmukh, A. W., Varma, M. N., Yoo, C. K., & Wasewar, K. L. (2014). Investigation of Solar Drying of Ginger (*Zingiber Officinale*): Emprical Modelling, Drying Characteristics, and Quality Study. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2014/305823>
- Doymaz, İ. & Aktaş, C. (2018). Patlıcan Dilimlerinin Kurutma ve Rehidrasyon Karakteristiklerinin Belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (3), 833-842. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416386>
- Gelatin Manufacturers Institute of America. (2019). *GMIA Standard Methods for the Testing of Edible Gelatin*, New York, USA (pp. 13-15)
- Goneli, A. L., Araujo, W. D., Hartmann, C. P., Martins, E. A., & Oba, G. C. (2017). Drying Kinetics of Peanut Kernels in Thin Layers. *Engenharia Agrícola*, 37, 994-1003. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430> <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.040>
- Ismail, M. H., Khan, K. A., Ngadisih, N., Irie, M., Ong, S. P., Hii, C. L., & Law, C. L. (2020). Two-Step Falling Rate in The Drying Kinetics of Rice Noodle Subjected to Pre-Treatment and Temperature. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11), e14849. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14849>
- Jideani, V. A., & Mpotokwana, S. M. (2009). Modeling of Water Absorption of Botswana Bambara Varieties Using Peleg's Equation. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 182-188.
- Kanwate, B. W., Ballari, R. V., & Kudre, T. G. (2019). Influence of Spray-Drying, Freeze-Drying and Vacuum-Drying on Physicochemical and Functional Properties of Gelatin from Labeo Rohita Swim Bladder. *International journal of biological macromolecules*, 121, 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.015>
- Kılıç, E. E. & Çınar, İ. (2019). Convective Hot Airdrying Characteristics of Selected Vegetables. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 3 (1), 7-13. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/iarej/issue/44303/449564>
- Kumar, P. S., Nambi, E., Shiva, K. N., Vaganan, M. M., Ravi, I., Jeyabaskaran, K. J., & Uma, S. (2019). Thin layer drying kinetics of Banana var. Monthan (ABB): Influence of Convective Drying on Nutritional Quality, Microstructure, Thermal Properties, Color, and Sensory Characteristics. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), e13020. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13020>
- Mondragon, G., Peña-Rodriguez, C., González, A., Eceiza, A., & Arbelaz, A. (2015). Bionanocomposites Based on Gelatin Matrix and Nanocellulose. *European Polymer Journal*, 62, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.11.003>
- Morais, M. F. D., dos Santos, J. R., Santos, M. P. D., Santos, D. D. C., Costa, T. N. D., & Lima, J. B. (2019). Modeling and Thermodynamic Properties of 'Bacaba' pulp Drying. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 702-708. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p702-708>
- Ninan, G., Joseph, J., & Aliyamveetti, Z. (2014). A Comparative Study on The Physical, Chemical and Functional Properties of Carp Skin and Mammalian Gelatins. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2085-2091. DOI 10.1007/s13197-012-0681-4
- Nuthong, P., Benjakul, S., & Prodpran, T. (2009). Characterization of Porcine Plasma Protein-Based Films as Affected by Pretreatment and Cross-Linking Agents. *International Journal of Biological Macromolecules*, 44(2), 143-148. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2008.11.006>

- Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-Layer Drying Characteristics and Modelling of Mint Leaves Undergoing Microwave Treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.004>
- Parlak, N. (2014). Akışkan Yataklı Kurutucuda Zencefilin Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (2), 261-269. <https://doi.org/10.17341/gummfd.34777>
- Rather, J. A., Majid, S. D., Dar, A. H., Amin, T., Makroo, H. A., Mir, S. A., ... & Dar, B. N. (2022). Extraction of Gelatin From Poultry Byproduct: Influence of Drying Method on Structural, Thermal, Functional, and Rheological Characteristics of the Dried Gelatin Powder. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.895197>
- Sae-Leaw, T., Benjakul, S., & O'Brien, N.M. (2014). Effect of Pretreatments and Drying Methods on the Properties and Fishy Odor/Flavor of Gelatin from Seabass (*Lates calcarifer*) skin. *Drying Technology*, 34(1), 53-65. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.1003071>
- Sahraee, S., Ghanbarzadeh, B., Milani, J. M., & Hamishehkar, H. (2017). Development of Gelatin Bionanocomposite Films Containing Chitin and ZnO Nanoparticles. *Food and Bioprocess Technology*, 10(8), 1441-1453. DOI 10.1007/s11947-017-1907-2
- Sarbon, N. M., Badii, F., & Howell, N. K. (2013). Preparation and Characterization of Chicken Skin Gelatin as an Alternative to Mammalian Gelatin. *Food Hydrocolloids*, 30, 143-151. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.05.009>
- Silva, L. P., dos Santos, S. G. F., Queiroz, J. S., Rodovalho, R. S., & Buso, W. H. D. (2020). Drying Kinetics of Soybean Grains. *Científica*, 48(2), 99-106. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p99-106>
- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding The Success of Page's Model and Related Empirical Equations in Fitting Experimental Data of Diffusion Phenomena in Food Matrices. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.003>
- Tan, C.C., Karim, A.A., Uthumporn, U., Ghazali, F.C. (2020). Effect Extraction Temperature on The Emulsifying Properties of Gelatin from Black Tilapia (*Oreochromis Mossambicus*) Skin. *Food Hydrocolloids*, 108, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106024>
- Turan, O. Y., & Fıratlıgil, E. (2019). Modelling and Characteristics of Thin Layer Convective Air-drying of Thyme (*Thymus vulgaris*) Leaves. *Czech Journal of Food Sciences*, 37(2), 128-134.
- Yıldız, Z. & Gökayaz, L. (2020). Rafli Doğal Konvektif Güneş Enerjili Kurutucuda Elma Kuruma Kinetiğinin İncelenmesi. *Engineering Sciences*, 15 (1), 34-42. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/nwsaeng/issue/51947/632701>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.05.2023
Kabul Tarihi : 14.06.2023

Received Date : 18.05.2023
Accepted Date : 14.06.2023

HIZLANDIRILMIŞ VE DOĞAL YAŞLANDIRMANIN ÇAM KABUĞU VE KOZALAĞINDAN ÜRETİLEN KOMPOZİT MALZEMELERİN BAZI ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİ

EFFECTS OF ACCELERATED AND NATURAL AGING ON SOME PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS PRODUCED FROM PINE BARK AND CONES

Fatih Tuncay EFE^{1*} (ORCID: 0000-0002-7247-1288)

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Yenice MYO, Ormancılık Bölümü, Çanakkale, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatih Tuncay EFE, fatihtuncayefe@gmail.com

ÖZET

Gerek odun gerekse diğer lignoselülozik malzemeler açık havada kullanıldıklarında güneş ışınları başta olmak üzere birçok etkilere maruz kalırlar. Bu malzemelerin daha uzun süre kullanılabilmesi için bu etkilerin sonuçlarının bilinmesi gerekir. Bu çalışmada, perlit katkılı çam kabuğu ve kozalaklarından yapılan kalıplanmış kompozit malzemelerin hızlı (UV ışın altında) ve doğal yaşlandırma sonucu renk, parlaklık, kütle kaybı ile bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin malzeme içeriğindeki hammaddelerin parçacık büyüklüğü ve perlit oranıyla değişimi araştırılmıştır. Sonuçlara göre, yaşlandırma testi sonrasında toplam renk farkı değerleri için farklı renk değişimi ve yüksek renk değişimi kriterlerine rastlanılmamış; fakat yapay yaşlandırmanın L^* , a^* ve b^* parametrelerini değiştirici etkide bulunduğu tespit edilmiştir. UV yaşlandırma sonrası A grubu malzemeler hariç tüm malzemelerin basınç dayanımının ve yoğunluğunun azaldığı; toprak testi sonuçlarına göre UV öncesi kütle kayıplarının büyük farklılıklar gösterdiği ve en fazla kaybın kozalak içeren örneklerde olduğu ölçülmüştür. UV muamelesinin kütle kaybı açısından tüm örneklerde birbirine yakın etki ettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokompozit, çam kabuğu, kozalak, UV yaşlandırma

ABSTRACT

Both wood and other lignocellulosic materials are exposed to many factors, particularly sunlight, when they are used outdoors. In order for these materials to be used for a longer period, the results of these effects need to be known. In this study, the changes in color, gloss, mass loss, and some physical and mechanical properties of molded composite materials made from perlite-added pine bark and cones were investigated as a function of the particle size of the raw materials and the perlite content under rapid (under UV) and natural aging. According to the results, no different color change or high color change criteria were found for total color difference values after the aging test. Additionally, it was found that artificial aging had a changing effect on the L^* , a^* , and b^* parameters. After UV aging, except for Group A materials, the compressive strength and density of all materials decreased. Based on soil test results, significant differences were observed in mass losses before UV, and the highest loss was measured in the samples containing cones. It was determined that the effect of UV treatment on mass loss was similar for all samples.

Keywords: Biocomposite, pine bark, cone, UV aging

GİRİŞ

Doğal kaynaklar çoğunlukla yenilenebilir veya yenilenemez olarak tanımlanır. Yenilenebilir olanlar odun ve tarımsal ürünler gibi düzenli olarak yenilenebilir veya hasat edilebilen kaynaklardır ve üretim koşulları uygun olduğu sürece istenen seviyede yenilenebilir. Yenilenemeyen kaynaklar ise, fosil yakıtlar, mineraller, vb. gibi yalnızca bir kez hasat edilebilen kaynaklardır. Bunların çoğu önemli derecede sınırlıdır (Berge, 2009).

Son yıllarda enerji kaynaklarının tüketimi, hammadde ve aşırı kirlilikle ilgili endişeler artmıştır. Birçok çalışmada geri dönüşüme ve toksik olmayan malzemelere çok daha fazla vurgu yapılmaktadır (Korjenic vd., 2011; Blanchet vd., 2000). Dünyada yaşanabilir bir çevrenin önemine yönelik gittikçe artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu eğilime paralel olarak ağaç kabuğu (özellikle iğne yapraklılar), kozalak ve lignoselülozik atıklar gibi toksik olmayan, yenilenebilir, kolay, ucuz ve bol temin edilebilir, üretimi kolay doğal kaynaklara ilgi günden güne artmaktadır (Efe, 2022). Yukarıda sözü edilen doğal hammaddeler halen çoğunlukla endüstriyel olarak katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmemekte, arazide bırakıldıklarında katı atık olarak ve yakıldıklarında ortaya çıkan zehirli gazlarla çevre kirliliğine yol açmaktadırlar (Kain, 2016). Ormanlar her yıl kabuk ve kozalak gibi tonlarca atık ve yan ürün üretir. Bunlardan kabuk, mikroorganizmalara karşı dayanıklı, düşük ısı iletkenliğe sahip ve çevre dostudur (Kain, vd., 2015), diğer taraftan kozalak da yenilenebilir bir lif kaynağı olmasına rağmen etkili bir şekilde kullanılmamaktadır (Arrakhiz vd., 2013; Buyuksari vd., 2010). Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'nun 2021 istatistiklerine göre 2019'da 1.398 milyar metreküp iğne yapraklı ağaç odunu ve 2.572 milyar metreküp geniş yapraklı ağaç odunu üretildiği rapor edilmiştir (FAO, 2021). Ağacın ortalama 10% kabuk içerdiği hesaba katılırsa (Hoong vd., 2011; Xing vd., 2007), yıllık potansiyel kullanılabilir kabuk hacminin 397 milyar metreküp olduğu söylenebilir. Her yıl orman ürünleri endüstrisi faaliyetlerinden ortaya çıkan çok büyük miktarlarda kabuk ya çöpe gitmekte veya yakılmaktadır (Pásztor vd., 2016; Barbu, 2011). Diğer taraftan, dünyada her yıl ne kadar çam kozalağının ortaya çıktığı fıstık çamının ki hariç bilinmemektedir. Ancak mevcut ağaç envanteri göz önüne alındığında çok büyük miktarlarda olduğu tahmin edilebilir.

Son yıllarda kabuk esaslı yalıtım malzemeleri üzerine çalışmaların arttığı tespit edilmiştir. Bu kapsamda kızılçam (Efe, 2022), mantar (Ferreira vd., 2016; La Rosa vd., 2014), sarıçam (Tudor vd., 2020a; Kain vd., 2012), yalancı akasya (Pásztor vd., 2017), ladin (Tudor, vd., 2020b), kavak (Busquets-Ferrer vd., 2021; Tsalagkas vd., 2019), melez (Kain vd., 2018; Kain, vd., 2015; Kain vd., 2014), beyaz ladin, İsveç çamı ve huş (Holmberg vd., 2016) ve okaliptus (Wesolowski vd., 2014) üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Başka bir odun dışı orman ürünü olan çam kozalakları güçlü lifli yapısı, özgül ağırlığının fazla oluşu, odundan ve kabuktan farklı kimyasal içeriğiyle çeşitli kullanım alanları için iyi bir aday hammadde. Çam kozalaklarıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bir çalışmada yonga levha veya orta yoğunlukta lif levha (MDF) üretiminde kozalak kullanımının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirlenmiştir (Sahin ve Arslan, 2011; Buyuksari vd., 2010; Ayrılmış vd., 2009). Diğer taraftan, kozalak lifi veya ununun epoksi reçinesi (Kolář vd., 2019; Baştürk vd., 2015), polipropilen (Arrakhiz vd., 2012), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) (Guo vd., 2019), ve polikaprolakton (PCL) (Jha vd., 2018) gibi bazı matrislerdeki etkisi araştırılmıştır.

Doğal ve yenilenebilir bir malzeme olarak odun, geçmişten bu güne yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından bazıları, zemin kaplaması, çit, dış mekân mobilyaları ve yapı malzemeleri gibi dış mekân uygulamalarıdır. Ahşap malzeme, iklim şartlarına maruz kaldığında, estetik (renk ve parlaklık) ve mekanik performansının düşmesine yol açan biyobozunma ve fotodegradasyona uğramaktadır (Brischke ve Alfredsen, 2020).

Masif ağaç gibi odun esaslı kompozitler (yonga levha, MDF, kontrplak vb.) de mobilya endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Odun esaslı malzemeler kullanım süreleri boyunca da gerek iç gerekse dış mekânlarda rutubet, sıcaklık, nem, güneş ışığı gibi fiziksel ve çarpma, sürtünme, eğilme gibi farklı mekanik etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu etkilere maruz kalma şiddeti ve süresi, malzemenin ömrü ve performansı üzerinde bazı olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Malzemenin karakterizasyonu ile bu etkilere karşı gösterdiği tepkiler malzeme seçimi ve kullanımında belirleyici rol oynamaktadır.

İç ve dış mekânlarda kullanılan odun ve odun esaslı malzemeler için, ultraviyole (UV) ışınları ve kızılötesi (IR) ışıkları, yağmur, kar, dolu, nem, sis, çiy, rüzgâr, kum, toz, kir, kimyasal maddeler, yağ ve kuru sıcaklık gibi birçok önemli etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkilere maruz kalma şiddeti ve süresi, malzemenin anatomik, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde bazı bozulmalar olabilmektedir. Bu bozulmalar, hücre çeperi bağlarının zayıflaması, hücreler arası ve

hücreler içi makroskopik-mikroskopik gerilmeler, ağırlık azalması, renk değişimi, parlaklık kaybı, yüzey pürüzlülüğü, çeşitli çatlamlar, yarılmalar, açılmalar, kopmalar, çökmeler gibi değişik şekillerde ortaya çıkabilmektedir (Kılıç ve Hafizoğlu, 2009).

İklim şartlarına maruz kalan ahşap, doğal ayrışma adı verilen durumla karşılaşır (Williams, 2010). Olanda fotodegradasyonun en önemli nedenlerinden biri, ana bileşenleri, özellikle lignin arasında kimyasal reaksiyonlara neden olan ve kromoforik gruplar oluşturan UV ışındır (Cogulet vd., 2016; Pandey, 2005). Lignin, esas olarak aromatik halkalar ve kromoforik gruplar içeren karmaşık bir 3D polimerdir ve UV radyasyonu ile bozulmaya karşı oldukça hassastır (Zborowska vd., 2015; Rosu vd., 2010).

Kısaca, literatürde kabuk ve kozalağın kompozit, dolgu, ısı yalıtım malzemesi ve filtre olarak performansına ilişkin çalışmalar yapıldığı; UV ışınla hızlandırılmış yaşlandırma testinin çoğunlukla masif ağaç malzeme veya kaplamalar (Özdemir vd., 2018) üzerinde yapıldığı anlaşılmaktadır. Literatür araştırmasında üretilen malzemeler ya boşluksuz, tamamen dolu ya da gevşek yapıda olup; şu ana kadar bal peteği şekilli kalıp kullanılarak kabuk ve/veya kozalak esaslı ısı yalıtım malzemesi üretimi ve onun UV ışınla hızlı yaşlandırma sonucu renk, parlaklık değişimi konusunda herhangi bir araştırmaya ulaşılamamıştır.

Bu çalışmanın amacı, çam kozalağı ve kabuğundan üretilen kalıplı kompozit malzemenin UV ışınla hızlandırılmış ve doğal yaşlandırma testi sonunda renk, parlaklık ve kütle değişimi özelliklerini tespit etmek ve bu özelliklerin malzeme içeriğindeki hammaddelerin parçacık büyüklüğü ile ve perlit oranıyla ilişkilerini belirlemektir. Bu kapsamda, çam kabuğu ve kozalağı kullanılarak yaklaşık 55% boşluk oranına sahip 15 tip malzeme üretilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) Türkiye’de en geniş yayılış gösteren, kabuğu en kalın iğne yapraklı tür olduğu için bu ağacın kabuk ve kozalakları hammadde olarak kullanılmıştır. Kabuk ve kozalaklar Yenice ilçesi, Çanakkale ili, Türkiye’de Temmuz 2018’de toplanmıştır. Hammaddelerin bu ayda toplanmasının sebebi, tomruk üretiminin yaygın olarak yapılması, kozalakların tohumlarını dökmesi ve hızlı bir doğal kurumanın olmasıdır. Şekil 1, hammadde örneklerini göstermektedir.



Şekil 1. Parçacık Boyutuna Göre Hammaddeler

Malzemelerin üretiminde rutubet ve yanmaya karşı direnç, hafiflik ve yalıtım özelliklerini iyileştirmek için parafin, borik asit, genişletilmiş perlit eklenmiştir. Tutkal olarak üre-formaldehit reçinesi kullanılmıştır. Perlit Genper Genleştirilmiş Perlit San. Tic. Ltd. Şti., Kütahya, Türkiye’den; borik asit Forscher, Türkiye’den; parafin ve üre-formaldehit reçinesi Kastamonu Entegre Ağaç Sanayi A.Ş Balıkesir Yonga Levha Tesisleri, Türkiye’den temin edildi. Perlitin dökme yoğunluğu 50-60 kg/m³, rengi beyaz, rutubet içeriği maksimum %1, pH’ı 6-8.5 arasındadır. Borik asit toz formunda, rengi beyaz, yoğunluğu 1440 kg/m³tür. Üre formaldehit reçinesi ve parafinin yoğunluğu, katı madde oranı, viskozitesi ve pH’ı sırasıyla 1285 kg/m³ ve 850-960 kg/m³, %65 ve %58-65, 301.1 cPs ve 10-100 cPs, 8.54 ve 8-11 arasındadır. Hammaddeleri öğütmede kullanılan 6 mm ve 9 mm açıklıklı elekleri, 24 adet kırıcı çene ve 3 kW gücünde motoru olan çekiçli değirmen ile 300 °C’ye kadar dijital olarak ayarlanabilen, hava sirkülasyonlu bir kurutma fırını Doğançül Makine Firması, Gaziantep, Türkiye’den satın alınmıştır. Hammadde

tasnifinde 0,5, 1, 2, 3, 4 ve 5 mm açıklıklı çelik elekler manuel kullanılmıştır. 500 × 350 × 50 mm boyutlarında petek şeklinde bir alüminyum kalıp seti, tüm malzemelerin çekirdek katmanlarını üretmek için Gaziantep, Türkiye'deki Alper Torna Firmasından satın alınmıştır. Yüzey tabakaları, 130 °C sıcaklık ve 200 bara ulaşabilen Kocayusuf Piton-KP-1 marka hidrolik preste üretilmiştir. Testler, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Orman Fakültesi laboratuvarlarında ve Üniversite-Sanayi-Kamu İşbirliği Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (ÜSKİM)'de yapılmıştır.

Metot

Malzemeler 4 mm kalınlıkta yüzey tabakalarının üretimi, 32 mm kalınlıkta orta tabakaların üretimi ve malzemenin oluşturulması olarak üç aşama halinde üretildi. Malzeme tipleri ve içerikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Malzemelerin İçerikleri. Tablo içeriği, Efe (2022)'den alınmıştır

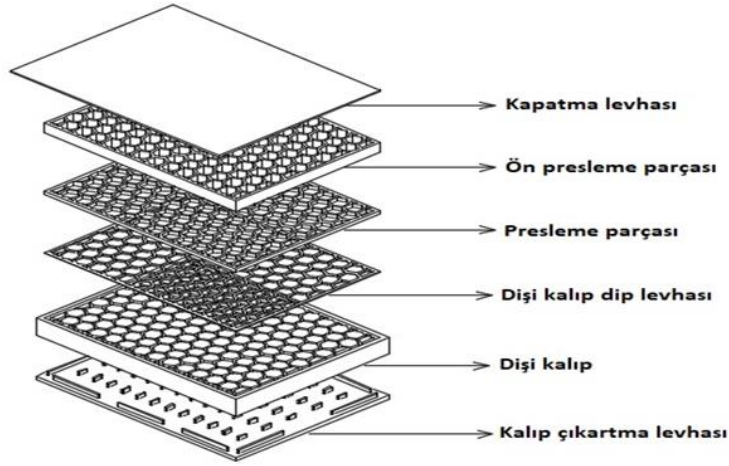
Malzemeler	İçerik	Oran (%)	Parçacık büyüklüğü (PB) (mm)
A1	Kabuk	100	1<PB<2
A2		100	2<PB<3
A3		100	3<PB<4
B1	Kozalak	100	1<PB<2
B2		100	2<PB<3
B3		100	3<PB<4
C1	Kabuk/Kozalak	75/25*	2<PB<3
C2		50/50*	
C3		25/75*	
D1	Kabuk/Perlit	90/10 [#]	2<PB<3
D2		80/20 [#]	
D3		70/30 [#]	
E1	Kozalak/Perlit	90/10 [#]	2<PB<3
E2		80/20 [#]	
E3		70/30 [#]	

*: Ağırlıkça, #: Hacimce

Tüm malzemelerin üretiminde ağırlıkça %10 tutkal, %1 borik asit ve %0.5 parafin kullanıldı. Hava kurusu (%12-15) rutubetteki kozalak ve kabuklar önce çekiçli değirmende öğütüldü, sonra elle elendi, 1 mm'den küçük ve 4 mm'den büyük parçacıklar kullanım dışı hammadde olarak uzaklaştırıldı ve fırında %1-2 rutubete ulaşmaya kadar kurutuldu. Yüzey tabakalarının üretiminde bir çerçeve şeklinde 20 × 450 × 550 mm ölçülerinde MDF'den yapılmış şablon kullanıldı. Her bir malzeme için değişen oranlarda kozalak/kabuk, perlit, tutkal, borik asit ve parafin bir el mikseriyle karıştırıldı ve şablon içine serildi. Böylece malzeme taslakları oluşturuldu. Yüzey tabakaları taslaklarına 4 hidrolik kriko ile ön sıkıştırma uygulandı. Son olarak 1:5 sıkıştırma oranı kullanılarak hidrolik preste 4 mm kalınlıkta malzemeler üretildi. Yüzey tabakaları üretiminde 8 dk boyunca 130 °C sıcaklıkta 200 bar basınç uygulandı. Orta tabakaların üretiminde yüzey tabakalarıyla aynı içerikteki karışım kullanıldı. Burada karışım bal peteği şekilli alüminyum kalıba serildi, titreşimle malzemenin boşlukları giderildi ve hidrolik krikolarla 2 kg/cm² basınç uygulandı. Kalıp, basınç altındayken sabitlenerek 160 °C'de 30 dk kürlendi ve sonuçta 32 mm kalınlıkta orta tabaka elde edildi. Yüzey tabakalarının üre formaldehit reçenesi ile tutkallanarak orta tabakanın iki tarafına yapıştırılmasıyla 40 mm kalınlıkta sandviç formunda son malzeme üretilmiştir. Bu son aşamada presleme parametreleri 130 °C, 20 bar ve 8 dk olarak kullanılmıştır. Bal peteği şekilli alüminyum kalıbı oluşturan bileşenler Şekil 2'de gösterilmektedir.

Hızlandırılmış Yaşlandırma Testi

Bu test, ÜSKİM'de Atlas firmasına ait SUNTEST XLS+ cihazında ISO 11431 standardı, 1:2008D-2 metoduna göre, ışımaya kontrolü 300-400 nm aralığında yapılmıştır. Testin yapılma amacı, üretilen ısı yalıtım levhalarının laboratuvar ortamında gün ışığını taklit ederek gerçek doğal şartları altında güneş ışığından ne kadar ve nasıl etkileneceğini tespit etmektir. Numuneler 23 ± 2 °C sıcaklık ve %50±5 bağıl nemli ortamda 28 gün süreyle şartlandırılmıştır. UV yaşlandırma testinin malzemenin kütleinde, renginde, basınç direncinde meydana getirdiği değişiklikler ölçülmüştür. Test süresi toplam 240 saattir.



Şekil 2. Bal Peteği Kalıp Parçaları. Şekil, Efe (2022)'den alınmıştır

Basınç Direnci Ölçümü

Bu test Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu test ALŞA marka 50 kN kapasiteli hidrolik test cihazında yapıldı. Levhalar “Isı yalıtım mamulleri-Binalar için-Basınç altındaki davranışın tayini-(TS EN 826)” standardına uygun olarak test edildi. Bu standartta levhaların %10 deformasyona denk gelen basınç dayanımı (σ_{10}) ölçüldü. Testte her bir levhadan ölçüleri 165x165x40 mm olan 4 adet numune alınarak test edildi. Deney numuneleri en az 6 saat süreyle (23 ± 5) °C’de bekletilerek şartlandırıldı, deney (23 ± 5) °C’de yapıldı. Bu testte basınç dayanımı (σ_m), kPa cinsinden aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A_0} \quad (1)$$

Burada;

F_m = En büyük kuvvet (N)

A_0 = Deney numunesinin başlangıç en kesit alanı (mm^2)’dır.

%10 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen basınç gerilmesi (σ_{10}), kPa cinsinden aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır:

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0} \quad (2)$$

Burada;

F_{10} : % 10 birim şekil değiştirmeye karşılık gelen kuvvet (N),

A_0 : Deney numunesinin başlangıçtaki en kesit alanı (mm^2)’dır.

Kütle Kaybı Ölçümü

Bu test Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Yenice MYO kampüsünde yapılmıştır. Bunun için kampüs bahçesindeki toprak alandan yararlanılmıştır. Testin yapılma amacı, UV yaşlandırma testine tabi tutulan ve tutulmayan levhaların kullanım ömrü tamamlandıktan sonra doğaya bırakıldığında zamana bağlı olarak meydana gelecek kütle kayıpları hakkında, dolayısıyla toprağa karışma performansı hakkında fikir edinmektir. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar Termal marka hava sirkülasyonlu etüv, BEL Engineering marka $220 \pm 0,01$ mg kapasiteli hassas terazi, 0,05 mm hassasiyette çelik kumpas ve desikatördür. Testte her levhadan $50 \times 50 \times 40$ mm ebatlarında 5’er adet numune kullanılmıştır. Numuneler sentetik tül perde kumaşıyla paketlenen tam kuru hale gelinceye kadar 103 ± 2 °C’de 24 saat boyunca etüvde kurutuldu. Daha sonra başlangıçtaki ağırlıkları 0,01 g hassasiyette tartılarak kaydedildi. Takiben, 30 cm derinlikte kazılmış ve tabanı ıslatılmış çukura konuldu ve üzeri toprakla kapatıldı. 90 günün sonunda numuneler toprak altından çıkarıldı, toprak kalıntıları temizlendi ve 103 ± 2 °C’de 24 saat boyunca etüvde tam kuru ağırlığa ulaşmaya kadar kurutuldu. Doğal iklim koşullarında toprakta meydana gelen kütle kayıpları aşağıdaki bağıntıyla göre hesaplandı:

$$m_k = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 (\%) \quad (3)$$

Burada;

m_k = Kütle kaybı oranı (%)

m_1 = Numunenin başlangıç ağırlığı (g)
 m_2 = Numunenin sonuç ağırlığı (g)'dir.

Renk Ölçümlerinin Belirlenmesi

Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış panellerin renk ölçümleri Hunterlab Color Flex cihazı (Geometri: dairesel yönlü 45° aydınlatmalı/0° görüntüleme) kullanılarak belirlenmiştir. Renk ölçümleri her bir levha numunesinden 100x100x40 mm ölçülerinde 3'er adet numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. CIELAB sisteminde, L^* eksen, 100'den (beyaz) sıfıra (siyah) kadar değişen açıklığı, a^* kırmızı (+) ile yeşil (-) tonu ve b^* sarıdan (+) maviye (-) tonu ifade etmektedir (Ayata 2019, Ayata vd. 2021). Δb^* , ΔL^* , ΔE^* ve Δa^* değerleri aşağıda verilmiş olan formüller ile belirlenmiştir. Barański ve ark., (2017)'e göre renk değiştirme kriterleri Tablo 2'de verilmiştir.

$$\Delta a^* = a^*_{UV \text{ yaşlandırılmış}} - a^*_{UV \text{ yaşlandırılmamış}} \quad (4)$$

$$\Delta b^* = b^*_{UV \text{ yaşlandırılmış}} - b^*_{UV \text{ yaşlandırılmamış}} \quad (5)$$

$$\Delta L^* = L^*_{UV \text{ yaşlandırılmış}} - L^*_{UV \text{ yaşlandırılmamış}} \quad (6)$$

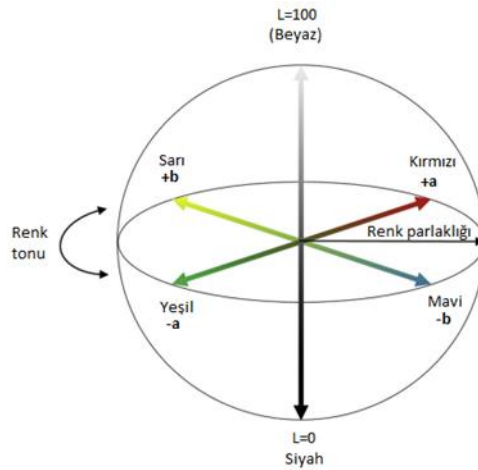
$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (7)$$

Burada Δa , kırmızıdan yeşile renk değişimini; ΔL , toplam parlaklık değişimini; Δb , sarıdan maviye renk değişimini ve ΔE , toplam renk değişimini göstermektedir.

Tablo 2. Renk Değişirme Kriterleri (Baranski vd., 2017)

ΔE^* Değeri	Gözlem Sonucu
$\Delta E^* < 0.2$	Görünmez renk değişimi
$2 > \Delta E^* >$	Hafif renk değişimi
$3 > \Delta E^* > 2$	Yüksek filtrede görünür renk değişimi
$6 > \Delta E^* > 3$	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk
$12 > \Delta E^* >$	Yüksek renk değişimi
$\Delta E^* > 12$	Farklı renk

Literatürde birçok çalışmada (Ayata vd., 2021; Ly vd., 2020; Cogulet vd., 2016; Pandey, 2005) kullanılan ve renk ve parlaklık değişimini sembolize eden CIELAB renk uzayı diyagramı Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. CIELAB Renk Uzayı Diyagramı

BULGULAR VE TARTIŞMA

Renk parametrelerine ait varyans analizi sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Verilen bu sonuçlara göre, L^* değerinin yaşlandırma (B) faktörü anlamsız elde edilirken, malzeme türü (A) ve etkileşim (AB) anlamlı olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, a^* ve b^* değerleri için malzeme türü (A), yaşlandırma (B) ve etkileşim (AB) anlamlı olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Renk Parametrelerine ait Varyans Analizi Sonuçları

Test	Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F değeri	$\alpha \leq 0.05$
Işıklıklık (L^*)	Malzeme Türü (A)	7189,045	14	513,503	189,712	0,000*
	Yaşlandırma (B)	6,126	1	6,126	2,263	0,138**
	Etkileşim (AB)	82,278	14	5,877	2,171	0,020*
	Hata	162,405	60	2,707		
	Toplam	153936,987	90			
	Düzeltilmiş Toplam	7439,854	89			
Kırmızı Renk Tonu (a^*)	Malzeme Türü (A)	882,840	14	63,060	230,868	0,000*
	Yaşlandırma (B)	8,269	1	8,269	30,273	0,000*
	Etkileşim (AB)	15,132	14	1,081	3,957	0,000*
	Hata	16,389	60	0,273		
	Toplam	12080,011	90			
	Düzeltilmiş Toplam	922,629	89			
Sarı Renk Tonu (b^*)	Malzeme Türü (A)	844,000	14	60,286	111,708	0,000*
	Yaşlandırma (B)	8,855	1	8,855	16,408	0,000*
	Etkileşim (AB)	18,194	14	1,300	2,408	0,010*
	Hata	32,380	60	0,540		
	Toplam	19935,999	90			
	Düzeltilmiş Toplam	903,429	89			

*: Anlamlı, **: Anlamsız

Renk parametrelerine ait sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; L^* , a^* ve b^* değerleri her malzeme türünde yaşlandırma sonrasında farklı sonuçlar vermiştir.

Tablo 4. Renk Parametrelerine ait Sonuçlar

Levha Türü	Yaşlandırma	Işıklıklık (L^*) Değeri				Kırmızı Renk (a^*) Tonu Değeri				Sarı Renk (b^*) Tonu Değeri			
		\bar{X}	Değişim (%)	SS	HG	\bar{X}	Değişim (%)	SS	HG	\bar{X}	Değişim (%)	SS	HG
A1	Kontrol	36,10		1,26	FG	15,63		0,33	A	18,32		0,37	A*
	240 saat	34,61	↓4,13	0,68	G	13,61	↓12,92	0,81	CD	16,47	↓10,10	0,32	CDEF
A2	Kontrol	34,87		0,98	G	14,84		0,08	AB	16,89		0,46	BCDE
	240 saat	33,66	↓3,47	0,98	G	14,06	↓5,26	0,56	BCD	16,44	↓2,66	1,03	CDEF
A3	Kontrol	34,07		1,11	G	15,68		0,32	A*	16,85		0,65	BCDE
	240 saat	34,79	↑2,11	0,51	G	14,13	↓9,89	0,62	BC	15,80	↓6,23	0,37	EF
B1	Kontrol	34,85		0,47	G	10,89		0,17	H	15,77		0,07	EF
	240 saat	33,52	↓3,82	1,09	G	10,76	↓1,19	0,05	H	15,71	↓0,38	0,63	EF
B2	Kontrol	33,54		1,26	G	10,55		0,21	HI	16,16		0,63	DEF
	240 saat	34,29	↑2,24	1,42	G	11,01	↑4,36	0,09	H	16,67	↑3,16	0,30	BCDE
B3	Kontrol	35,78		0,79	G	10,73		0,20	H	17,42		0,29	ABCD
	240 saat	35,56	↓0,61	1,33	G	11,03	↑2,80	0,13	H	17,87	↑2,58	0,51	AB
C1	Kontrol	34,47		0,68	G	14,48		0,43	BC	17,11		0,86	ABCDE
	240 saat	33,21	↓3,66	1,45	G**	13,89	↓4,07	0,62	BCD	15,95	↓6,78	0,65	EF
C2	Kontrol	35,55		0,87	G	14,15		1,18	BC	17,68		0,75	ABC
	240 saat	33,26	↓6,44	0,27	G	13,14	↓7,14	0,35	DE	15,94	↓9,84	0,45	EF
C3	Kontrol	33,90		0,53	G	11,99		0,07	FG	15,69		0,19	EF
	240 saat	33,56	↓1,00	0,79	G	11,97	↓0,17	0,33	FG	15,70	↑0,06	0,64	EF
D1	Kontrol	40,86		2,32	DE	12,54		0,41	EF	13,85		1,41	GH
	240 saat	40,11	↓1,84	0,80	DE	11,38	↓9,25	0,50	GH	13,88	↑0,22	0,27	GH
D2	Kontrol	44,42		0,87	C	12,05		0,25	FG	15,09		0,39	FG
	240 saat	42,65	↓3,98	2,07	CD	11,04	↓8,38	1,11	H	13,48	↓10,67	1,22	HI
D3	Kontrol	54,42		3,72	B	9,78		0,42	IJ	12,38		0,44	IJ
	240 saat	54,61	↑0,35	2,57	B	8,18	↓16,36	0,62	K	11,35	↓8,32	0,81	J
E1	Kontrol	38,68		0,78	EF	9,05		0,55	JK	13,82		1,29	GH
	240 saat	40,60	↑4,96	1,28	DE	8,57	↓5,30	0,57	K	12,67	↓8,32	0,61	HI
E2	Kontrol	56,18		2,18	B	5,00		0,15	LM	8,59		0,42	K
	240 saat	60,16	↑7,08	1,95	A	4,37	↓12,60	0,44	M	7,11	↓17,23	0,64	L**
E3	Kontrol	61,40		4,27	A*	4,19		0,99	M**	7,20		1,42	L
	240 saat	56,69	↓7,67	1,85	B	5,31	↑26,73	0,44	L	8,37	↑16,25	1,15	KL

\bar{X} : Ortalama, SS: Standart Sapma, HG: Homojenlik Grubu, *: En yüksek değer, **: En düşük değer

Toplam renk farklılıklarına ait sonuçları Tablo 5’te verilmiştir. Renk değiştirme kriterlerine göre (Baranski vd., 2017) en düşük renk değişimi ΔE^* değeri C3 nolu malzemede (0.34), en yüksek ΔE^* değeri E3 nolu malzemede (4.98) elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda yüksek renk değişimine veya önemli renk değişimine rastlanmadığı görülmektedir. Malzeme grupları incelendiğinde sadece kabuk içeren A grubu malzemelerin parçacık boyutundan bağımsız bir değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. B grubu malzemelerde parçacık boyutuyla ters orantılı olarak renk değişiminin azaldığı görülmüştür. Bu sonuca göre, kozalak parçacıklarının yüzey alanı arttıkça UV ışığın daha fazla etki ettiği söylenebilir. C ve D grubu malzemelerde de A grubundaki gibi düzenli olmayan bir renk değişimi ölçülmüştür. Kozalak lifleri içeren E grubu malzemelerde perlit oranı ile doğru orantılı bir renk değişimi olduğu ölçülmüştür. E grubu malzemelerde hem perlit içermeyen ancak aynı parçacık büyüklüğüne sahip B2 grubu malzemelere göre iki kattan daha fazla renk değişiminin olması; hem de karışıma katılan perlit miktarının artmasıyla renk değişiminin artması, UV ışığın perlit miktarına bağlı olarak daha fazla etki ettiği sonucuna ulaşılabilir.

Tablo 5. Toplam Renk Farklılıklarına ait Sonuçlar

Levha	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Renk değiştirme kriterleri (Baranski vd. 2017)’e göre
A1	-1,49	-2,02	-1,85	3,12	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk
A2	-1,21	-0,78	-0,45	1,51	Hafif renk değişimi
A3	0,72	-1,55	-1,05	2,01	Yüksek filtrede görünür renk değişimi
B1	-1,33	-0,13	-0,06	1,34	Hafif renk değişimi
B2	0,75	0,46	0,51	1,02	Hafif renk değişimi
B3	-0,22	0,30	0,45	0,58	Görünmez renk değişimi
C1	-1,26	-0,59	-1,16	1,81	Görünmez renk değişimi
C2	-2,29	-1,01	-1,74	3,05	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk
C3	-0,34	-0,02	0,01	0,34	Hafif renk değişimi
D1	-0,75	-1,16	0,03	1,38	Hafif renk değişimi
D2	-1,77	-1,01	-1,61	2,60	Yüksek filtrede görünür renk değişimi
D3	0,19	-1,60	-1,03	1,91	Hafif renk değişimi
E1	1,92	-0,48	-1,15	2,29	Yüksek filtrede görünür renk değişimi
E2	3,98	-0,63	-1,48	4,29	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk
E3	-4,71	1,12	1,17	4,98	Filtrenin ortalama kalitesiyle görülebilen bir renk

Tablo 6, UV yaşlandırma testinin malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Buna göre UV yaşlandırma testi sonunda levhaların basınç değerlerinde anormal bir değişiklik gözlemlenmemiş, genel olarak UV öncesi yapılan basınç dayanımı testi sonuçlarına göre direnç değerleri azalmış, bu azalmanın da kendi aralarında uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, istisna olarak A1, A2 ve A3 tipi levhaların basınç direnci az da olsa artmıştır. Üstelik bu artış hammadde tanecik büyüklüğüyle doğru orantılı olarak gerçekleşmiştir. A1, A2 ve A3 tipi levhaların ortak özelliği hammadde olarak sadece çam kabuğu içermeleridir. UV sonrası meydana gelen bu artışın UV ışının çam kabuğu dokusu üzerinde yaptığı sertleştirici etkiden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Diğer taraftan, UV yaşlandırma testi sonucunda yapılan görünür yoğunluk ölçümlerine göre A1, A3 ve C3 tipi levhaların değerlerinde artış, diğerlerinde düşüş görülmüştür. A1 ve A3 tipi levhaların UV yaşlandırma testi sonrası yoğunluk değerlerindeki artış UV yaşlandırma testi sonrası basınç dayanımı değerlerindeki artışla uyumludur. UV yaşlandırma testi sonrası doğal iklim koşullarında yapılan toprak testinde istinasız olarak levhaların tümünde UV öncesine göre daha az kütle kaybı olduğu görülmüştür. Bu durum UV etkisinin levhalar üzerinde toprak altındaki çeşitli mantar ve bakteriler açısından bir çeşit koruma sağlandığı şeklinde yorumlanabilir. Bir çalışmada fungusit katkılı polivinilklorür ve ahşap/polivinilklorür kompozitlerin mantar önleyici performansı ve mekanik-morfolojik özellikleri, UV ayrışma yaşanmasının (0-32 gün) ve toprağa gömülme maruziyetinin (0-6 ay) etkileri açısından incelenmiş ve mantar önleme etkinliğinin 32 gün sonra UV yaşlanması ile %81,4’ten %28,3’e ve 6 ay sonra toprağa gömme testi ile %81,4’ten %4,4’e düştüğünün bulunması (Kositchaiyong vd., 2014) benzer bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayata vd. (2021) kayısı odununa uygulanmış UV sistem parke vernikli katmanların yapay yaşlandırma karşısındaki performansını incelemişlerdir. Bu amaçla örnekler 252 ve 504 saat süreyle UV ışına maruz bırakılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre bütün testler için varyans analizleri anlamlı olarak elde edilmiştir. Çalışmamızdaki malzemelerde de renk parametreleri bakımından yaşlandırmanın ışıklılık (L^*) hariç diğer tüm varyans analizlerinin anlamlı olduğu görülmüştür. Baranski vd. (2017), yüksek sıcaklığın odunun diri odun ve öz odun üzerindeki renk değişimine etkilerini araştırmış ve diri odunun renk değişimine daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Cogulet vd. (2016), ladin odununun renk değişikliklerini, bir yansıtma spektrofotometresi kullanarak ve FTIR-ATR spektroskopisi ile analiz etmişlerdir.

Tablo 6. UV Yaşlandırma Testi Sonrası Levhaların Ölçülen Bazı Özellikleri

Levha Adı	Basınç Direnci (kPa)		Görünür Yoğunluk		Toprak Testi Kütle Kayıpları	
	UV Öncesi	UV Sonrası	UV Öncesi	UV Sonrası	UV Öncesi	UV Sonrası
A1	266,21	315,04	273,11	293,93	0,08	0,07
A2	296,12	387,12	256,81	251,45	0,09	0,07
A3	359,27	552,87	262,51	279,76	0,09	0,07
B1	792,96	753,23	305,43	281,15	0,11	0,07
B2	722,42	682,17	292,22	264,00	0,10	0,07
B3	891,35	746,30	298,38	239,14	0,09	0,08
C1	364,07	344,08	263,37	248,12	0,08	0,08
C2	324,50	258,44	252,69	234,78	0,05	0,09
C3	314,82	272,72	244,48	250,49	0,08	0,08
D1	309,60	288,63	261,29	243,9	0,09	0,08
D2	328,33	290,04	261,57	258,94	0,09	0,07
D3	414,38	334,90	259,88	237,97	0,09	0,07
E1	739,32	528,13	275,38	257,93	0,08	0,09
E2	709,45	549,43	272,09	250,15	0,09	0,10
E3	563,18	225,73	266,29	256,32	0,10	0,09
\bar{X}	493,07	435,26	269,70	256,53	0,09	0,08
SS	210,64	177,70	16,50	16,46	0,01	0,01
VK	42,72	40,83	6,12	6,41	14,28	11,84
Min.	266,21	225,73	244,48	234,78	0,05	0,07
Maks.	891,35	753,23	305,43	293,93	0,11	0,10

\bar{X} : Ortalama, SS: Standart sapma, VK: Varyasyon katsayısı

Kuka vd. (2020), ısı işlem görmüş sarıçam odunu parçacıkları içeren odun-plastik kompozitlerini 500 saat süreyle UV yaşlandırma ve UV yaşlandırma+su spreyi yöntemleriyle kombinasyon halinde yapay ayrışma testlerine tabi tutmuşlar, renk değiştirme mekanizmasına ilişkin önemli hususları ve ısı işlem görmüş ve görmemiş ahşap parçacıklar ile WPC arasındaki farkları tespit etmişlerdir. Diğer taraftan, kayın odunu kaplamaları üzerinde 240-480 ve 720 saat sürelerle UV yaşlandırma işlemi uygulanarak, yaşlandırmanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmış (Özdemir vd. 2018); ekstrakte edilmiş ve edilmemiş *Acacia auriculaeformis* odunları üzerinde UV yaşlandırmanın renk değişim özellikleri araştırılmış ve ekstrakte edilen örneklerde renk değişimlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir (Pandey, 2005). Bir çalışmada, yapay yaşlandırmanın odun-plastik kompozitler üzerindeki etkisini araştırılmış ve testin ilk aşamalarında renk değişiminin yavaş olduğu; daha sonra ise içerikteki polipropilenden kaynaklı bir hızlanmanın olduğu rapor edilmiştir (Kuka vd. 2020). Önceki çalışmalara bakıldığında, bu çalışmanın kullanılan malzeme, UV ışığa maruz kalma, ölçüm teknikleri ve araştırılan bazı özellikler (Basınç direnci, yoğunluk, kütle kaybı) bakımından farklı olduğu görülecektir.

SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, çam kozalağı ve kabuğundan üretilen kalıplı kompozit malzemenin hızlandırılmış (UV ışınla) ve doğal yaşlandırma testleri sonunda renk, parlaklık ve kütle değişimi özelliklerini tespit etmek ve bu özelliklerin malzeme içeriğindeki hammaddelerin parçacık büyüklüğü ve perlit oranıyla ilişkilerini belirlemektir. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre;

- Malzemeler üzerinde yapılan yaşlandırma testi sonrasında toplam renk farkı değerleri için farklı renk değişimi ve yüksek renk değişimi kriterlerine rastlanmadığı; ayrıca, yapay yaşlandırmanın farklı oranlarda üretilen malzemelere ait olan L^* , a^* ve b^* parametrelerini değiştirici etkide bulunduğu görülmektedir.
- UV yaşlandırma sonrası A grubu malzemeler hariç tüm malzemelerin basınç dayanımı ve yoğunluğu azalmıştır. Toprak testi sonuçlarına göre UV öncesi kütle kayıpları büyük farklılıklar göstermiş ve en fazla kozalak içeren örneklerde ölçülmüştür. UV sonrası ise tüm örneklerde birbirine yakın ölçülmüştür.
- Perlit içeren malzemelerde toplam renk değişimi üzerinde perlit oranının belirli bir düzen içinde etkili olmadığı; görünür yoğunluk ve basınç direnci değerlerinin UV işlem sonrasında belirgin oranda azaldığı toprak testi sonrasında ise önemli bir kütle kaybı oluşmadığı tespit edilmiştir.
- Bu çalışmada yalıtım malzemesi olarak üretilen bir malzeme grubunda çeşitli testlere ilişkin sonuçlar verilmiştir. Genel manada sonuçların daha anlamlı olabilmesi için yanma testi, dinamik eğilme (şok) direnci testleri gibi farklı testler ile desteklenmesi uygun olabilir. Gelecek çalışmalarda farklı ağaç türü kabuk ve kozalaklarının farklı yapıştırıcı ve formlarda araştırılmasının bilime yeni katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan veriler, TÜBİTAK tarafından desteklenen 217O356 numaralı projeden elde edilmiştir. Ayrıca desteklerinden dolayı Bekir Cihad BAL, Ertuğrul ALTUNTAŞ ve Kadir KARAKUŞ'a teşekkürlerimi ilettim.

KAYNAKLAR

- Arrakhiz, F. Z., Benmoussa, K., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2013). Pine cone fiber/clay hybrid composite: Mechanical and thermal properties. *Materials and Design*, 50, 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.033>
- Arrakhiz, F. Z., El Achaby, M., Benmoussa, K., Bouhfid, R., Essassi, E. M., & Qaiss, A. (2012). Evaluation of mechanical and thermal properties of Pine cone fibers reinforced compatibilized polypropylene. *Materials and Design*, 40, 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.032>
- Ayata, Ü. (2019). İzmir yöresinde yetişen erik, karabiber ve tespah odunlarının statik sertliğinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 2(2), 94–102.
- AYAta, Ü., Çakıcıer, N., & Gürleyen, L. (2021). İç mekânda kullanılan UV sistem parke verniği uygulanmış kayısı odununun yapay yaşlandırma performansının belirlenmesi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 40–50. <https://doi.org/10.33725/mamad.922311>
- Ayrilmis, N., Buyuksari, U., Avci, E., & Koc, E. (2009). Utilization of pine (*Pinus pinea* L.) cone in manufacture of wood based composite. *Forest Ecology and Management*, 259(1), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.043>
- Baranski, J., Klement, I., Vilková, T., & Konopka, A. (2017). High temperature drying process of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) with different zones of sapwood and red false heartwood. In *BioResources* (Vol. 12, Issue 1, pp. 1861–1870). <https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1861-1870>
- Barbu, M. C. (2011). Current Developments In The Forestry And Wood Industry. *Pro Ligno*, 8, 89–99.
- Baştürk S.B., Kürşat, K., İ., P., & Y., Y. (2015). Mechanical Properties of Acorn and Pine Cone Filled Polymer Composites. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, 14(2), 144–153. <http://asrjetsjournal.org/>
- Berge, B. (2009). *The Ecology of Building Materials* (Second). Architectural Press.
- Blanchet, P., Cloutier, A., & Riedl, B. (2000). Particleboard made from hammer milled black spruce bark residues. *Wood Science and Technology*, 34(1), 11–19. <https://doi.org/10.1007/s002260050003>
- Brischke, C., & Alfredsen, G. (2020). Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(9), 3781–3795. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10479-1>
- Busquets-Ferrer, M., Czabany, I., Vay, O., Gindl-Altmatter, W., & Hansmann, C. (2021). Alkali-extracted tree bark for efficient bio-based thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 271(xxxx), 121577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121577>
- Buyuksari, U., Ayrilmis, N., Avci, E., & Koc, E. (2010). Evaluation of the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard manufactured from waste stone pine (*Pinus pinea* L.) cones. *Bioresource Technology*, 101(1), 255–259. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.038>
- Cogulet, A., Blanchet, P., & Landry, V. (2016a). Wood degradation under UV irradiation: A lignin characterization. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 158, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.030>
- Cogulet, A., Blanchet, P., & Landry, V. (2016b). Wood degradation under UV irradiation: A lignin characterization. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 158, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.030>
- Efe, F. T. (2022). Investigation of some physical and thermal insulation properties of honeycomb-designed panels produced from Calabrian pine bark and cones. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80(3), 705–718. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01781-4>
- FAO (Food and Agriculture Organization of The United. (2021). *No Title*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

- Ferreira, R., Pereira, D., Gago, A., & Proença, J. (2016). Experimental characterisation of cork agglomerate core sandwich panels for wall assemblies in buildings. *Journal of Building Engineering*, 5, 194–210. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.01.003>
- Guo, Y., Liu, D., Chen, Y., Zhang, T., & Zhu, S. (2019). Preparation and properties of carbon-fiber- and pine-cone-fiber-reinforced high-density polyethylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(14), 1–7. <https://doi.org/10.1002/app.47304>
- Holmberg, A., Wadsö, L., & Stenström, S. (2016). Water vapor sorption and diffusivity in bark. *Drying Technology*, 34(2), 150–160. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1023310>
- Hoong, Y. B., Paridah, M. T., Loh, Y. F., Jalaluddin, H., & Chuah, L. A. (2011). A new source of natural adhesive: Acacia mangium bark extracts co-polymerized with phenol-formaldehyde (PF) for bonding Mempisang (*Annonaceae* spp.) veneers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(3), 164–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.12.002>
- Jha, K., Tyagi, Y. K., & Singh Yadav, A. (2018). Mechanical and thermal behaviour of biodegradable composites based on polycaprolactone with pine cone particle. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 43(9), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0822-1>
- Kain, G., Barbu, M.-C., Richter, K., Plank, B., Tondi, G., & Petutschnigg, A. (2015). Use of tree bark as insulation material. *Forest Products Journal*, 65(3–4), 16–25.
- Kain, G. (2016). *Design of tree bark insulation boards : analysis of material , structure and property relationships*.
- Kain, G., Barbu, M. C., Teischinger, A., Musso, M., & Petutschnigg, A. (2012). Substantial bark use as insulation material. *Forest Products Journal*, 62(6), 480–487. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00052.1>
- Kain, G., Güttler, V., Barbu, M. C., Petutschnigg, A., Richter, K., & Tondi, G. (2014). Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(4), 417–424. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0798-4>
- Kain, G., Lienbacher, B., Barbu, M. C., Senck, S., & Petutschnigg, A. (2018). Water vapour diffusion resistance of larch (*Larix decidua*) bark insulation panels and application considerations based on numeric modelling. *Construction and Building Materials*, 164, 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.212>
- Kılıç, A., & Hafizoğlu, H. (2009). Açık Hava Koşullarının Ağaç Malzemenin Kimyasal Yapısında Meydana Getirdiği Değişimler ve Alınacak Önlemler. *Türkiye Ormanlık Dergisi*, 8(2), 175–183. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjf/issue/20889/224156>
- Kolář, V., Tichý, M., & Müller, M. (2019). Mechanical properties of polymeric composite based on pine seeds production residues. *Manufacturing Technology*, 19(3), 426–430. <https://doi.org/10.21062/ujep/308.2019/a/1213-2489/MT/19/3/426>
- Korjenic, A., Petránek, V., Zach, J., & Hroudová, J. (2011). Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings*, 43(9), 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>
- Kositchaiyong, A., Rosarpitak, V., Hamada, H., & Sombatsompop, N. (2014). Anti-fungal performance and mechanical-morphological properties of PVC and wood/PVC composites under UV-weathering aging and soil-burial exposure. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 91, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.022>
- Kuka, E., Andersons, B., Cirule, D., Andersons, I., Kajaks, J., Militz, H., & Bicke, S. (2020). Weathering properties of wood-plastic composites based on heat-treated wood and polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139(September), 106102. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106102>
- La Rosa, A. D., Recca, A., Gagliano, A., Summerscales, J., Latteri, A., Cozzo, G., & Cicala, G. (2014). Environmental impacts and thermal insulation performance of innovative composite solutions for building applications. *Construction and Building Materials*, 55, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.054>
- Ly, B. C. K., Dyer, E. B., Feig, J. L., Chien, A. L., & Del Bino, S. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. *Journal of Investigative Dermatology*, 140(1), 3-12.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>

- Özdemir F., Dalgıç E., Özğan A.O, A. E. (2018). *Kayın kaplamaların yüzey pürüzlülüğü üzerine yaşlandırmanın etkisi*. 2–7.
- Pandey, K. K. (2005). A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. *Polymer Degradation and Stability*, 87(2), 375–379. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.09.007>
- Pásztory, Z., Mohácsiné, I. R., Gorbacheva, G., & Börcsök, Z. (2016). The utilization of tree bark. *BioResources*, 11(3), 7859–7888. <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.Pasztory>
- Pásztory, Z., Ronyecz Mohácsiné, I., & Börcsök, Z. (2017). Investigation of thermal insulation panels made of black locust tree bark. *Construction and Building Materials*, 147, 733–735. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.204>
- Rosu, D., Teaca, C. A., Bodirlau, R., & Rosu, L. (2010). FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 99(3), 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2010.03.010>
- Sahin, H. T., & Arslan, M. B. (2011). Weathering performance of particleboards manufactured from blends of forest residues with red pine (*Pinus brutia*) wood. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 13(3), 337–346. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2011000300009>
- Tsalagkas, D., Börcsök, Z., & Pásztory, Z. (2019). Thermal, physical and mechanical properties of surface overlaid bark-based insulation panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(5), 721–730. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01436-5>
- TS EN 826 (2013) Isı yalıtım mamulleri - Binalar için-Basınç altındaki davranışın tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye
- Tudor, E. M., Dettendorfer, A., Kain, G., Barbu, M. C., Réh, R., & Krišt'ák, L. (2020). Sound-absorption coefficient of bark-based insulation panels. *Polymers*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/POLYM12051012>
- Tudor, E. M., Scheriau, C., Barbu, M. C., Réh, R., Krišt'ák, L., & Schnabel, T. (2020). Enhanced resistance to fire of the bark-based panels bonded with clay. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(16), 5594. <https://doi.org/10.3390/app10165594>
- Wesolowski, A., Adams, M. A., & Pfautsch, S. (2014). Insulation capacity of three bark types of temperate Eucalyptus species. *Forest Ecology and Management*, 313(2014), 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.015>
- Williams, R. S. (2010). Chapter 16 - Finishing of Wood. In *Wood Handbook - Wood as an engineering material* (pp. 1–39).
- Xing, C., Zhang, S. Y., Deng, J., & Wang, S. (2007). Investigation of the effects of bark fiber as core material and its resin content on three-layer MDF performance by response surface methodology. *Wood Science and Technology*, 41(7), 585–595. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0129-6>
- Zborowska, M., Stachowiak-Wencek, A., Nowaczyk-Organista, M., Waliszewska, B., & Prądyński, W. (2015). Analysis of photodegradation process of *Pinus sylvestris* L. wood after treatment with acid and alkaline buffers and light irradiation. *BioResources*, 10(2), 2057–2066.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :09.06.2023
Kabul Tarihi :17.08.2023

Received Date :09.06.2023
Accepted Date :17.08.2023

MOBİLYA VE İÇ MEKAN TASARIMINDA KULLANILAN FARKLI KALINLIKTAKİ LİF LEVHALARIN BAZI ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF SOME PROPERTIES OF DIFFERENT THICKNESS FIBERBOARDS USED IN FURNITURE AND INTERIOR DESIGN

Celal UĞUR^{2*} (ORCID: 0000-0002-3278-3674)
*İbrahim BEKTAŞ*¹ (ORCID: 0000-0002-0617-6926)
*Ahmet TUTUŞ*¹ (ORCID: 0000-0003-2922-4916)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Celal UĞUR, celal_ugur27@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, mobilya ve iç mekân tasarımında yaygın olarak kullanılan farklı kalınlıktaki lif levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla 4 mm, 6 mm, 8 mm, 16 mm ve 18 mm olmak üzere beş farklı kalınlıkta imal edilmiş orta yoğunluktaki lif levhaların (MDF), fiziksel özelliklerinden su alma ve kalınlığına şişme, mekanik özelliklerden eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, yüzeye dik çekme direnci ve yüzey dayanıklılığı testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen verilerin istatistik analiz sonuçları karşılaştırıldığında; tüm kalınlıklarda yoğunluk ve kalınlığına şişme değerlerinin mobilya ve iç mekân tasarımı için ilgili standartlarda istenen kriterlere uygun olduğu görülürken, su alma değerlerinde değişkenlik gösterdiği ve 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalınlığındaki sonuçların standartlarda istenilen değerleri karşılayamadığı anlaşılmıştır. Levhaların kalınlıklarındaki değişimin, mekanik özelliklerden eğilme direnci ve elastikiyet modülünde orantılı bir değişim gösterdiği, yoğunluk değerlerinin söz konusu değişimlerde daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir ve bu sonuçların mobilya ve iç mekân tasarımında kullanılacak levhaların özelliklerine olumlu anlamda katkılar sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Lif levha, fiziksel ve mekanik özellikler, mobilya, iç mekân tasarımı

ABSTRACT

In this study, the physical and mechanical properties of fiberboards of different thicknesses, which are widely used in furniture and interior design, were investigated. For this purpose, from the physical properties of medium density fiberboards (MDF) manufactured in five different thicknesses, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 16 mm and 18 mm, are water absorption and swelling to thickness. From the mechanical properties bending strength, modulus of elasticity in bending, tensile strength perpendicular to the surface, and surface durability tests were carried out. While it was seen that the density and swelling values in all thicknesses were suitable for furniture and interior design, it was determined that the water absorption values varied and the results in 4 mm, 6 mm and 8 mm thickness could not meet the desired values in the standards. It has been determined that the change in the thickness of the boards shows a proportional change in the mechanical properties of bending and elasticity modulus, and the density values are more effective in these changes and it has been concluded that these results will contribute positively to the properties of the boards to be used in furniture and interior design.

Keywords: Fiberboard, physical and mechanical properties, furniture, interior design

ToCite: UĞUR, C., BEKTAŞ, İ., & TUTUŞ, A., (2023). MOBİLYA VE İÇ MEKAN TASARIMINDA KULLANILAN FARKLI KALINLIKTAKİ LİF LEVHALARIN BAZI ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 765-773.

GİRİŞ

Hammadde teminindeki zorluklar nedeniyle nüfus artışının oluşturduğu talep orman ürünleri sektöründeki arz ile yeterince karşılanamamaktadır. Özellikle, 2022 yazında yaşanan küresel orman yangınları ve 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri hammadde kıtlığını daha da şiddetli hale getirmiştir. Diğer yandan, lif levhaların kullanım alanları da gün geçtikçe yaygınlaşmakta ve özellikle lif levhalar kullanıcılar tarafından diğer levhalara nazaran daha çok tercih edilmektedir. 21. asrın ilk çeyreği itibarı ile bu levhalar özellikle mobilya, iç mekân tasarım ve mutfak dolaplarının üretiminde vazgeçilmez bir hammadde kaynağı durumundadır.

Lif levhalar belirli sıcaklık ve basınç altında lignoselülozik liflerden üretilmiş levhalardır. Arzu edilen kalınlıkta üretilebilmeleri, homojen ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olmaları, çivi, vida ve yapıştırıcılarla birleşebilmeleri, büyük ebatlarda üretilebilmeleri ve yüzey kaplamalarına uygun olması bu levhaların öne çıkan özelliklerindedir. Ayrıca, kolay işlenebilmesi, biyotik ve abiyotik haşerelere ve yangına dayanıklı olarak üretilebilmesi, üretim koşullarının kontrol edilebilmesi, masif ahşap malzemede çürüme, budaklanma, lif kıvrılması gibi kusurların olmaması ve nispeten ekonomik olması da öne çıkan özellikleri arasındadır (Eroğlu ve Usta 2000; İstek vd., 2010).

TS 3635 EN 316 (Nisan 1998) standardına göre ise orta yoğunlukta lif levhalar kendi arasında iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar yoğunluğu 400-560 kg/m³ arasında düşük yoğunlukta orta sert liflevhalar (LDF) ve yoğunluğu 560-900 kg/m³ arasında yüksek yoğunluklu orta sert lif levhalar (MDF) olarak sınıflandırılmaktadır. Orta yoğunluklu lifli levhalar (MDF) bazı özelliklerinden dolayı orman ürünleri sektöründe önemli bir yere sahiptir ve birçok kullanım alanında tercih edilmektedir. Orta yoğunluklu lif levha (MDF), masif ahşap malzemeye ikame olarak geliştirilen en önemli levha ürünlerinden biri haline gelmiştir (Eroğlu ve usta 2000, İstek ve Eroğlu 2002).

MDF levhalar, masif ve masif levhaların en iyi ikamesi olduğu varsayılmaktadır. Ancak, MDF levhaların özellikleri masif levhalardan farklıdır. MDF levhalar farklı yönlerinde farklı mekanik özelliklere sahip olan masif levhalara kıyasla homojen yapıya ve özelliklerin izotropisine sahiptir. MDF levhaların temel fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi ve söz konusu levhaların pürüzsüz ve kompakt bir yüzeye sahip olması hem mobilya üretimi hem de iç mekân tasarım uygulamaları ve farklı estetik tasarımlar için oldukça önemlidir (Popovska, 2016).

Avrupa'da üretilen MDF levhalar, EN 622-1 (2003) ve EN 622-5 (2009)'da tanımlanan koşullara göre belirtilmiştir. EN 622-5, kullanım amaçlarına göre sınıflandırılan MDF şartlarını tanımlar. Bu sınıflandırmaya göre, Nemli koşullarda kullanım için genel amaçlı levhalar (MDF.H tipi) kullanılmaktadır.

Piyasada bulunan MDF levhaların fiziko-mekanik özellikleri mobilya üreticileri ve tasarımcıları tarafından uygun son kullanımlar için test edilir (Popovska, 2016). MDF levhalar her çeşit mobilya üretiminde, özellikle mutfak, yatak odası, banyo dolabı, salon, masa, sehpa, kapı, baraka, tavan ve taban döşemelerinde dekoratif oyma ve kakma ve diğer tüm yaşam alanlarında kullanılmaktadır (Eroğlu, 1994). Ülkemizde mobilya üretimi imalat sektörünün %4'ünü kapsamaktadır (Kayacıklı ve Emil, 2003). Masif çerçevelerden yapılan mobilyalar, ahşap esaslı levhalar (sunta, yongalevha gibi) mobilya üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Göktaş vd., 2004). Hammaddenin niteliği, kullanılan katkı maddeleri, presleme şartları, taslak rutubet miktarı MDF üretiminde nihai ürünün özelliklerine tesir etmektedir (İstek, 2006).

Mobilya ve iç mekan tasarımında doğru tasarımın uygulanabilmesi için kullanılacak malzemelerin, kullanım yeri ve taşınacak yüklere göre malzeme seçiminin yapılması gerekmektedir. Levhaların direnç özellikleri belli limitler dahilinde tahmin edilerek üretilebilir.

Levhalarda kolay işlenebilme, deforme olma olasılığının azlığı, homojen lif dağılımı ile tasarımlarda kalite çıtasını yükseltmektedir. Bunun yanı sıra bu malzemelerin standart boyutlarda üretilmeleri, levhaların endüstriyel uygulamalarında kullanılmalarının da arttırmaktadır (Vlosky ve Wu, 2001).

Bu bakımdan, mobilya ve iç mekân tasarımında kullanılacak olan hammadde ve malzemelerin standartlara uygun ve istenilen kalite ve özelliklerde olması önemlidir. Bu çalışmanın amacı, mobilya ve iç mekânda kullanılan farklı kalınlıktaki ticari orta yoğunluklu lif levhaların, fiziko-mekanik özelliklerini belirlemek, bir biri ile mukayese etmek ve ilgili standartlara uygunluğunu ortaya koymaktır.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, hammadde olarak ticari bir firmadan temin edilen orta yoğunluklu lif levhalardan yaygın olarak kullanılan 5 farklı kalınlıkta (4 mm, 6 mm, 8 mm, 16 mm ve 18 mm) deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan test numuneleri 20°C±2 sıcaklık ve %30±5 bağıl nem de %6 rutubete gelinceye kadar klimatize edilmiştir. Testler, TS EN 325 (1999) TS EN 326-1 (1996) standardı esas alınarak, aynı kalınlık grubu için 5 farklı levhadan kesilen 30 adet örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler SPSS 16.0 yazılımı ve Microsoft Office Excel kullanılarak yapılmıştır. MDF levhaların mekanik ve fiziksel özelliklerindeki verilerin dağılımı ve anlamlılık değeri % 95 güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) ve Duncan testi ile analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında fiziksel ve mekanik özellikler standartlara bağlı kalınarak yapılmıştır;

Yoğunlukların belirlenmesi TS EN 323'e göre hesaplanmıştır. MDF levhalar daire testere yardımı ile 50x50 mm boyutlarında kesilmiş her bir grup için toplam 30 adet örnek hazırlanmıştır. IMAL marka test cihazında örneklerin ağırlık, kalınlık, genişlik ve boy ölçüleri belirlenmiştir. Ölçüleri belirlenen örneklerin yoğunluk değerleri bilgisayar ekranına aktarılarak ölçümler yapılmıştır.

Eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü testleri, TS-EN 310 (1999) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre; deney parçalarından genişliği 50 mm uzunluğu ise deney numunesinin kalınlığının 20 katının 50 mm fazlası olacak şekilde hazırlanır. Eğilme direnci iki mesnet üzerine serbest olarak yerleştirilen bir deney parçasına orta yerinden dikey yönde yüklenerek, kırılma anına kadar uygulanan kuvvet esnasında net eğilme sahasındaki sehimin ölçülmesi ile hesaplanan değerdir.

Yüzeye dik çekme direnci, TS-EN 319 (1999) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. MDF levhalar daire testere yardımı ile 50x50 mm boyutlarında kesilmiş ve her bir grup için toplam 30 adet örnek hazırlanmıştır. Metal bloklara termoplastik tutkal yardımıyla yapıştırılmış ve IMAL marka test cihazından uygun program seçilerek, örnekler sırasıyla test makinesinin kavrama çeneleri arasına yerleştirilmiştir. Numuneye 60-90 sn arasında kopacak şekilde kuvvet uygulanır. Kopma anındaki maksimum kuvvet kayıt edilir.

Yüzey dayanıklılığı testi, TS-EN 311 (2005)'e standardına göre belirlenmiştir. MDF levhalar daire testere yardımı ile 50x50 mm boyutlarında kesilmiş ve her bir grup için toplam 30 adet örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin yüzeyine bir biçme aleti vasıtasıyla yüzey tabakası boyunca bir yuvarlak zıvana açılır. Zıvananın çapı 35.7 mm ve ana tabakadaki derinliği 0.3±0.1 mm'dir. Yüzeye yaklaşık 0.3-0.4 gr termoplastik tutkal homojen olacak şekilde sürülür ve deney parçası soğuduktan sonra IMAL marka otomatik bilgisayar kontrollü test cihazına yerleştirilip test gerçekleştirilir.

Su alma ve kalınlığına şişme testi, TS EN 317 (1999) belirtilen standarda göre yapılmıştır. MDF levhaların yüksek nem koşullarına ve uzun süreli su etkisine maruz kalma durumlarında davranışlarını görmek için standart bir uygulama olan 24 saat suda bekletme sonrasında kalınlığına şişme ve su alma testi yapılır. 50x50 mm olarak hazırlanan örneklerin en, boy, kalınlık ve ağırlık ölçüleri belirlenmiştir. Daha sonra örnekler su seviyesi 50 mm olan su tankına konulur. 24 saat su içinde bekletildikten sonra su tankından çıkarılır ve bir havlu ile kurulanır. IMAL marka test cihazında tekrar ölçülerek yüzdece su alma miktarları ve kalınlık artışları belirlenir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Laboratuvar ortamında elde edilen verilere, basit istatistik analiz uygulanmış ve sonuçlar mekanik ve fiziksek özellik olarak ayrı ayrı tablolar halinde sunulmuştur. Deney levhalarının mekanik özelliklerine ait sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de yer alan test verilerine uygulanan varyans analizi sonuçları, farklı kalınlıktaki MDF levhalarının yoğunluk değerleri üzerinde $p < 0.000$ önem düzeyinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

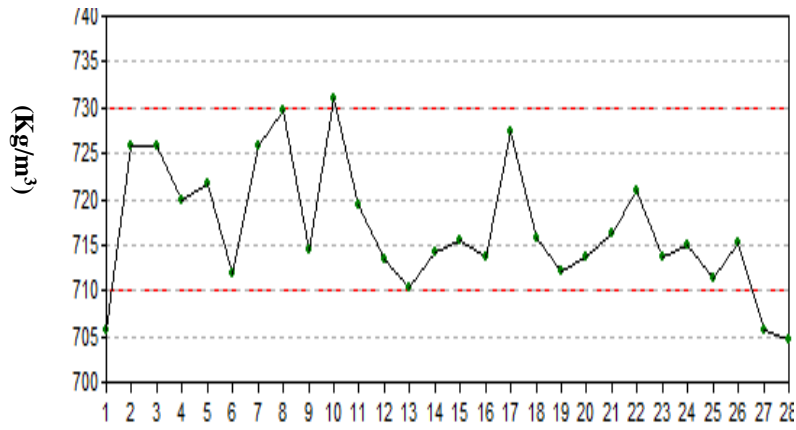
Tablo 1. Test Levhalarının Mekanik Özelliklerine İlişkin Analiz Sonuçları^(*)

Mekanik özellikler	Kalınlık (mm)	Ortalama (%)	SS ^a	SH ^b	R ^c	VK ^d (%)	P ^f	SD ^e
Yoğunluk (kg/m ³)	4	721a*	74,9	43,2	129,5	13,11	<i>p</i> <0,000	560-900
	6	737b	59,4	34,3	105,2	8,32	<i>p</i> <0,000	560-900
	8	741b	36,2	20,8	69,8	5,12	<i>p</i> <0,000	560-900
	16	751c	92,1	53,1	184,2	12,71	<i>p</i> <0,000	560-900
	18	766d	61,2	35,3	120,4	8,73	<i>p</i> <0,000	560-900
Eğilme direnci (N/m ²)	4	22.23a	2,11	4,47	7,3	9,91	<i>p</i> <0,000	≥23
	6	24.34b	2,12	4,5	9,4	13,51	<i>p</i> <0,000	≥23
	8	29.76c	2,1	4,4	2,1	4,96	<i>p</i> <0,000	≥23
	16	32.64d	1,9	3,6	6,8	13,74	<i>p</i> <0,000	≥22
	18	33.65e	1,9	3,8	6,1	13,61	<i>p</i> <0,000	≥22
Elastikiyet Modülü(N/m ²)	4	1003.15a	449,8	86,6	844,4	9,75	<i>p</i> <0,000	≥2700
	6	1406.12b	435,8	83,9	1231,7	11,56	<i>p</i> <0,000	≥2700
	8	3096.68c	542,3	104,4	3075,4	14,47	<i>p</i> <0,000	≥2500
	16	3165.13d	605,9	116,6	2978,4	18,88	<i>p</i> <0,000	≥2500
	18	3190.41e	418,6	79,1	2902,3	14,89	<i>p</i> <0,000	≥2500
Çekme direnci(N/m ²)	4	0.86a	0,20	0,04	0,74	20,77	<i>p</i> >0,005	≥0,65
	6	0.82a	0,27	0,07	1,30	23,76	<i>p</i> >0,005	≥0,65
	8	0.91a	0,18	0,03	0,56	19,25	<i>p</i> >0,005	≥0,65
	16	0.89a	0,13	0,02	1,38	23,44	<i>p</i> >0,005	≥0,55
	18	0.94a	0,13	0,02	0,94	25,73	<i>p</i> >0,005	≥0,55
Yüzey dayanıklılığı(N/m ²)	4	0.50a	0,10	0,01	0,35	10,72	<i>p</i> <0,000	2700
	6	1.06b	0,15	0,02	0,83	11,32	<i>p</i> <0,000	2700
	8	1.05b	0,14	0,02	0,85	21,31	<i>p</i> <0,000	2500
	16	1.28c	0,33	0,11	1,65	12,82	<i>p</i> <0,000	2500
	18	1.57d	0,21	0,04	1,48	22,21	<i>p</i> <0,000	2500

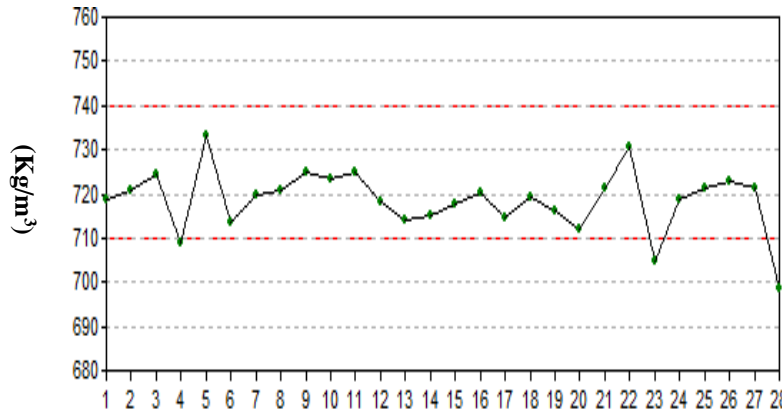
(*)Numune sayısı: 30, ^aStandart sapma, ^dStandart hata, ^cDağılım genişliği (%), ^dVaryasyon katsayısı (%), ^fÖnem düzeyi, ^eStandart değer.

Tablo 1’de elde edilen veriler, MDF levhaların, mobilya imalatı ve iç tasarımlar da dahil olmak üzere kuru koşullarda kullanım için genel amaçlı levhaların gereksinimlerini karşıladığını göstermiştir. İmal cihazı ile ölçülen farklı kalınlıktaki MDF levhalarının mekanik özelliklerine ait analiz sonuçları incelendiğinde, levha kalınlıkları arttıkça yoğunluk değerlerinde de kısmi bir artış görülmektedir (Tablo 1). 18 mm levhalarda yoğunluk değerleri diğer kalınlıklara nazaran daha yüksek bulunmuştur. Standart özellikleri karşılamak kaydıyla düşük yoğunluklu 4 mm, 6 mm, 8 mm levhalar işleme ve taşıma kolaylığı bakımından iç mekân tasarımında özellikle tavan kaplamalarında kullanılırken, 16 mm ve 18 mm kalınlıklarındaki yüksek yoğunluklu levhalar daha çok mobilya üretiminde avantaj sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar; benzer yoğunlukta üretilmiş lif levhalarla karşılaştırıldığında paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir (Özkalaycı, 2017).

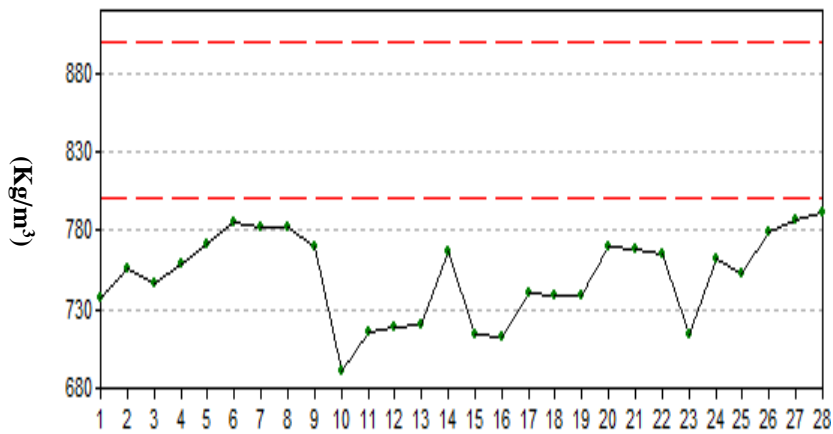
Ham MDF levhalardan elde edilen farklı kalınlıklardaki deney numunelerinin ham levha yoğunluk dağılım grafikleri Şekil 1 (A, B, C, D ve E)’de verilmiştir.



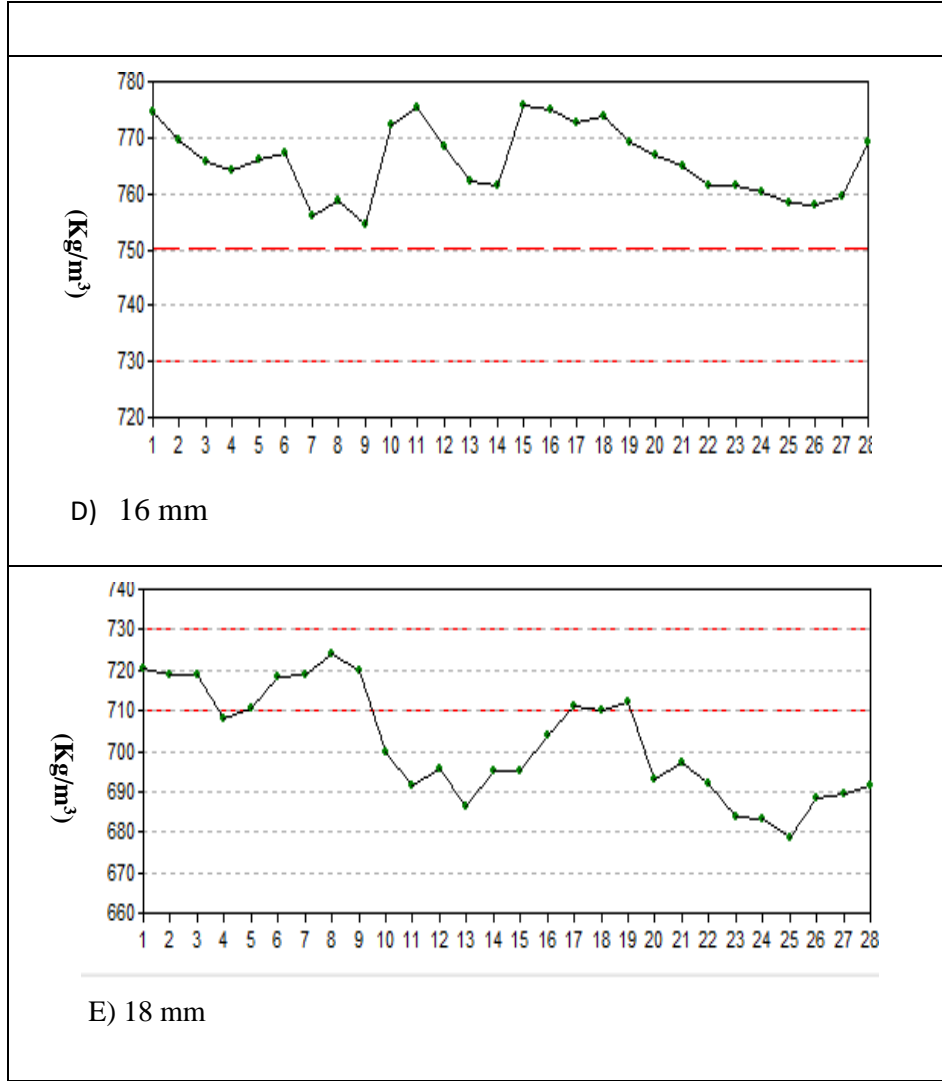
A) 4 mm



B) 6 mm



C) 8 mm



Şekil 1. Ham Levha Yoğunluk Dağılım Grafikleri

Şekil 1’de görüldüğü gibi ham levha yoğunluk dağılım eğrilerinin doğrusal olmadığı gözüksede yoğunluk değerleri belirli sınırlar içerisinde. Yoğunluğun birimi kg/m^3 olarak ifade edilir ve aynı sınıf levha gruplarında kalınlıklar değişkenlik gösterebilir. Yoğunluğun birim alana düşen lif miktarı farklılık göstermemektedir. Levha içerisinde birim alana düşen lif miktarı değişkenlik gösterdiğinden yoğunluk dağılım grafikleri de farklılık göstermektedir. Farklı kalınlıklardaki MDF levhaların yoğunluk değerleri arzu edilen standartlar içerisinde. Kullanılan odun türü, üretim şartları ve kimyasal miktarları yoğunluk üzerinde etkili olmaktadır.

Eğilme direnci, levhaların mobilya ve iç tasarımdaki kullanım alanlarında, maruz kalacağı yükün miktarını hesaplamada kullanılan en önemli kriterlerden bir tanesidir. (İstek vd., 2015). Tablo 1’de görüldüğü gibi en yüksek eğilme direnci 18 mm kalınlıklı levhalarda ortalama 33.65 N/mm^2 , en düşük 4 mm kalınlıklı levhalarda 22.23 N/mm^2 olarak hesaplanmıştır. Eğilme direnci testlerinden elde edilen veriler (Tablo 1) üzerinden yapılan istatistik analiz sonuçları, gruplar arasında $p < 0.000$ güven düzeyinde anlamlı şekilde etki ettiği görülmektedir. Bu etkinin ortalamalar arasındaki ayrımı Duncan testi ile ortaya konmaktadır.

Tablo 1’de görüldüğü gibi mobilya üretiminde büyük oranda kullanılan 16 mm ve 18 mm levha sınıflarının eğilmede elastikiyet modül değerleri istenilen standart değerlerini karşılamaktadır. Bu durumun bu sınıf levhaların kalınlıklarının diğer sınıf levha gruplarından daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek eğilmede elastikiyet modülü 18 mm kalınlıklı levhalarda 3165 N/mm^2 , en düşük 4 mm kalınlıklı levhalarda 1003 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Gruplar arasındaki farkın % 5 yanılma ihtimali ile önemli olduğunu yapılan varyans analizi sonuçları ile ortaya konmuştur (Tablo 1). Farklı kalınlıklarda eğilme direnci değerlerinin standartlarda istenilen değerlerden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Mobilya üretiminde kullanılan MDF levhalarda kamburluk (dönme) istenmeyen bir özellik olduğundan kullanılan levhalarda eğilme ve elastiklik değerlerinin yüksek olması

istenir. Yüksek eğilme ve elastiklikte MDF levhaların tüm yönlerde homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu homojenlik mobilya üretimi ve iç mekân uygulamalarında daha iyi kullanım için MDF levhaların istenilen yönde kesilmesine olanak sağlamaktadır.

Farklı kalınlıktaki MDF levhalar için yüzeye dik çekme direnci üzerine yapılan varyans analizi sonucuna göre gruplar arasındaki farkın % 5 yanılma ihtimali ile önemli olmadığını ortaya koymuştur. Yüzeye dik çekme direnci ahşap esaslı levhalarda kullanılan tutkalın yeterli yapışma mukavemetini sağlayıp sağlamadığını belirler. Levha kalınlığı arttıkça yüzeye dik çekme direncide paralel olarak artmaktadır. Levha kalınlığı arttıkça yeterli iç yapışmanında artması beklenir. Tüm levha sınıflarında iç yapışma mukavemetinin yeterli olduğu görülmüştür. Çekme direnci için elde edilen değerler, test edilen MDF levhaların mobilya üretimi ve diğer iç mekân elemanlarındaki uygulamalar için TS EN 622-5 standardında kuru koşullar altında genel amaçlar için belirtilen ve en az değer olan 0.55 N/mm² değerine göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Mobilya ve iç mekân tasarımda kullanılan levhalarda yüzey dayanıklılığı en önemli kriterlerden biridir. Elde edilen sonuçlar TS EN 311 (1999) standartlarına uygundur. Genel olarak üretilen bütün levha sınıflarında yüzey dayanıklılığı direnci; yüzeye dik çekme direnci, eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü özellikleri ile benzer sonuçlar göstererek levha kalınlığı arttıkça yüzey sağlamlığı değerleri de kısmi bir artış göstermiştir. Kalınlık azaldıkça yüzey tabakasındaki yapışma kalitesinin de azaldığı düşünülmektedir. Bunun da yüzey dayanıklılığı değerlerini düşürmesi muhtemeldir. Gerçekleştirilen istatistik analizler yüzey dayanıklılığı direnci değerleri arasında anlamlı farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur ($p < 0.000$). Farklı kalınlıktaki MDF levhaların su alma ve kalınlığına şişme değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. MDF Levhaların Kalınlığa Bağlı Ortalama Su Alma ve Kalınlığına Şişme Değerleri Analiz Sonuçları^(*)

Fiziksel Özellikler	Kalınlık (mm)	Ortalama (%)	SS ^a	SH ^b	R ^c	VK ^d (%)	P ^f	SD ^e
Kalınlığına şişme (24h)	4	17,94c**	14,6	2,6	64,6	84,71	$p < 0,000$	≥15
	6	12,19bc	6,8	1,2	23,3	53,02	$p < 0,000$	≥15
	8	12,15bc	6,1	1,1	23,3	44,03	$p < 0,000$	≥17
	16	5,60a	2,2	0,4	8,5	38,84	$p < 0,000$	≥12
	18	11,26b	7,1	1,3	32,9	60,39	$p < 0,000$	≥12
Su alma (24h)	4	61,88c	12,1	2,2	51,9	19,78	$p < 0,000$	≤40
	6	48,63b	22,1	4,0	64,4	46,07	$p < 0,000$	≤40
	8	62,83c	10,2	1,8	50,8	16,46	$p < 0,000$	≤40
	16	32,50a	15,8	2,8	63,2	49,05	$p < 0,000$	≤40
	18	37,05a	13,9	2,5	53,0	37,04	$p < 0,000$	≤40

(*)Numune sayısı: 30, ^aStandart sapma, ^dStandart hata, ^cDağılım genişliği (%), ^dVaryasyon katsayısı (%), ^fÖnem düzeyi, ^eStandart değer.

Tablo 2 de görüldüğü gibi 24 saat suda bekletildikten sonra kalınlığına şişme değerinin istenilen standart değer altında olması, MDF'nin iç mekân uygulamaları ve mobilya üretimi için bir malzeme olarak kullanıldığında boyutsal stabilitesini garanti eder. 24 saatlik şişme değerleri için TS EN 622-5 standardında kuru koşullar altında genel ve taşıyıcı amaçlar için aranan %12 değerini 4 mm levha grupları dışında diğer tüm levha gruplarının sağladığı anlaşılmıştır. Tablo 2’de görüldüğü gibi su alma miktarlarında ise %40 ‘ın üzerinde bir artışın olması, bu levhaların standartta belirtilen özellikleri karşılamadığını göstermektedir. Farklı kalınlıktaki MDF levhaların 24 saat su alma ve kalınlığına şişme değerleri üzerine yapılan varyans analizi sonucuna göre gruplar arasındaki farkın $p < 0.005$ önem düzeyinde önemli olduğu Tablo 2’den anlaşılmaktadır. Verilere göre 4 mm, 6 mm ve 8 mm kalınlıklarındaki levhaların su alma değerleri standart limitlerini karşılamadığı anlaşılmıştır. Bu durum levhaların yüksek nemli alanlarda daha uzun süre kullanılmaması gerektiğini gösterir. Kalınlığına şişme ve su alma değerleri yoğunluk, ağaç türü, kullanılan kimyasal (parafin) gibi faktörler tarafından etkilenmektedir (İstek vd., 2015).

Tablo 1ve 2’de yer alan bazı test sonuçları, benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında bir birine paralel sonuçların elde edildiği görülebilir. İstek vd. (2015)’te, 18 mm’lik MDF levhalarda 24 saat suda bekletme sonucu, su alma değerlerini %19.35 ile 43.05 arasında elde ederken, kalınlığına şişme değerlerini %5.24 ile 7.61 arasında elde etmiştir. Yine aynı çalışmada, 18 mm’lik MDF levhalarda yüzeye dik çekme direnci 0.91 ile 1.25 N/mm² arasında tespit edilmiştir. Aynı şekilde, Ashori vd, (2009) yüzeye dik çekme direncini 0.17-0.32 N/mm², eğilme direncini 29 N/mm² ve elastikiyet modülünü 2582 N/mm² olarak ölçtüğü ve bu sonuçların mevcut çalışmadaki aynı test

sonuçlarına yakın olduğu ilgili verilerden görülebilir. Tablo 2’de verilen sonuçlar, benzer yoğunlukta üretilmiş lif levhalarla karşılaştırıldığında, paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir (Özkalaycı, 2017). Söz konusu çalışmada, fiziksel özelliklerden 24 saat su alma %23 ve kalınlığına şişme %11 olarak hesaplanmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

MDF levhaların temel fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi ve söz konusu levhaların, pürüzsüz ve kompakt bir yüzeye sahip olması, hem mobilya üretimi hem de iç mekân tasarım uygulamaları ve farklı estetik tasarımlar için oldukça önemlidir. Bu çalışmada da farklı kalınlıklardaki MDF levhaların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin arzu edilen kalite standartlarına, mobilya ve iç mekân tasarım alanlarına uygunluğu araştırılmıştır.

Yapılan çalışma sonuçları, genel olarak levha kalınlıkları arasındaki farklılığın fiziksel ve mekanik özelliklerde beklenen ölçüde bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Kalınlıklar arasındaki test sonuçlarının biri birine yakın olmasından dolayı bu levhaların kullanımında maliyet ve hammadde sarfiyatı açısından daha uygun olan düşük kalınlıktaki MDF’lerin değerlendirilmesinin de mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

Testlerde mobilya ve iç mekânlara uygunluğu araştırılan beş farklı kalınlıktaki levha gruplarının belirlenen özelliklerinin, istenen kalite düzeyini karşıladığı anlaşılmıştır. Özellikle mekanik özellikler bakımından bu çalışmada kalitesi belirlenen beş farklı kalınlıktaki MDF levhaların piyasada satılan ticari MDF levha gruplarına nazaran genel olarak daha iyi kalitede olduğu tespit edilmiştir. Bilindiği gibi, mobilya üretiminde kullanılan lif levha ve yongalevhaların belirli özellikleri taşıması standartlarla zorunlu hale getirilmiştir. MDF levhalardan yapılan mobilyaların kalitesi, ürünün özelliklerine, kaplama malzemesine ve kalınlığa bağlı olarak tasarlanan konstrüksiyona ve birleştirme gücüne dayanır. Bununla birlikte orta yoğunluklu lif levhalar, iyi fiziksel ve mekanik özellikleri, kolay işlenmeleri ve pürüzsüz yüzeyleri nedeniyle mobilya üretimi ve iç mekân uygulamaları için en hızlı kullanılan ahşap esaslı ürünlerden biridir.

Sonuç olarak, MDF levhaların daha uzun ömürlü kullanımı için yoğun rutubetli ortamlarda uygulanmasından kaçınılması önerilebilir. Banyo alanları gibi bu tür uygulamalarda, mobilya üreticileri ve iç mimarlar, tüm kullanım süresi boyunca ürünlerin iyi boyutsal stabilitesini sağlayacak olan yüksek nem koşullarında uygulama için MDF H tipi levha kullanmayı önerebilir.

KAYNAKLAR

- Ashori, A., Nourbakhsh, A., & Karegarfard, A., (2009): Properties of medium density fiberboard based on bagasse fibers. *Journal of composite materials*, 43(18), 1927-1934. DOI: [10.1177/0021998309341099](https://doi.org/10.1177/0021998309341099).
- Eroğlu, H., & Usta, M. (2000). Lif Levha Üretim Teknolojisi, K.T.Ü. Orman Fakültesi Yayın No: 200/30, ISBN: 975-6983-10-8, KTU Matbaası, Trabzon.
- Eroğlu, H. (1994). Lif Levha Endüstrisi, Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Yayın No:45.
- Göktaş, O., Özen, E., Çolak, AM., & Günsel, U. (2004). Ağaç Levhalardan Yapılan Vidalı Birleştirmeli Rafların Yüzeye Dik (Lateral) Yük Taşıma Performansları, *Teknoloji*, Cilt 7, Sayı 3, 445-453.
- İstek, A., Muğla, K., & Yazıcı, H. (2015). Mobilya üretiminde kullanılan ticari MDF levhaların özellikleri. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 14(2), 333-343.
- İstek, A., Aydemir, D., & Aksu, S. (2010). The effect of décor paper and resin type on the physical, mechanical, and surface quality properties of particleboards coated with impregnated décor papers. *BioResources*, 5(2), 1074-1083. <https://dx.doi.org/0http://hdl.handle.net/11772/13749>
- İstek, A. (2006). Sert Lif levhaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Sıcaklık ve Basıncın Etkisi, *Z.K.Ü. Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 8 (10), 29-35.
- İstek, A., & Eroğlu, H. (2002). Buğday Saplarından (*Triticuma estivum* L.) Sert Lif Levha Üretimi, *II. Ulusal Karadeniz Ormancılık Kongresi*, 1038-1041, Artvin.
- Kayacıklı, T., & Emil, T. (2003). Dünyada ve Türkiye’de Mobilya Sektörü, İTO Yayınları, ISBN 975-512-720-8, İstanbul

Özkalaycı, A. (2017). Mobilya Endüstrisinde Kullanılan Odun Esaslı Levhaların Teknolojik Özelliklerinin Araştırılması. KSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (basılmamış), Kahramanmaraş, s:55.

EN 622-1. (2003). Fibreboards. Specifications. General requirements.

EN 622-5 (2009). Fibreboards. Specifications. Requirements for dry process boards (MDF).

TS EN 317, Nisan (1999)Yongalevhalar ve Lif Levhalar – Su İçerisine Daldırma İşleminde Sonra Kalınlığına Şişme Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 319, Nisan (1999).Yongalevhalar ve Lif Levhalar Levha Yüzeyine Dik Çekme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 310, Nisan (1999). Ahşap Esaslı Levhalar – Eğilme Dayanımı ve Eğilme Elastikiyet Modülünün Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 311 (1999). Ahşap Esaslı Levhalar - Yüzey Sağlamlığı - Deney Metodu. TSE, Ankara

TS EN 325, Nisan (1999). Ahşap Esaslı Levhalar – Numune Boyutlarının Ölçümü, TSE, Ankara.

TS EN 326-1, Nisan (1999). Ahşap Esaslı Levhalar – Numune Alma Kesme ve Muayene, TSE, Ankara.

TS EN 323, Nisan (1999) Ahşap Esaslı Levhalar – Birim Hacim Ağırlığının Tayini, TSE, Ankara

Vlosky, R., & Wu, Q. (2001). A brief look at raw material usage in the furniture and cabiner industries in the southern United States Forest Prod. J. 51(9): 25–29.

VJ Popovska, B, Iliev., & I, Spiroski. (2016). Characteristics of Medium Density Fiberboards for Furniture Production and Interior Application. Journal of Architecture and Design, <http://dx.doi.org/10.3889/seejad.2016.100>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.08.2022
Kabul Tarihi : 05.12.2022

Received Date : 10.08.2022
Accepted Date : 05.12.2022

KİMYASAL KORUYUCU GİYSİLERİN SEÇİMİ, TEMİZLENMESİ VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİ

SELECTION, DECONTAMINATION, PERFORMANCE PROPERTIES OF CHEMICAL PROTECTIVE CLOTHING

Dilara SEVİNDİK¹ (ORCID: 0000-0001-8708-1939)
Bengi KUTLU^{1*} (ORCID: 0000-0002-3838-7736)

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bengi KUTLU, bengi.kutlu@deu.edu.tr

ÖZET

Koruyucu giysilerin, çalışana çalışma ortamındaki risklere karşı koruyabilmesi için çalışma ortamı, riskin türü ve kimyasal çeşitleri göz önüne alınarak performans özellikleri belirlenmektedir. Permeasyon parametreleri de koruyucu giysi seçiminde ve temizleme etkinliğinin belirlenmesinde kritik bir öneme sahiptir. Bunun yanında, koruyucu iş giysilerinde kullanım ve temizleme-bakım işlemleri ile meydana gelen gözle görülmeyen kimyasal ve temizleme maddeleri birikmeleri ile deformasyon, giysileri çalışana koruyamayacak hale getirebilmektedir. Bu makalede kimyasal koruyucu giysilerin performans özellikleri, seçimi ve temizleme koşullarının önemini açıklanması amaçlanmaktadır. Bir iş yerinde kullanılacak giysinin seçimi ve temizlenmesinin etkilerinin değerlendirilmesi için incelenmesi gereken performans özellikleri açıklanmış ve ölçüm yöntemleri anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal koruyucu giysi, permeasyon, seçim

ABSTRACT

Performance properties of chemical protective workwear to protect workers are determined regarding the types of risks, the workplace and the types of chemicals. Permeation parameters are critical for selecting chemical protective workwear and determining efficiency of cleaning process. In addition, during usage and decontamination, chemicals and cleaning agents can accumulate on chemical protective workwear decreasing its protective properties. The aim of the paper is to explain performance properties of chemical protective workwear, important factors for selecting protective clothing and importance of decontamination conditions are discussed. The performance characteristics that need to be examined in order to evaluate the selection and effects of cleaning of the clothing to be used in a workplace are explained and the measurement methods are explained.

Keywords: Chemical protective workwear, decontamination, permeation, selection

GİRİŞ

Teknik tekstillerin en önemli sınıflarından bir tanesi olan koruyucu giysiler, giyen kişiyi ölüm ya da yaralanma ile sonuçlanabilecek ağır çevresel etkilerden koruyan giysilerdir. Maruz kalınan riskler farklı olduğu için tek bir tür koruyucu giysinin tüm tehlikelerden koruması olası değildir. Isı, alev, soğuk, elektrik, biyolojik, mekanik vb. zararlara karşı koruyan farklı koruyucu giysiler kullanılmaktadır. Koruyucu iş giysileri, çalışma ortamındaki tüm riskler için önlem alındıktan sonra, son önlem olarak kullanılan koruyucu malzemelerdir.

Kimyasal koruyucu giysiler, kimyasal madde üretim tesislerinde, kimyasal maddelerin kullanıldığı tesislerde çalışanların, zehirli ve tehlikeli, sıvı, gaz ya da partikül halindeki kimyasallardan korunması için kullanılan giysilerdir. Çeşitli özelliklere sahip kimyasal maddelerin zararlarından koruma ancak o kimyasala özgü koruyucu malzeme ile gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle iş yerlerinde uygun kimyasal koruyucu giysinin seçimi çok önemlidir. Genelde koruyucu giysiler konusunda bilgisi olmayan çalışanlar koruyucu giysilerin seçimi ve alımını yapmaktadır. Bu nedenle seçimi yapan ve/veya giysileri kullanan çalışanlar, giysilerin seçimi, neden ve nasıl kullanılması gerektiği konusunda bilgilendirilmelidir. Karar verme süreci için, çalışma ortamındaki performans gerekliliklerinin anlaşılması ve giysi özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada, güncel literatür incelenerek kimyasal koruyucu giysi seçimi ve kullanımı ile ilgili göz önünde bulundurulması gereken faktörler ile kimyasal koruyucu giysilerin seçiminde belirleyici kriter olan performans özellikleri ve ölçüm yöntemleri anlatılmaktadır (Scott, 2005; Forsberg vd., 2020).

KİMYASAL KORUYUCU GİYSİLERİN SEÇİMİ

İşyeri risklerinden çalışanları korumada, önce kaynaktan kontrol ve yolda kontrol, ardından kişide kontrol yapılmaktadır. Dolayısıyla kimyasal koruyucu giysilerin seçimi, iş alanı için yapılan risk değerlendirmesi ile başlayarak adım adım uygulanması gereken bir süreçtir. Koruyucu giysi seçiminden önce çalışma ortamlarındaki kimyasal tehlikelerin belirlenmesi ve risk analizinin yapılması önemlidir. Risk analizinin yapılması ile birlikte kimyasal maruziyetini azaltan başka yöntemlerin (çalışma ortamında kullanılan tehlikeli kimyasalın daha az tehlikeli olanla değiştirilmesi, kullanılan tehlikeli kimyasal miktarının azaltılması, havalandırma yapılması vb.) uygulanmasının ardından risk belirlenmektedir. Böylece kimyasal koruyucu giysiye olan gerçek ihtiyaç ortaya çıkmaktadır (Raheel, 1994; Scott, 2005; Van Wely, 2017; Forsberg vd., 2020). Farklı kimyasal maddelerden koruyan giysilerin farklı hammaddelerden üretilmesi gereklidir. Tek bir koruyucu malzeme, tüm kimyasal maddelere karşı koruyucu değildir. Dolayısıyla kimyasal koruyucu giysilerin seçimi karmaşık bir iş ve yanlış bir seçim yapmanın sonuçları, ciltte hafif yaralanmalardan hayati tehlike oluşturacak zararlara kadar değişiklik gösterebilmektedir (Raheel, 1994; Van Wely, 2017). Kimyasal koruyucu giysilerin çalışma ortamlarında bulunan kimyasal maddelerden uygun düzeyde koruyacak şekilde seçilmesi ile kullanım sonrasında da bu koruma özelliklerini kaybetmemesi, çalışanların sağlık ve güvenliği için büyük önem taşımaktadır. İlgili risklerin (ısı stresi, konfor sorunları, hareket kısıtlılıkları vb.) ve fiyatının artmasına neden olacağı için, koruyucu giysinin, o iş yerindeki risklerin gerektirmeyeceği kadar çok koruması da (aşırı-koruma) istenmeyen bir durumdur. İş yerinde bulunan tehlikelerden koruyan malzemelerle, uygun korumayı göstermesi yeterlidir. Kimyasallardan koruma özelliklerinin yanı sıra, giysinin mekanik (delinme, yırtılma mukavemeti vb.) özellikleri de seçimde göz önünde bulundurulmalıdır. Giysilerin koruma özelliklerinin yeterli düzeyde devam etmesi için yeniden kullanımdan önce etkin ve zarar vermeyecek şekilde temizlenmesi gerekmektedir (Scott, 2005; Van Wely, 2017).

Seçimde göz önünde bulundurulması gereken birçok faktör arasında en önemli olanı, kimyasal koruyucu giysinin kullanılacağı çalışma ortamında kullanılan kimyasallara karşı etkili bir şekilde bariyer oluşturabilmesidir. Bunun yanında farklı maruz kalma şekilleri ve süresi, giysinin üretildiği malzemeler, kullanılan koruyucu giysinin bariyer performansı (tipi ve yapısı), sıcaklık, nem gibi farklı çevre koşulları da dikkate alınmalıdır. Tek ya da çok kullanımlık olması ve fiyatı da diğer faktörlerdir (Raheel, 1994; Van Wely, 2017). Çok tehlikeli kimyasallar içeren çalışma ortamları için seçim yapılırken konunun uzmanlarından yardım alınması önemlidir. Kimyasal koruyucu giysinin seçiminde, giysinin bütün olarak koruma, permeasyon ve penetrasyon özellikleri dikkate alınır. Bu özellikleri etkileyen faktörler göz önünde bulundurulmalıdır (Raheel, 1994; Forsberg vd., 2020).

Kimyasala Maruz Kalma

Kimyasala maruz kalma, maruziyet şekli ve süresi ile giysi seçimi için risk analizi sırasında değerlendirilmektedir. Vücutta kimyasallara maruz kalma şekilleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (Van Wely, 2017):

a-Nefes yoluyla

b-Sindirim sistemi yoluyla (gıda ya da sudan)

c-Deriden penetrasyon ya da vücutta yaralanma, kesik vb. yoluyla

Kimyasallarla temas kısa süreli sıçrama, buhar, basınçlı ya da basınçsız spreye maruz kalma şeklinde olabileceği gibi uzun süreli içine dalma şeklinde de olabilmektedir. Kimyasallara maruz kalma sürelerinin artması, permeasyon-penetrasyon ve degradasyon yoluyla geçen kimyasal miktarının artmasına neden olmaktadır. Raporlanmış işle ilgili rahatsızlıklarda, kimyasala deriden maruziyete, nefes yoluyla maruziyetten daha çok rastlandığı belirtilmiştir. Kimyasalların deri ile temas süresinin artması insan vücudunu zehirleyecek düzeye ulaşmasına neden olabilmektedir (Scott, 2005; Van Wely, 2017; Forsberg vd., 2020).

Kimyasal Türleri

Karşılaşılan kimyasallar veya kimyasal karışımlar bilinmediğinde uygun kimyasal koruyucu giysinin seçimi problem haline gelmektedir. Çünkü kimyasal karışımı içinde hızlı şekilde nüfuz eden karışım bileşenleri olduğunda, bunlar yavaş nüfuz eden diğer bileşenlerin de hızını artırmaktadır. Çözünürlük, koruyucu giysi malzemesi ve nüfuz eden kimyasal madde arasındaki etkileşim olarak tanımlanmaktadır ve koruyucu giysinin absorbe ettiği kimyasal madde miktarı ile ölçülebilmektedir (Raheel, 1994; Forsberg vd., 2020). Yüksek çözünürlüğe sahip kimyasallar hızlı bir şekilde kimyasal koruyucu giysiye nüfuz edebileceklerdir. Fakat bu durum düşük çözünürlüğe sahip kimyasalların mutlaka düşük permeasyon oranına karşılık geleceği anlamına gelmemektedir (Protective clothing and equipment committee, 2005). Örneğin gazlar, düşük çözünürlüğe sahip olmasına rağmen sıvılar ile karşılaştırıldığında kimyasal koruyucu giysiye daha yüksek oranda nüfuz edebilmektedir (Raheel, 1994).

Giysinin Malzemesi

Kimyasal koruyucu giysilerde kullanılan malzemelerin, çalışma ortamında kullanılan kimyasallardan korumaya uygun malzemeler olması önemlidir. Kimyasal koruyucu giysilerde, kimyasal maddelere dayanıklı doğal kauçuk, nitril kauçuk, bütül kauçuk, neopren, PVC, PVA gibi polimer ve kompozitler kullanılmaktadır. Kullanım açısından, tekrar kullanılabilir ve tek kullanımlık olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Tek kullanımlık olanlar –kendi içinde çok farklı performans özellikleri göstermekle birlikte- dokusuz yüzey teknolojileri ile elde edilmektedir. Tekrar kullanılabilir lamine ürünler, farklı risklere (ısı-alev-biyolojik) karşı da koruyucu olabilen farklı bileşenler içermektedir (Raheel, 1994; Forsberg vd., 2020; Sevindik & Kutlu, 2022, Van Wely, 2017).

Giysinin Tipi ve Yapısı

Kimyasal koruyucu giysilerin kaplama kalınlığındaki hatalar, dikiş yerleri ve fermuarlar vb. kimyasalın permeasyon ve penetrasyonuna neden olarak giysinin koruma özelliğini etkilemektedir. Bu nedenle birleştirme yerlerine özen gösterilmeli örneğin geçirmeyi engelleyen tipte dikişler uygulanmış olmalıdır. Permeasyon kalınlık ile ters orantılı olduğundan kalınlığın azalması kimyasalın koruyucu giysiye nüfuz etme süresinin kısılmasına neden olmaktadır. En iyi kimyasal dirence sahip malzemeler bile kesilip, delinip, yırtıldığında veya herhangi bir şekilde hasara uğradığında etkisiz hale gelmektedir. Bu nedenle kimyasal koruyucu giysilerde ihtiyaç duyulan diğer özellikler koruyucu giysi seçimi sırasında değerlendirilmelidir. Bunlar, aşınma mukavemeti, kesilme mukavemeti, delinme mukavemeti, yırtılma mukavemeti, kopma mukavemeti, ortam sıcaklığının etkisine (aşırı soğuk / aşırı sıcak) dayanım, güç tutuşurluk olarak sıralanabilir (Raheel, 1994; Forsberg vd.,2020; Van Wely, 2017):

Çevre Koşulları

Artan sıcaklık ile permeasyon oranı artarken kimyasalın nüfuz etme süresi düşmektedir. Kimyasal koruyucu giysilerin artan sıcaklıktan etkilenme derecesi, kimyasal/giysi malzemesi türlerine göre değişim göstermektedir. Ayrıca artan sıcaklık ve nem, özellikle tekrar kullanılabilen giysilerde kullanım sırasında ısı stresinin artmasına neden olmaktadır (Van Wely, 2017; Forsberg vd., 2020).

KİMYASAL KORUYUCU GİYSİLERİN TEMİZLENMESİ

Kimyasal koruyucu giysilerin temizlenmesi ile ilgili prosedür, giysi ile birlikte verilen kullanım bilgileri arasında bulunmaktadır. Bununla birlikte, temizlenmesi işlemi ile, kimyasalların zarar vermeyecek düzeyde temizlenemediği durumlarda giysinin koruyucu performansında, kullanılmamasını gerektiren ciddi düşüşler olmaktadır.

Kimyasal koruyucu giysilerde iki tip kirlenme söz konusu olmaktadır: yüzey kirlenmesi ve matris kirlenmesi. Yüzey kirliliğinin temizlenmesi, matris kirlenmesine göre nispeten daha kolay olmaktadır. Matris kirlenmesi durumunda, kirlenici kimyasal koruyucu giysinin dış kısmında çözünmektedir ve sonrasında malzemenin içine dağılmaktadır. Bu durum kirlenmenin ortadan kaldırılmasını zorlaştırmaktadır. Giysilerin tekrarlı kullanımlarında ise kirlenmenin

uzaklaştırılması daha da güç hale gelmektedir. Ek olarak, temizleme işlemleri koruyucu giysi malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek kimyasalların giysiden geçiş süresi (BT) ve sabit durum geçirgenlik oranında (SSPR) değişikliklere neden olabilmektedir (Gao, El-Ayouby ve Wassell, 2005). Kimyasallar koruyucu giysiye nüfuz etmeye başladıktan sonra kimyasal koruyucu giysinin matrisinde-iç tabakalarında birikmektedir ve giysi temizleme işleminden geçtiğinde bile matris kirlenmiş olan kimyasallar giysinin iç yüzeylerine nüfuz etmeye devam etmektedir (Raheel, 1994; Van Wely, 2017; Gao, Tomosovic ve Stein, 2011). Bu nedenle tekrar kullanılan kimyasal koruyucu giysiler, kullanıcının herhangi bir kalıntı kimyasala maruz kalmayacağı şekilde temizlenmelidir. Bu giysilerin uygun olmayan temizleme yöntemleri ile temizlenmesi ya da yeterli derecede temizlenmemesi, ciddi sağlık ve çevre sorunlarına sebep olabilmektedir. Eğer kimyasal koruyucu giysi etkili bir şekilde temizlenemezse, atılmalı ve yeni kimyasal koruyucu giysi kullanılmalıdır (Protective clothing and equipment committee, 2005; Holtz, 2011, Van Wely, 2017).

Kimyasal koruyucu giysilerin kullanım ömürleri ve kimyasal koruyucu giysilerin bertaraf edilmesi gereken durumlar hakkında bilgi sahibi olunması önemlidir. Bazı kimyasal koruyucu giysiler ozon, ısı vb sebeplerle malzemenin degradasyona uğraması sonucu sınırlı raf ömrüne (kullanım öncesi depolama) sahip olabilmektedirler. Eğer kimyasal koruyucu giysi geri dönülemez şekilde kirlendiyse veya kullanım sırasında hasara uğradıysa giysi kullanılamaz hale gelebilmektedir (Gao, El-Ayouby & Wassell, 2005; Forsberg vd., 2020).

KİMYASAL KORUYUCU GİYSİLER İÇİN TEST YÖNTEMLERİ

Kimyasal koruyucu giysilerin seçiminde dikkat edilecek kriterler çeşitli testlerde değerlendirilmektedir. Kimyasal koruyucu giysinin malzemesinin koruyucu olması yanında giysi halinde kullanımında da herhangi bir geçişe izin vermemesi önemlidir. Kimyasal direncini belirleyen ölçümler ile giysinin bir bütün halinde sızdırmazlığının ve koruyuculuğunun belirlenmesi için farklı testler yapılmaktadır. ISO 16602 standardında Avrupa tipi kimyasal koruyucu giysi sınıflarına göre yapılması gereken testler Tablo 1’de verilmiştir. Avrupa tipi sınıflandırma, hangi vücut bölümünün korunacağı ve nüfuz etmeden koruma düzeylerine göre yapılan EN ve ISO standartlarında geçerli olan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmada giysiler, gaz geçirme (1a-b-c: gaz sızdırmaz, 2:gaz sızdırır), sıvı geçirme (3:basıncılı sıvı, 4:sprey), partikül geçirme (5), düşük maruziyet-sıvıdan koruma (6) özelliklerine göre 6 ana tipe ayrılmaktadır (ISO 16602, 2007; Sevindik & Kutlu, 2022).

Tablo 1. Kimyasal Koruyucu Giysi Tiplerine Göre Testler (ISO 16602)

Genel Performans	Özel Performans Testleri	Kimyasal Koruyucu Giysi Tipleri							
		1a	1b	1c	2	3 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a
Kimyasal koruyucu giysinin bileşenlerinin bütünlüğü	Sızdırmazlık testi	X	X	X	-	-	-	-	-
	İçe sızıntı testi	-	X ^b	X	X	-	-	-	-
	Sıvı jet testi	-	-	-	-	X	-	-	-
	Sıvı sprej testi	-	-	-	-	-	X	-	-
	Katı aerosol içe sızıntı testi	-	-	-	-	-	-	X	-
Sınırlı düzeyde sıvı sprej testi	-	-	-	-	-	-	-	X	
Kimyasal koruyucu giysi malzemelerinin kimyasal dayanımı ^c	Permeasyon testi	X	X	X	X	X	X	-	-
	Basınc altında sıvı penetrasyon testi	-	-	-	-	-	X ^d	-	-
	Parçacık penetrasyon dayanımı testi	-	-	-	-	-	-	- ^e	-
	Sıvı penetrasyon dayanımı testi	-	-	-	-	-	-	-	X
Sıvı iticilik testi	-	-	-	-	-	-	-	X	

a Kimyasal koruyucu giysi gövde, kollar ve bacakları korumadığında tip 3, tip 4, tip 6 vücutu kısmi olarak koruyan giysiler için sadece ilgili tipteki malzeme kimyasal dayanım testlerinin gerekliliklerini sağlamalıdır.

b Tip 1b kimyasal koruyucu giysiler yüz koruyucu kalıcı olarak giysiye bağlı değilse kullanılmaktadır.

c Kimyasal dayanım testleri tip 5 ve tip 6 kimyasal koruyucu giysilerinin dikişlerine uygulanmamaktadır.

d Permeasyon dayanımı testi de basınç altında sıvı kimyasal dayanımı testi de kullanılabilir.

e Katı parçacıklara karşı koruma sağlayan kimyasal koruyucu giysilerin değerlendirilmesinde bu test önerilmemektedir.

Kimyasallardan Koruyucu Giysilerin Bütünlüğünün Sızdırmazlığının Ölçülmesine Yönelik Testler

Sızdırmazlık Testi

Bu test yönteminde gaz sızdırmaz kimyasal koruyucu giysi malzemesinin şişirme işleminden sonra esnemesinden dolayı delik, yarıklar ve yırtıklar gibi küçük kusurlar tespit edilerek içerideki havanın dışarı sızıp sızmadığı durumu değerlendirilmektedir.

Giysi belirlenen basınca şişirildikten sonra, hava sızıntısının miktarı, belli bir süre sonraki basınç kaydedilerek değerlendirilir. İki farklı basınç testi bulunur. İlk yöntem minimum iç basınç testi olarak kabul edilir ve 1250 Pa'lık bir şişirme basıncı kullanılır. İkinci yöntem ise gaz sızdırmazlık özelliğinin daha güvenilir bir şekilde ölçülmesini sağlar ve 1750 Pa'lık basınç kullanılmaktadır. Kimyasal koruyucu giysilerde sızıntının belirlenmesi için giysi şişirilmektedir ve sabun-su çözeltisiyle silindikten sonra gözlemlenmektedir. Bulunan tüm sızıntı yerleri onarılmaktadır ve onarılan kimyasal koruyucu giysilerin yeniden şişirilerek test edilmesi gerekmektedir (ISO 17491, 2012).

Bu test tip 1a, tip 1b ve tip 1c kimyasal koruyucu giysiler için yapılmaktadır. Giysilerde basınç ile şişirme işleminden sonra % 20 den fazla basınç düşmesi olmamalıdır. Sızdırmazlık testinin en az iki kimyasal koruyucu giysinin üzerinde yapılması gerekmektedir (ISO 16602, 2007).

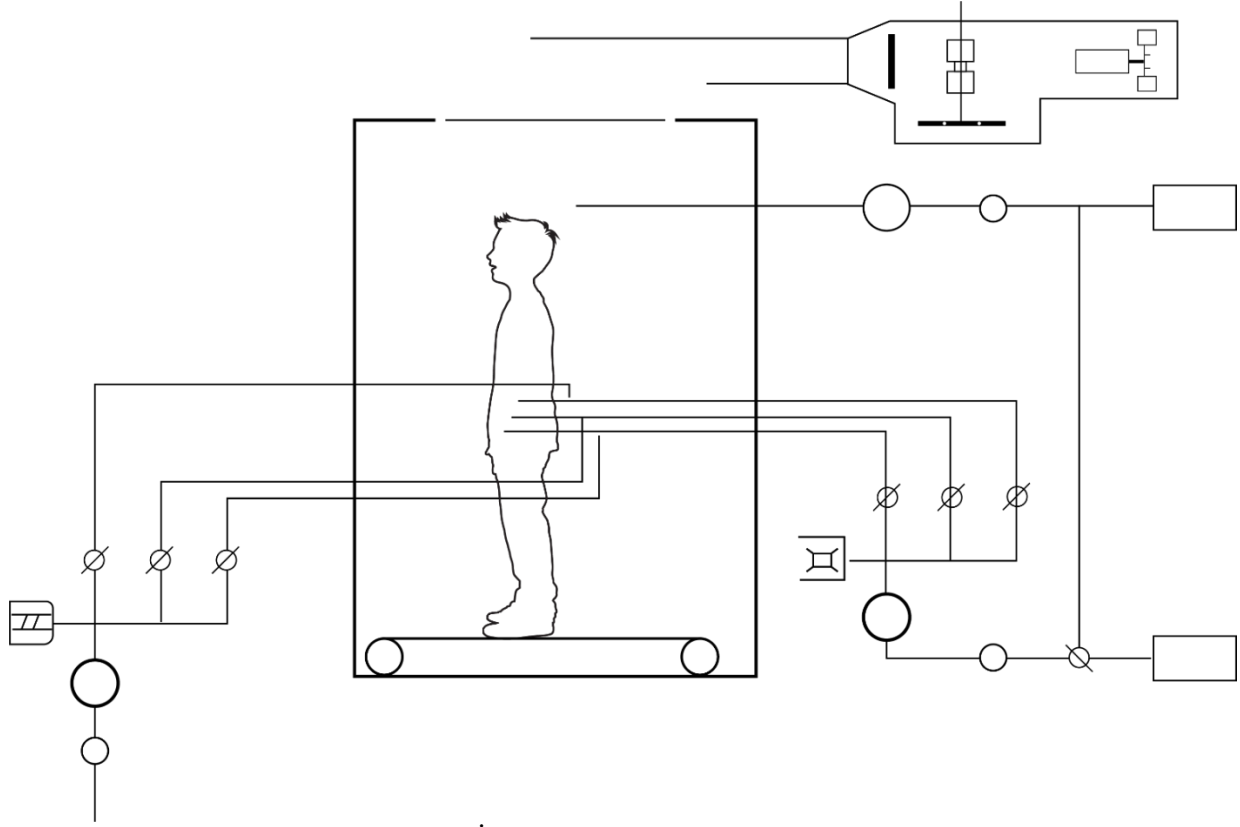
Aerosol ve Gazlar İçin İç Sızdırmazlık Testi

Kimyasal koruyucu giysiyi giyen denek test odasına girer ve test odasındaki tüp örneklem noktalarına bağlanır. Denek test odasında bir yürüme bandı üzerinde ayakta durma, yürüme ve çömelme gibi bir dizi hareket gerçekleştirir. Aynı zamanda yürüme bandı üzerinde sabit konsantrasyonda deney sıvısı akmaktadır. Hareketler esnasında dedektör ile giysi içindeki konsantrasyon ölçülür. Ölçülen konsantrasyon giysinin iç sızıntısıdır.

Aerosoller için kullanılan metotta deney sıvısı sodyum klorürdür. Gazlar için kullanılan metotta ise sülfür hekzaflorür deney kimyasalıdır. Her iki metotta, tip 1c ve tip 2 kimyasal koruyucu giysiler, % 0,05'ten daha büyük bir iç sızıntı göstermemelidir.

Yüz maskesi kimyasal koruyucu giysi ile kalıcı bir şekilde birleştirilmediğinde, tip 1b kimyasal koruyucu giysiler, sızıntıya karşı test edilmeli ve maskenin göz oyuntusu için olan boşlukta % 0,05'ten daha büyük bir iç sızıntı olmamalıdır. En az iki kimyasal koruyucu giysi üzerinde iç sızıntı testinin yapılması gerekmektedir (ISO 16602, 2007).

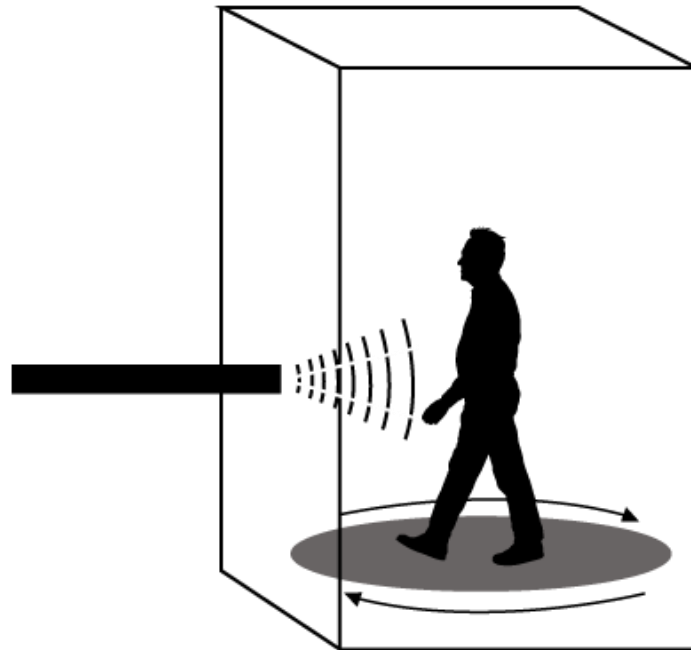
ISO 13982-2 standardına göre katı aerosol sızdırma testinde, sodyum klorür aerosolünün bulunduğu bir test odasında koruyucu giysiyi giyen denek yürüme bandında ayakta durma, 5 km/s hız ile yürüme ve çömelme hareketi yapmaktadır (Şekil 1). Kıyafet içindeki her örneklem noktasında iç sızıntı alev fotometrisi ile ölçülmektedir. Elbise içindeki konsantrasyonun ölçülmesi için üç test çubuğu deneğin gövdesine yakın şekilde göğsünün sağ tarafı, bel arkası ve dizine yerleştirilmiştir (ISO 13982-2, 2004). Örneklem noktalarındaki iç sızma yüzdesi, giysi ve denek başına toplam iç sızma miktarı, her hareket ve örneklem noktasındaki iç sızıntı ve ortalama toplam sızıntı hesaplanmalıdır (ISO 13982-2). On giysi test edilmeli ve bunların sekiz tanesinde toplam iç sızma miktarı %15'ten düşük olmalıdır (ISO 13982-2).



Şekil 1. Katı Aerosol İçe Sızıntı Test Düzeneği (ISO 13982-2, 2004)

Sıvı Jet Testi

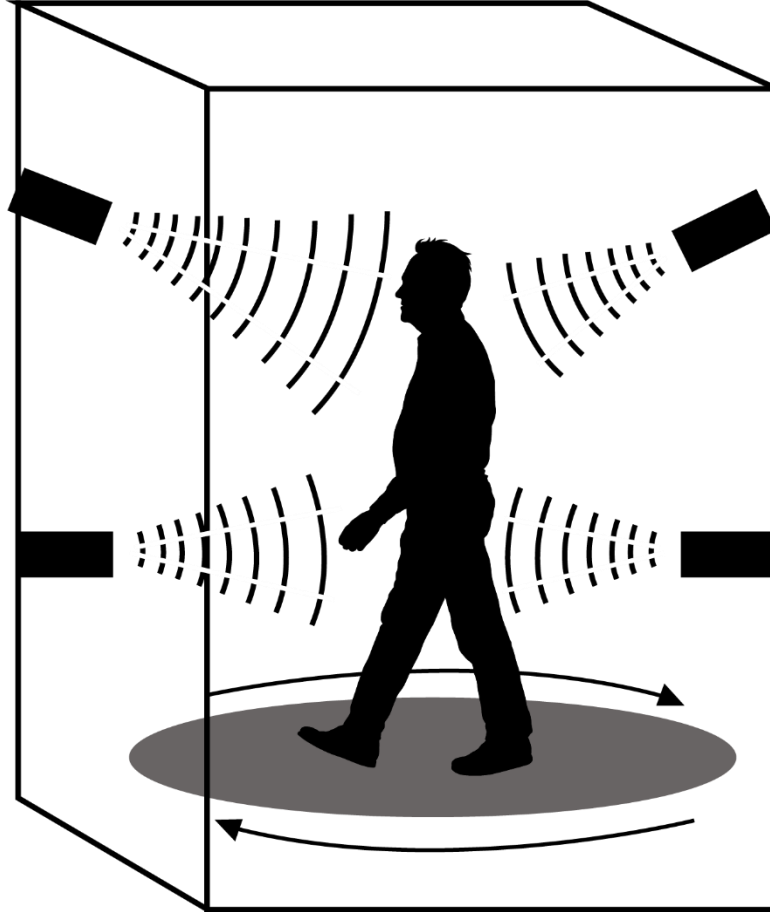
Boya içeren basınçlı su (sıvı jet) kimyasal koruyucu giysiyi giyen bir test mankenini üstündeki her bir noktaya 5 saniye olacak şekilde püskürtülmektedir. Jet test mankeninden 1 metre uzakta bulunmalıdır. Giysi iç yüzeyi ve giysinin içine giyilen emici giysilerin dış yüzeyinin incelenmesi ile iç sızıntı noktalarının belirlenmesi sağlanmaktadır (ISO 16602, 2007). Tip 3 kimyasal koruyucu giysiler jet testi kullanılarak sıvı penetrasyonu direnci için test edildiğinde penetrasyon, toplam kalibre leke alanının ($2,0\text{cm}^2$) üç katından fazla olmamalıdır (ISO 16602, 2007) (Şekil 2).



Şekil 2. Sıvı Jet Test (Zimová, 2011)

Sıvı Sprey Testi

Boya içeren sprej test mankeni üzerindeki giysiye püskürtülmektedir. Bu test bir dakika süre veya otuz dakika süre ile yapılabilmektedir (ISO 17491, 2012). Kimyasal koruyucu giysi sprej test ile düşük düzey sıvı penetrasyon dayanımı için test edildiğinde, spreje maruz kalma süresi bir dakika olmaktadır. Otuz dakika süre için yapılan test daha yüksek sprej dayanımı gerektiğinde kullanılmaktadır (ISO 17491, 2012). Giysinin iç yüzeyi ve içine giyilen giysinin dış yüzeyi incelendiğinde sızıntı noktaları belirlenebilmektedir. Penetrasyon miktarı toplam kalibre leke alanın (2,0cm²) üç katından fazla olmamalıdır (ISO 16602, 2007) (Şekil 3).



Şekil 3. Sıvı Sprej Test (Zimová, 2011)

Kimyasallardan Koruyucu Giysi Malzemelerinin Kimyasal Dayanım Özelliklerinin Ölçümüne Yönelik Testler

Permeasyon Testi

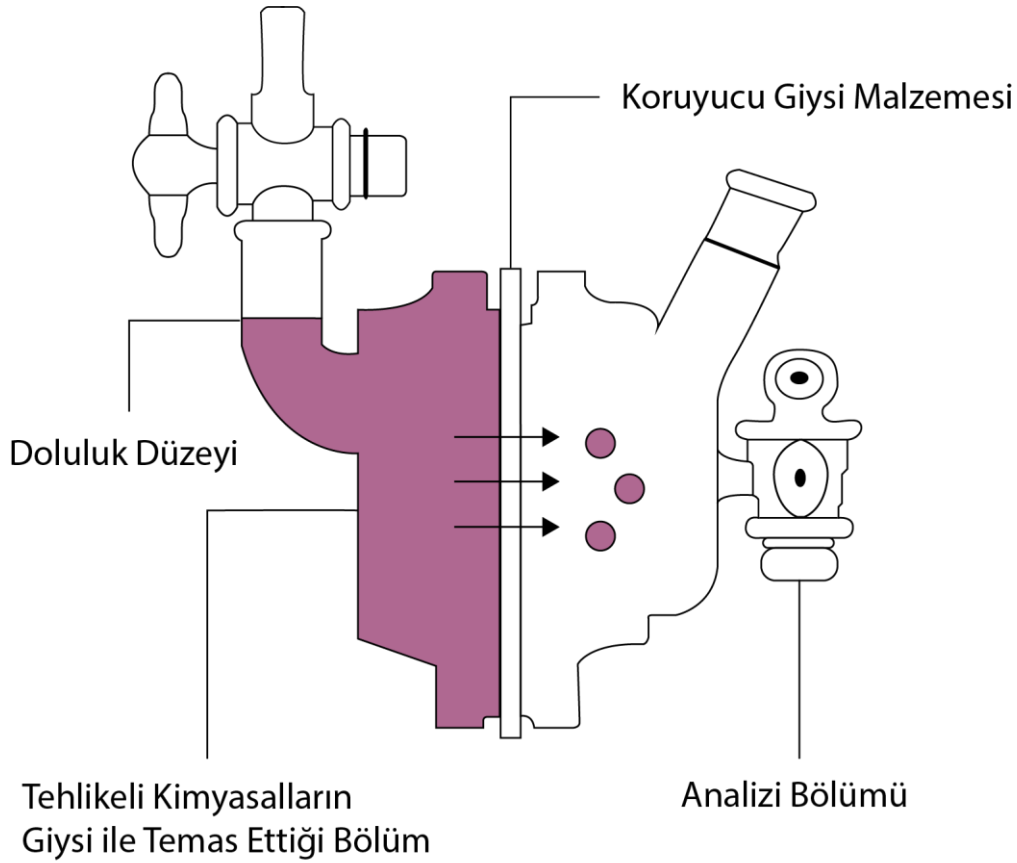
Bu test koruyucu giysilerde kullanılan malzemelerin sürekli veya aralıklı temas koşulları altında sıvı veya gaz kimyasallara karşı dayanımının belirlenmesi için yapılmaktadır (ISO 6529, 2013). Permeasyon testi Tip 1,2,3 ve 4 kimyasal koruyucu giysiler için uygulanmaktadır.

Metot A: Koruyucu giysi materyali ile sürekli temas halinde olması beklenen, suda çözülebilen veya uçucu olan test kimyasalları için kullanılan yöntemdir.

Metot B: Koruyucu giysi materyali ile sürekli temas halinde olması beklenen gaz haldeki test kimyasalları için kullanılan yöntemdir.

Metot C: Koruyucu giysi materyali ile aralıklı olarak temas halinde olması beklenen suda çözülebilen veya uçucu olan sıvı test kimyasalları için kullanılan yöntemdir.

Şekil 4' de permeasyon test hücresinin şematik gösterilişi bulunmaktadır (Frosberg vd., 2020; ISO 6529, 2013; Van Wely, 2017).

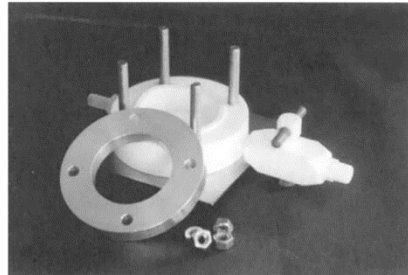


Şekil 4. Permeasyon Test Hücresinin Şematik Gösterilişi (Forsberg vd., 2020)

Test hücresi koruyucu giysi materyali tarafından bölünen iki yarım küreden oluşmaktadır. Test hücresinin bir yarısı kimyasalın koruyucu giysi malzemesine temas ettiği kısım olarak işlev görmektedir. Diğer kısım ise koruyucu giysi malzemesinden kimyasalın geçişini göstermek için toplama kısmı olarak kullanılmaktadır. Permeasyon testinin en önemli amacı kimyasal maruziyetin başından kimyasalın ilk tespitine kadar geçen süre (breakthrough time) (BT), geçirgenlik oranı (SSPR) ve kümülatif permeasyonun belirlenmesidir (Forsberg vd., 2020).

Basınç Altında Sıvı Penetrasyon Testi

Basınç altında sıvı penetrasyon testinde, penetrasyon test hücresi kullanılarak koruyucu giysi malzemesi basınçlı sıvı test kimyasalına maruz bırakılmaktadır (Şekil 5). Penetrasyonun daha kolay fark edilebilmesi için sıvı kimyasala boya eklenmiştir. Testin yapıldığı süre boyunca veya testin sonunda koruyucu giysi malzemesi gözlemlenmektedir. Koruyucu giysi malzemesinde herhangi bir sıvı görülürse veya karakteristik bir renk değişikliği olursa test başarısız olmaktadır. Eğer test süresince herhangi bir sıvı veya karakteristik renk değişikliği yok ise malzemenin testi geçtiği anlamına gelmektedir. Kimyasal ile temas süresi ve uygulanan basınç miktarı farklılık gösterebilmektedir (ISO 13994, 2005; Henry ve Stull, 2003). Bu test yöntemi, çeşitli durumlarda tehlikeli sıvı kimyasallara maruz kalmayı sınırlandıran koruyucu giysi malzemelerini tanımlamak için kullanılmaktadır. Özellikle mikro gözenekli kumaşların sıvı tutma özelliklerini göstermek için yararlı olmaktadır (Henry ve Stull, 2003).

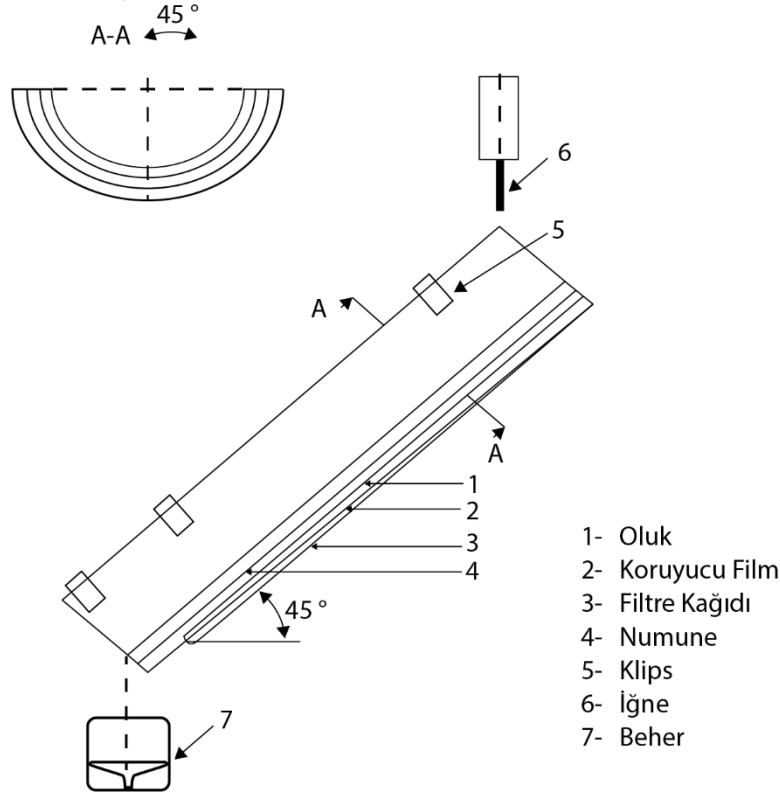


Şekil 5. Basınç Altında Sıvı Penetrasyon Test Cihazı (Henry ve Stull, 2003)

Sıvı Penetrasyon Testi

Bu yöntem ile sadece tip 6 düşük maruziyet giysileri test edilmektedir. Bu test özellikle düşük uçuculuğa sahip sıvı kimyasal maddelerin düşük basınçlı ve düşük hacimli sıçramalara karşı kimyasal koruyucu giysi malzemelerinde nüfuziyet, absorpsiyon ve geçirmezlik indislerini ölçmek için kullanılmaktadır.

45° derece eğimli bir olukta giyecek malzemesinin yüzeyine deney sıvısı 1cm³/s hızında sıringa ile püskürtülmektedir. Deney parçasına nüfuz eden ve yüzeyi tarafından itilen kimyasalın miktarı belirlenmektedir. Her deney parçası ve her deney sıvısı için nüfuziyet, absorpsiyon ve geçirmezlik indisleri hesaplanmaktadır (ISO 6530, 2005). Test düzeneği Şekil 6'da gösterilmektedir. Kullanılan deney sıvıları; sülfürik asit, sodyum hidroksit, bütan-1-ol, o-ksilen'dir (ISO 6530, 2005).



Şekil 6. Gutter Test Düzeneği (ISO 6530, 2005)

SONUÇ

Kimyasal koruyucu giysilerin seçiminin çalışma ortamında kullanılan kimyasal madde türleri, kimyasallara maruz kalma şekli ve süresi, koruyucu giysi malzemelerinin, giysinin tipi ve yapısı ile çevre koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu faktörlerin anlaşılması, giysilerin çalışılan iş ortamına göre uygun şekilde seçilmesinde yol gösterici olmaktadır. Kullanım sırasında maruz kalmakta olduğu koşullardan ve temizleme işlemlerinden sonra, giysilerin performans özelliklerinin değişebilirliği, kullanımının devam etmesi durumundaki riski göstermektedir. Bu makalede kimyasal koruyucu giysilerin seçimi için iş yerinin ve kimyasalların öncelikli risk analizi sonrasında ihtiyaç duyulan kimyasal koruyucu giysinin belirlenmesi için göz önüne alınması gereken faktörler anlatılmıştır. Ardından giysilerin temizlenmesi ve temizleme işleminin sonucunda giysinin giyilebilirliğinin değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Kimyasal koruyucu giysilerin seçiminde ve kullanım-temizleme sonrasında önemli olan performans özelliklerinin neler olduğu ve nasıl ölçüldüğü açıklanmıştır.

KAYNAKLAR

Forsberg, K., Van den Borre, A., Henry III, N., & Zeigler, J. P. (2020). *Quick selection guide to chemical protective clothing (7th Ed.)*. John Wiley & Sons Inc.

Gao, P., El-Ayouby, N., & Wassell, J. T. (2005). Change in permeation parameters and the decontamination efficacy of three chemical protective gloves after repeated exposures to solvents and thermal decontaminations. *American journal of industrial medicine*, 47(2), 131-143. <https://doi.org/10.1002/ajim.20121>

- Gao, P., Tomasovic, B., & Stein, L. (2011). Performance evaluation of 26 combinations of chemical protective clothing materials and chemicals after repeated exposures and decontaminations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(11), 625-635. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.616161>
- Henry, W.H., Stull, J.O. (2003). Test methods & standards. In Anna, D.H (Ed.), *Chemical Protective Clothing* (pp.175-268). USA: American Industrial Hygiene Association.
- Holtz, L. A. (2011). Change in permeation rates of acids and bases through limited use protective fabrics after repeated wash cycles. Master's thesis. The University of Texas, Austin.
- ISO 13982-2. Protective clothing for use against solid particulates—Part 2: Test method of determination of inward leakage of aerosols of fine particles into suits. International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2004).
- ISO 13994. Clothing for protection against liquid chemicals — Determination of the resistance of protective clothing materials to penetration by liquids under pressure. International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2005).
- ISO 16602. Protective clothing for protection against chemicals: classification, labeling and performance requirements. International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2007).
- ISO 6530. Gutter test method for measuring protection against hazardous chemical liquids. International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2008).
- ISO 17491. Protective clothing-Test methods for clothing providing protection against chemicals. International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2012).
- ISO 6529. Protective clothing -Protection against chemicals-Determination of resistance of protective clothing materials to permeation by liquids and gasses.International Organization for Standardization, & International Organization for Standardization. (2013).
- Protective Clothing, & Equipment Committee. (2005). *Guideline for the Decontamination of Chemical Protective Clothing and Equipment* (Vol. 6). AIHA.
- Raheel, M. (1994). *Protective Clothing Systems and Materials*. CRC Press LLC.
- Scott, R.A. (Ed.). (2005). *Textiles for Protection*, CRC Press LLC.,
- Sevindik, D., Kutlu, B. (2022). Chemical Protective Workwear Part 1: Classification of Chemical Protective Workwear, Materials and Pass Through Mechanism of Chemicals. *Nonwoven Technical Textiles Technology*. 73 (July), 56-63.
- Van Wely, E. (2017). Current global standards for chemical protective clothing: how to choose the right protection for the right job?. *Industrial health*, 55(6), 485-499. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2017-0124>
- Zimová, M. (2011). *Hodnocení Ochranných Vlastností Profesionálních Oděvů*. (Lisans Tezi). Technická Univerzita V Liberci, Liberec.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.11.2022
Kabul Tarihi : 20.08.2023

Received Date : 21.11.2022
Accepted Date : 20.08.2023

SAYDAM BETONUN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

LIGHT TRANSMITTING CONCRETE PRODUCTION

İlker Bekir TOPÇU¹ (ORCID: 0000-0002-2075-6361)
Recep KURAL^{2*} (ORCID: 0000-0002-8280-9385)

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye
² Sinop Üniversitesi, Boyabat Meslek Yüksekokulu, Emlak Yönetimi Bölümü, Sinop, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Recep KURAL, repec_kural@sinop.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, saydam betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve doğal ışığı geçirme yoğunluğu üzerinde durulup, üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri ve oranları, betonu üreten şirketler ve uygulama örnekleri hakkında bilgi verilmiştir. Sonuç olarak, ışık geçirme özelliğine sahip malzemeler (optik fiberler, kauçuk, cam vb.) arasında en çok tercih edilenin optik fiberler (cam optik fiber, plastik optik fiber vb.) olduğu, bunların beton içerisinde farklı yerleşimleri ve yerleşim doğrultularının, farklı lif oranlarının ve lif çaplarının, saydam betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilediği gözlenmiştir. Son on yılda yapılan araştırmaları incelediğimizde çoğunun betonun ışık geçirme özelliği üzerine olduğu, estetik açıdan yapılaraya katkı sağlayıcı ve enerji tüketimini azaltacağı yönünde öneriler getirildiği, fakat mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir iyileştirme çalışmaları yapılmadığı hem geopolimer beton hem de saydam malzemelerin faydalarını birleştiren beton üretimi konusunda yeterince çalışma olmadığı görülmüştür. Bu literatür taraması ile günümüz mühendislik uygulamalarında adı çok geçen “endüstriyel atık”, “geri dönüşüm”, “sürdürülebilirlik” ve “enerji verimliliği/ekonomik” kavramları ele alınarak çevre dostu yeni bir saydam betonun tasarlanıp, üretilebileceği kanısına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Optik fiber, ışık geçiren beton, kompozit malzeme, enerji tasarrufu.

ABSTRACT

In this study, the physical and mechanical properties, durability, and natural light transmission density of transparent concrete are emphasized, and information is given about the properties and proportions of the materials used in its production, the companies producing the concrete and application examples. As a result, optical fibers (glass optical fiber, plastic optical fiber, etc.) are the most preferred materials among the materials with light transmittance (optical fibers, rubber, glass, etc.); their different placements and placement directions in concrete, different fiber ratios and fiber diameters affect the mechanical and physical properties of transparent concrete. Most of the research conducted in the last decade has focused on the light transmittance of concrete, suggesting that it will contribute to the structures aesthetically and reduce energy consumption, but no improvement studies have been made on its mechanical properties; and there is not enough information about the production of concrete that combines the benefits of both geopolimer concrete and light-transmitting materials. With this literature review, that new environmentally friendly transparent concrete can be designed and produced by considering the concepts of "industrial waste", "recycling", "sustainability" and "energy efficiency/ saving", which are mentioned a lot in today's engineering applications.

Keywords: Optical fiber, transparent concrete, composite material, energy conversion.

GİRİŞ

Saydam beton, yapılarda enerji tüketimini azaltarak yapıların sürdürülebilirliğine katkı sağlayan, arkasındaki objelerin görüntülerini, hareketlerini, renklerini ön yüze geçiren, özel hazırlanmış kalıpların içerisine uzun doğrultuda ve düzenli şekilde yerleştirilen ışık geçirme özelliğine sahip malzemeler (optik fiberler, kauçuk, cam vb.) (Şekil 1 (a)) ile çimento, su, ince agrega ve gerekli ise katkı maddesi kullanılarak üretilen kompozit bir malzemedir (Şekil 1 (b)) (Çakmak, 2012; Emanet, 2022; Shen ve Zhou, 2021). İlk olarak 2001 yılında Macar Mimar Aaron Losonczy tarafından icat edilmiş ve geliştirilmiştir. Losonczy, 600x300 mm boyutlarında kalıp içerisine %96 oranında beton, %4 oranında optik fiber yerleştirerek, basınç dayanımı 50 MPa eğilme dayanımı 7 MPa ve yoğunluğu 2100-2400 kg/m³ olan saydam betonu üretmiş ve 2002 yılında patent almıştır. Beton üretimi ve satışı için de 2004 yılında Litracon firmasını kurmuştur [1-3]. Dünyanın ilk ticari olarak temin edilebilen saydam betonu (Litracon Classic) Şekil 1 (c)'de gösterilmiştir (Litracon, 2022).



Şekil 1. (a) Ahşap Kalıba Yerleştirilen O.F. (Subathra ve Sangeetha, 2020), (b) Saydam Beton (Shen ve Zhou, 2021), (c) Litracon Classic (Litracon, 2022)

Saydam beton üretiminde kullanılan malzemelerle ilgili çok sayıda araştırmalar ve deneyler yapılmıştır. Bittis, saydam beton üretiminde kullandığı optik cam liflerini bir dokuma haline getirerek kalıba yerleştirmiştir. Böylelikle liflerin çizgisel ve düzgün olarak yerleşmesini sağlamıştır. Italcementi Group, 2010 yılında önceden şekillendirilmiş reçineyi ince taneli betona katarak yeni bir saydam beton üretmiştir. Bu ürünleri de Şangay'daki bir fuarda (Shanghai Expo) İtalyan Pavyonu'nda (Italian Pavilion) kullanmıştır (Şekil 2) (Emanet, 2022).



Şekil 2. İtalyan Pavyonu'nun Dış Ve İç Görünümü (Şangay Expo) (Italcementi Group, 2022).

Li vd. (2012); Li, Li ve Guo (2015), optik fiberleri, döküm kalıbı kullanarak ve eşit bir şekilde betona gömerek, daha yüksek bir ışık geçirgenliğine ulaşılabileceğini, ayrıca optik fiber içeriği arttığında basınç mukavemeti ve eğilme dayanımı arasındaki oranın arttığını gözlemlemişlerdir. Spiesz, Rouvas ve Brouwers (2016), yapmış olduğu araştırma sonuçları da saydam betonun iyi mekanik özelliklere, ışık geçirgenliğine ve dayanıklılığa sahip olabileceğini göstermiştir. Ahuja ve Mosalam (2017), saydam beton içerisine %6 oranında optik fiber yerleştirerek sistemin %50 oranında enerji tasarrufu sağladığını, Tuam vd. (2019) ise %6 oranında optik fiber yerleştirilerek üretilen betonun sadece ışığın geçmesine izin vermediğini, aynı zamanda betonun dayanımını da arttırdığını belirtmişlerdir.

Tahwia vd. (2021) yılında yapmış olduğu çalışmada, 2 mm çaplı plastik optik fiberin, %4 oranlarında beton karışıma katılmasıyla elde edilen saydam betonun (basınç dayanımı 48 MPa), doğal ışık kullanıldığında %21,35 oranında, yapay ışık kullanıldığında ise %24,7 oranında ışık geçirdiği görülmüştür.



Şekil 3. (a) Atık Cam İçeren Saydam Beton Panel (Pilipenko vd., 2018). (b) Polimer Reçine İçeren Saydam Beton Panel (Emanet, 2022).

Üretimde kullanılan optik fiberlerin çapları genelde 2 μm ve 2 mm arasında olup ışığı yaklaşık 15 metre (50 fit) uzaklığa iletebilmektedirler. Optik fiberlerin beton içerisinde farklı yerleşimleri ve yerleşim doğrultuları, farklı lif oranları ve lif çapları, saydam betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir (Bajpai, 2013) . Optik fiberlerin maliyetinin yüksek ve uygulanmasının karmaşık olması nedeniyle atık cam, reçine gibi daha ekonomik malzemeler kullanılarak saydam beton üretimleri de yapılmıştır (Şekil 3 (a,b)).

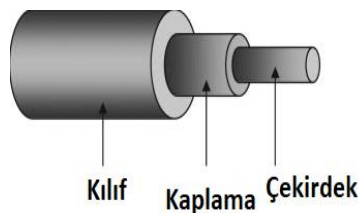
Bu çalışma ile ışık geçirme özelliğine sahip malzemeler (optik fiberler, kauçuk, cam vb.) kullanılarak üretilen saydam betonlarla ilgili son gelişmeleri derleyip literatüre kazandırmak amaçlanmıştır. Ayrıca günümüz mühendislik uygulamalarında adı çok geçen “endüstriyel atık”, “geri dönüşüm”, “sürdürülebilirlik” ve “enerji verimliliği/ekonomik” kavramlarını bir arada bulunduran çevre dostu yeni bir saydam beton üretiminin mümkün olup olmadığını tartışmaktadır.

IŞIK GEÇİRME ÖZELLİĞİNE SAHİP MALZEMELER

Optik Fiberler

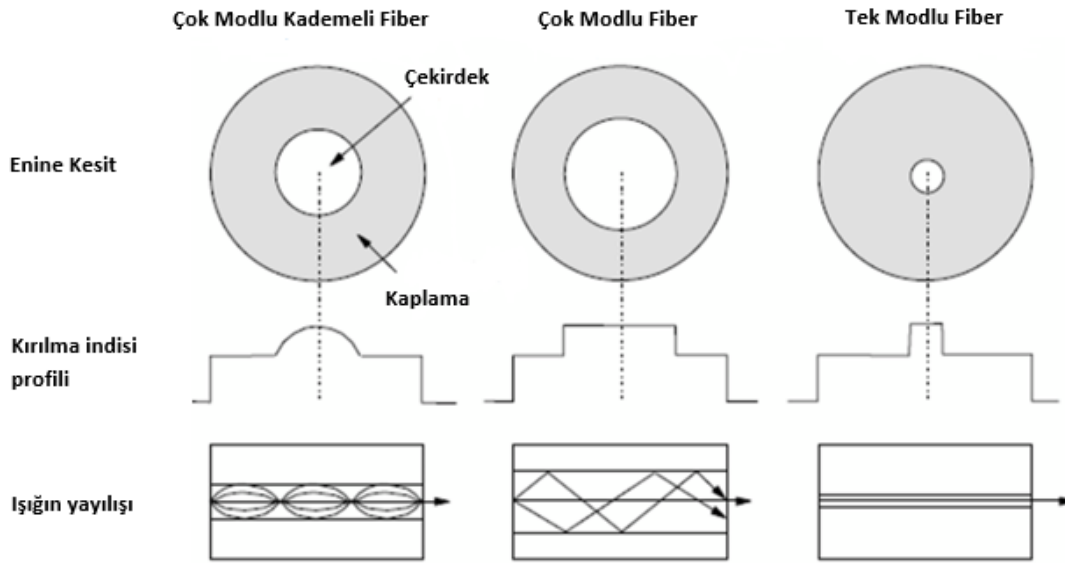
Optik fiber, bünyesindeki ışığı büyük mesafeler boyunca ışık hızında iletebilen, insan saçından biraz daha kalın, esnek, şeffaf bir malzemedir. Tıpta, iletişimde, dekoratif tekniklerde, lazerlerde vb. hayatın birçok alanında kullanılmaktadır. Saydam beton üretimde de en çok tercih edilen malzemedir (Zielińska ve Ciesielski, 2017). Üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 4) (Silalahi, 2023).

- 1) **Çekirdek:** Işık sinyalinin bir noktadan diğerine yayılmasını sağlar. Çok yüksek kaliteli camdan yapılmıştır. 5-10 μm 'lik bir çapa sahiptir. Çekirdeğin boyutu fiber optiğin özelliklerini etkilemektedir.
- 2) **Kaplama:** Çekirdekten daha küçük bir kırılma indisine sahiptir. Sinyalin çekirdek içinde tam yansıma yaparak ilerlemesini sağlar.
- 3) **Kılıf (ceket):** Optik fiberlerin mekanik bir koruyucusu olarak işlev görür, böylece optik fiberler dıştan gelecek tehlikelere (aşınma, baskı vb.) karşı daha dayanıklı olur.



Şekil 4. Optik Fiberin Yapısı (Silalahi, 2023)

Işık, optik fiber boyunca toplam iç yansıma ile iletilir. Gelen ışın saydam bir nesneden geçtiğinde kırılma meydana gelir. Eğer gelen ışının açısı kritik açıyı aşarsa, ışık kırılma yerine yansıyacaktır. Optik fiberdeki toplam iç yansıma, çok modlu kademeli fiber, çok modlu fiber ve tek modlu fiber olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir (Şekil 5) (Chiew,2021). Tek modlu fiber optik kablo, yaklaşık 0,00035 inç veya 9 mikron çapından küçük bir çekirdeğe sahiptir. Bir seferde çekirdek boyunca yalnızca bir ışık modunun yayılmasına izin verir. Çok modlu fiber kablo ise yaklaşık 0,0025 inç veya 62,5 mikron çapındadır. Tek modlu fiber optik kablodan daha büyük bir çekirdeğe sahiptir. Bir seferde yüzlerce ışık modunun aynı anda yayılmasına izin verir. Fakat çoklu modların varlığı, fiberden çıkan ışık demetinin kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Silalahi, 2023). Çok modlu fiberlerdeki dağılımı en aza indirmek için, çekirdeğin kırılma indisi profili merkezden kenara doğru kademeli olarak azalacak şekilde tasarlanır. Böylelikle ışığın iletim yolu boyunca bükülmesini sağlayan gradyan indeksli fiberler elde edilmiş olur (Tahwia vd., 2021).



Şekil 5. Optik Fiberlerin Mod Türlerine Göre Işık Yayılımı

POF, çekirdek malzemesi olarak polistiren (PS), polimetil metakrilat (PMMA), polikarbonat (PC) ve kaplama malzemesi olarak PMMA, floroplastik gibi yüksek şeffaflığa sahip polimer içeren bir tür optik fiberdir. Saf bir cam (SiO₂) çekirdekten oluşan SOF'lar ise daha fazla ışığın içeri girmesini sağlar.

Reçine

Işık geçirme özelliğine sahip malzeme olarak polimetil metakrilat (PMMA) reçinesi, polyester reçinesi ve epoksi reçinesi gibi farklı polimer reçineleri kullanılmıştır. Polyester reçineler mükemmel mekanik özelliklere, hafifliğe, ucuzluğa, yüksek çekme mukavemetine sahiptir ve yüksek sıcaklıklara, suya, kimyasallara ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Ayrıca yüksek derecede şeffaflığa sahiptirler (Alzahrani, 2023).

SAYDAM BETON ÜRETİMİ

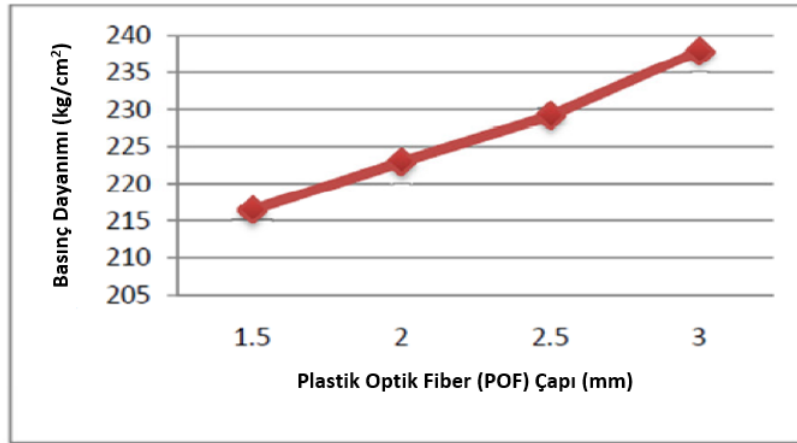
2013-2023 yılları arasında üretilen saydam beton numunelerinin ana bileşenleri ağırlıklı olarak Portland Çimentosu, maksimum tane çapı 0,6-4,75 mm olan ince agrega (kum), maksimum tane çapı 10-12 mm olan iri agrega (çakıl), optik fiberler ve sudan oluşmaktadır.

Bazı araştırmacılar; saydam betonun özelliklerini geliştirmek için optik fiberler yerine atık camlar (Spiesz, Rouvas ve Brouwers, 2016; Pagliolico vd., 2015), cam çubuklar (Kankriya, 2016), akrilik çubuklar (Kim, 2017) ve özel plastik reçineler (Valambhiya, Tuvar ve Rayjada, 2017) gibi daha ucuz ışık yönlendirici malzemeler ile çimento yerine ikame edilen silis dumanı, uçucu kül vb. puzolanlar, süperakışkanlaştırıcı vb. katkı maddeleri de kullanmışlardır.

SAYDAM BETON İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLER VE SONUÇLARI

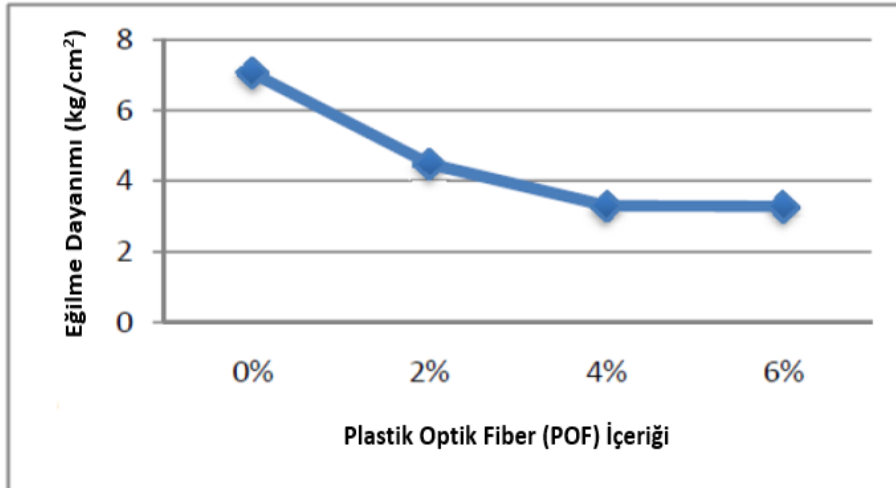
Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Belirlemeye Yönelik Testler

Saydam betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini ölçmek için eğilme ve basınç dayanımları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bashbash vd. (2013), 1,5 / 2 / 2,5 / 3 (mm) çaplarında ve %2 / 4 / 6 oranlarında plastik optik fiber kullanarak ürettikleri saydam beton üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyi yapılmış, Plastik optik fiber çapı arttıkça beton basınç dayanımının arttığı, lif içeriği arttıkça beton basınç ve eğilme dayanımının azaldığı sonucuna varılmıştır (Şekil 6 ve Şekil 7). Ayrıca beton içerisine 3 mm çapında ve %4 oranında plastik optik fiber yerleştirilerek en iyi basınç dayanım değerine ulaşılmıştır (Şekil 6) (Bashbash vd., 2013). Momin vd. (2014)'nin plastik optik fiber (200 µ çaplı) ve 0,5 mm çapındaki cam çubuklar ile ürettiği iki farklı saydam betonun basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, optik fiber ile üretilen numunenin basınç dayanımının 20-23 MPa arasında, cam çubuk ile üretilen numunenin basınç dayanımının ise 24-26 MPa arasında olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Basınç Dayanımı Sonuçları (28 Günlük) (Bashbash vd., 2013)

Luhar ve Khandelwal (2015), ürettikleri saydam betonun basınç dayanımının, geleneksel betonun basınç dayanım değerine yaklaşık olarak eşit olduğu, Kumar ve Ahlawat (2017)'in bulmuş olduğu basınç dayanım sonuçları karşılaştırıldığında ise saydam betonda geleneksel betona kıyasla neredeyse hiç dayanım kaybı olmadığı görülmektedir.



Şekil 7. Eğilme Dayanımı Sonuçları (28 Günlük) (Bashbash vd., 2013)

Diğer araştırmacıların basınç dayanım değerleri incelendiğinde beton içerisindeki optik fiber yüzdesi arttıkça 28 günlük basınç dayanımlarında azalma olduğu, optik fiberlerin yerleşimlerinin dayanım üzerinde etkisi olduğu ve düzenli ve uzun doğrultuda yerleştirilen optik fiberlerin betonun basınç dayanımını arttırdığı sonuçları çıkarılmıştır (Emanet, 2022; Valambhiya, Tuvar ve Rayjada, 2017; Li, Li ve Guo, 2015).

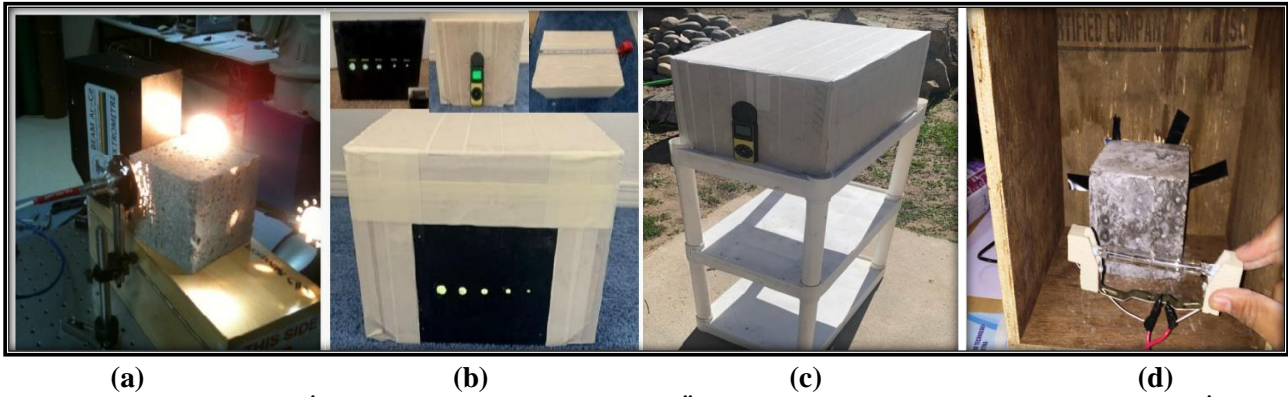
Tablo 1. Düzenli Ve Rastgele Dizilmiş POF İle Üretilmiş Beton Numuneleri Arasında Karşılaştırma Çalışması (Said, 2020).

POF içeriği %	Basınç dayanımında azalma		Eğilme dayanımında azalma	
	Düzenli olarak hizalanmış %	Rastgele hizalanmış %	Düzenli olarak hizalanmış %	Rastgele hizalanmış %
2	0	11,5	18	20,5
3,5	5	15	20	32
5	11	20	18	25,5

Son zamanlarda, Tahwia vd. (2022), 120 MPa sınıfına kadar yüksek dayanımlı saydam betonu geliştirdi, fakat bu durumda optik fiberlerin hacim içeriği sadece %1'dir. Aynı çalışmada, %2-4 hacim içeriğine sahip optik fiberler kullanıldığında basınç dayanımı 40 ila 50 MPa arasında değişmektedir. Nam vd. (2023), birçok çalışmanın aksine hacim olarak %7 'den fazla optik fiber içeriğine sahip, %50 oranında çevre dostu (uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) hammadde kullanarak, 80 MPa basınç dayanımına ve yüksek ışık geçirgenliğine sahip süperakışkanlaştırıcı içeren saydam betonu geliştirmiştir.

Işık Geçirgenlik Özelliğini Belirlemeye Yönelik Testler

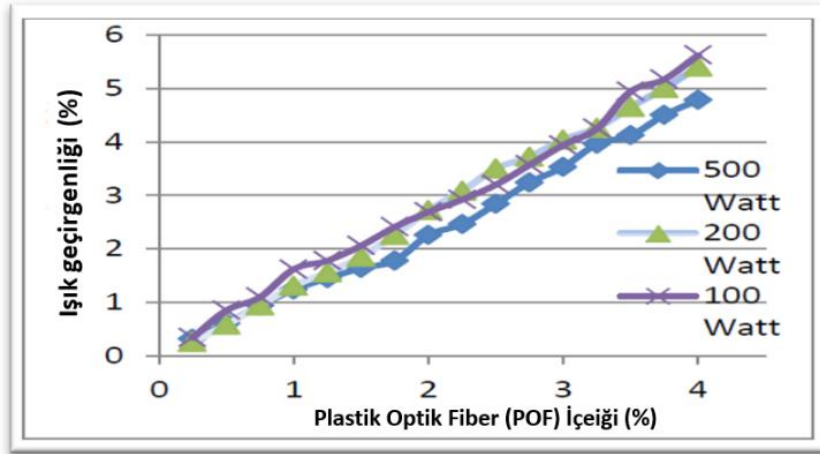
Saydam betonun ışık geçirme özelliğini incelemek için oluşturulmuş herhangi bir yönerge ve standart olmamasına rağmen araştırmacılar çeşitli değişkenler üzerinden saydam betonun ışık iletim testlerini yapmaktadırlar (Shen ve Zhou, 2021). Bu testlerle pus, kırılma indeksi, çift kırılım, geçirgenlik oranı ve yayılma gibi özellikler hesaplanmaktadır (Şekil 8). En çok kullanılanı ise geçirgenlik oranıdır (Topçu ve Uygunoğlu, 2016). Saydam betonda ışık iletimi optik fiberler veya cam, reçine gibi daha ekonomik malzemelerle sağlandığı için, bu malzemelerin ışık iletim özelliklerini anlamak, tüm saydam betonun ışık iletim özelliklerini analiz etmek için bir ön koşuldur (Huang, 2020).



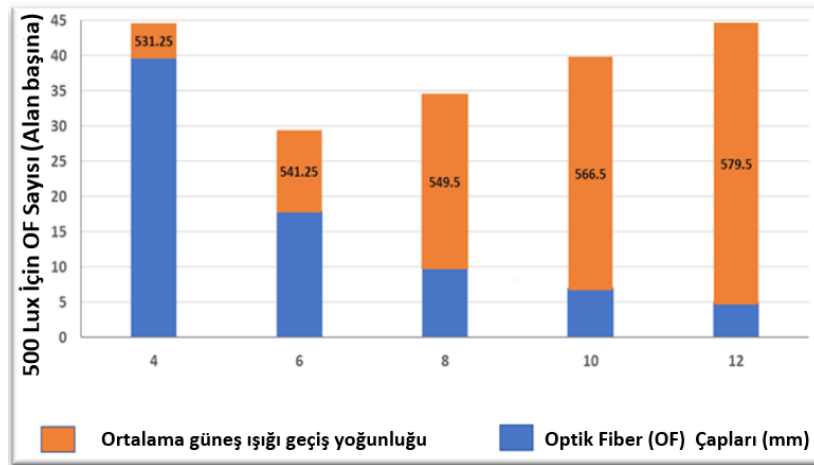
Şekil 8. (a) Spektrometre İle Işık Şiddeti Ve Dalga Boyu Ölçümü (Çakmak, 2012), (b), (c) Luxmetre İle Işık Geçirgenlik Yüzdesinin Belirlenmesi (Hlelai, 2021), (d) Fotometre İle Işık Yönlendirme Özelliğinin Tayini (Kumar ve Ahlawat, 2017).

Momin vd. (2014)'nin plastik optik fiber (200 μ çaplı) ve 0,5 mm çapındaki cam çubuklar ile ürettiği iki farklı numunenin ışık geçirgenlik sonuçlarına bakıldığında, fiber optik numunenin %7,0 ila 10,0 oranında, cam çubuk numunenin %0,2 ila %1,50 oranında ışık geçirdiği görülmüştür. Kumar ve Ahlawat (2017), ürettikleri betonların ışık geçirgenlik özelliklerini, 100 Watt ve 200 Watt akkor ışık kaynağı ve 500 Watt yoğunlukta bir halojen ışık kaynağı kullanarak fotometre ile ölçmüş ve ışık geçirgenliğinin 100W ışık kaynağı için %0,34 ile %5,62, 200W ışık kaynağı için %0,26 ile %5,40 ve 500W ışık kaynağı için %0,32 ile %4,78 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca %5,62'lik ışık geçirgenliğine %4 oranında POF kullanılarak ulaşılmıştır (Şekil 9).

Hlelai (2021), tarafından yapılan çalışmada, 4, 6, 8, 10 ve 12 mm farklı optik fiber çapları ile üretilen numunelerin güneş ışığı geçiş şiddeti, günün farklı saatlerinde ölçülmüş ve elde edilen değerler Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu sonuca göre güneş ışığı geçiş şiddetleri, yapı endüstrisindeki çoğu aydınlatma sistemi için gerekli olan 500 lux / yard² güneş ışığı yoğunluğunun üzerindedir.



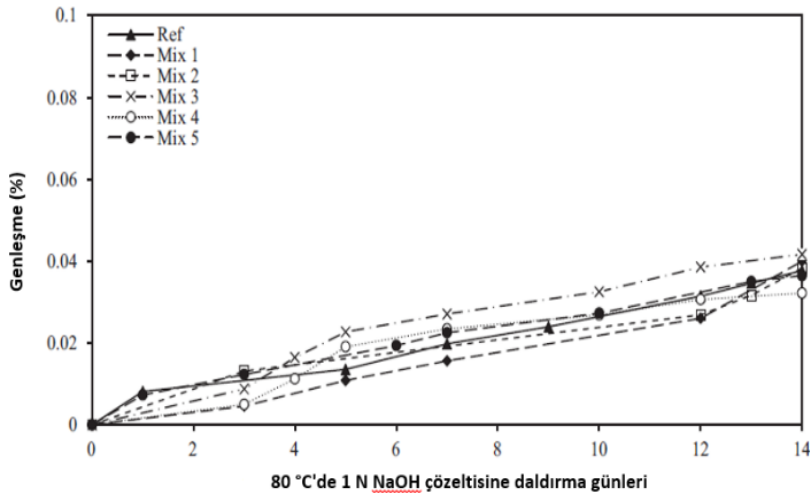
Şekil 9. Işık Geçiş Yüzdesi (Kumar ve Ahlawat, 2017)



Şekil 10. OF Sayı Ve Çapları İle Ortalama Güneş Işığı Geçiş Yoğunluğu Arasındaki İlişki (Hlelai, 2021)

Dayanıklılık Testi

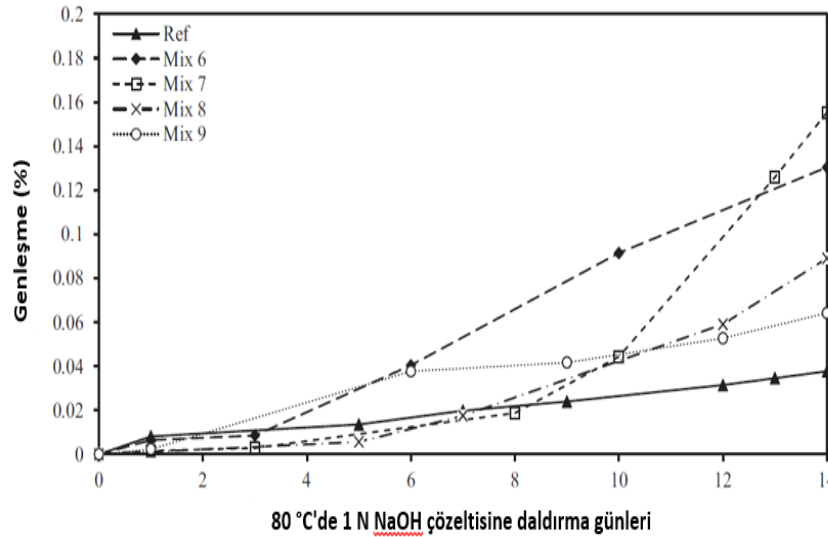
Saydam betonun dayanıklılık araştırmaları beton üretiminde kullanılan yarı saydam elemana dayalı yapılmıştır. Pagliolico vd. (2015)'nin, yarı saydam bir malzeme olan camı kullanarak ürettikleri betonda, hızlandırılmış ASR deneyi altında %0.01'den daha düşük önemsiz bir genişleme görülmüş, bu da camın alkali reaktif olmayan olarak sınıflandırılması gerektiği göstermiştir.



Şekil 11. Betonun ASR Genleşmesi-Seri 1 (Karışım 1-5) (Spiesz, Rouvas ve Brouwers, 2016)

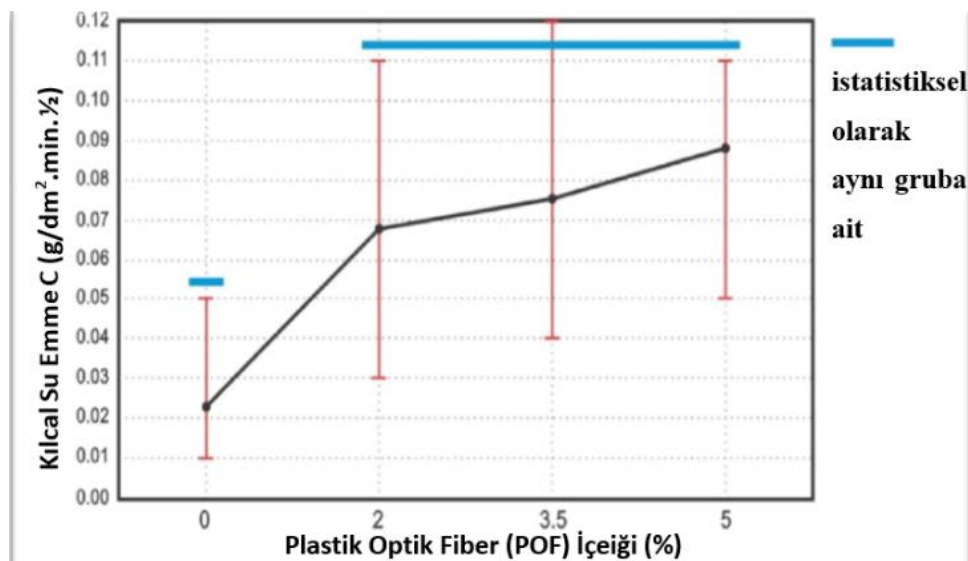
Spiesz, Rouvas ve Brouwers (2016), yıkanmamış ve yıkanmış atık cam kullanarak ürettikleri şeffaf betonun hızlandırılmış ASR genleşme deneyi sonuçları, geleneksel agregaların kullanıldığı referans karışım ile karşılaştırıldığında; referans karışımında kullanılan geleneksel kum ve agregalarda reaktif bir silis kaynağının bulunmamasından dolayı referans betonda yaklaşık %0,037'lik düşük bir genleşme gözlemlenmiştir.

Karışım (Mix) 1-5'te numuneler oluşturulurken uçucu kül (FA) ve cam tozu kullanılması, camdaki reaktif silikanın varlığının betonda oluşturabileceği genleşmeleri önemli oranda azaltmıştır. En yüksek genleşme; iri agregaların yerine iri atık cam parçaları kullanılarak üretilen Karışım 3 (Mix 3) numunesinde görülmektedir (Şekil 11 ve Şekil 12).

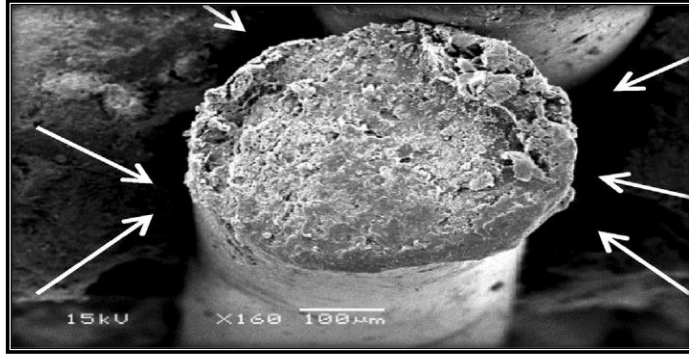


Şekil 12. Betonun ASR Genleşmesi-Seri 2 (Karışım 6-9) (Spiesz, Rouvas ve Brouwers, 2016)

Pilipenko vd. (2018), saydam beton üretiminde ışık ileten malzeme olarak polimer epoksi kullanmış ve geçirgenlik, renk solmasına karşı direnç, donma-çözülme direnci, su emme ve kimyasal dirençle ilgili deneylere odaklanmışlardır. Henriques vd. (2020), %0 (referans), %2, %3,5 ve %5 (kabul edilen en büyük POF içeriği) oranında optik fiber katarak saydam beton üretmiş ve bunlar üzerinde geçirgenlik, gözeneklilik ve su emme testleri uygulamışlardır. Sonuçlar referans numune (%0 POF) ile karşılaştırıldığında, %2, %3,5 ve %5 POF içerikli numuneler, kılcal su emmesi için sırasıyla %309, %345 ve %400'lük artışların olduğu görülmüştür (Şekil 13).



Şekil 13. Kapiler Su Emme Deneylerinin Ortalama Sonuçları (28 Günlük) (Henriques vd., 2020)



Şekil 14. Mevcut Boşlukları Gösteren Fiber/Matris Ara Yüzü SEM Görüntüsü. (Henriques vd., 2020)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu literatür araştırmasında, saydam betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, dayanıklılığı ve doğal ışığı geçirme yoğunluğu üzerinde durulup, üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri ve oranları, betonu üreten şirketler ve uygulama örnekleri araştırılmış ve sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- Saydam beton ile ilgili yapılmış son on yıldaki araştırmalar, beton ile doğal aydınlatmanın sağlayabildiğini ve böylelikle enerji tüketiminde yaklaşık %50 oranında azalma olduğunu göstermektedir.
- Işık geçirme özelliğine sahip malzemeler (optik fiberler, kauçuk, cam vb.) arasında en çok tercih edilen optik fiberler (cam optik fiber, plastik optik fiber vb.) olduğu ve saydam beton içerisindeki optik fiber yüzdesi arttıkça beton dayanımının düştüğü, kılcal su emmesinin arttığı görülmüştür. Fakat saydam beton içerisine %4-7 oranında düzenli ve uzun doğrultuda optik fiber yerleştirilmesi ile üretilen betonun sadece ışığın geçmesine izin vermediğini, aynı zamanda betonun dayanımını da arttırdığını (deneyler sonucunda elde edilen basınç dayanımı 80 MPa) söyleyebiliriz.
- Atık cam kullanılarak üretilecek saydam betonlarda uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı veya metakaolin gibi mineral katkıların kullanımı ASR (Alkali Silika Reaksiyonu) etkisini önemli ölçüde azaltabilir.
- Optik fiberlerin maliyetinin yüksek ve uygulanmasının karmaşık olması nedeniyle atık cam, reçine gibi daha ekonomik malzemeler kullanılarak üretilecek saydam betonların yapı sektöründe kullanımı teşvik edilebilir. Örneğin; gündüz saatlerinde aydınlatma maliyetini azaltmak için büyük ofis binalarının veya ticari yapıların bölme duvarlarında, merdiven boşluklarında ve güvenli yürüyüş yolları yapmak amacıyla kaldırımlarda vb. alanlarda kullanılabilir.

Bu literatür taraması ile günümüz mühendislik uygulamalarında adı çok geçen “endüstriyel atık”, “geri dönüşüm”, “sürdürülebilirlik” ve “enerji verimliliği/tasarrufu” kavramları ele alınarak çevre dostu yeni bir saydam betonun tasarlanıp, üretilebileceği kanısına varılmıştır. İlerleyen zamanlarda saydam betonu farklı yapılar, aksesuarlarda ve sanatsal objelerde sıklıkla görebiliriz.

ARAŞTIRMACILARIN KATKISI

Bu araştırmada; Yazar1, Makalenin fikri, düzenlenmesi ve kontrolü; Yazar2, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamışlardır.

KAYNAKLAR

Alzahrani, S., Alkhamis, K., Felaly, R., Alkhatib, F., Pashameah, R., Shah, R., & El-Metwaly, N. M. (2023). Preparation of transparent photoluminescence plastic concrete integrated with lanthanide aluminate. *Ceramics International*, 49(8), 12702-12709.

Ahuja, A., & Mosalam, K. M. (2017). Evaluating energy consumption saving from translucent concrete building envelope. *Energy and Buildings*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.062>

- Bajpai, R. (2013). Application of transparent concrete in construction world. *I-Manager's Journal on Civil Engineering*, 4(1), 13–17.
- Bashbash, B. F., Hajrus, R. M., Wafi, D. F., & Alqedra, M. A. (2013). Basics of Light Transmitting Concrete. *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation*, 2(3).
- Chiew, S. M., Ibrahim, I. S., Sarbini, N. N., Ariffin, M. A. M., Lee, H. S., & Singh, J. K. (2021). Development of light-transmitting concrete—A review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1046-1050.
- Çakmak, A. (2012). Şeffaf Betonun Mimaride Kullanımı ve Üretimine Yönelik Deneysel Bir Değerlendirme [Yükseklisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi.
- Emanet, S. (2022). Işık Geçiren Betonun Optik Fiber Oranları ve Yerleşimlerine Göre Özelliklerini İncelemeye Yönelik Deneysel Bir Çalışma [Yükseklisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Henriques, T. dos S., Dal Molin, D. C., & Masuero, Â. B. (2020). Optical fibers in cementitious composites (LTCM): Analysis and discussion of their influence when randomly arranged. *Construction and Building Materials*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118406>
- Hlelai, M. A. (2021). Study on the Properties of Transparent Geopolymer Concrete. California State University.
- Huang, B. (2020). Light transmission performance of translucent concrete building envelope. *Cogent Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1756145>
- Italcementi Group. (2022). İtalyan Pavyonu'nun Dış ve İç Görünümü. <https://www.italcementi.it/it>. Erişim Tarihi: 22.05.22.
- Kankriya, S. M. (2016). Translucent concrete by using optical fibers and glass rods. *Int. J. Sci. Res. Publ*, 6(10), 625-627.
- Kim, B. (2017). Light transmitting lightweight concrete with transparent plastic bar. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1).
- Kumar, A., & Ahlawat, R. (2017). Experimental Study on Light Transmitting Concrete. In *IJISSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology* (Vol. 4). www.ijiset.com
- Li, Y., Li, J., & Guo, H. (2015). Preparation and study of light transmitting properties of sulfoaluminate cement-based materials. *Materials and Design*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.021>
- Li, Y., Xu, Z. Y., Gu, Z. W., & Bao, Z. Z. (2012). Preparation of light transmitting cement-based material with optical fiber embedded by the means of parallel arrange. *Advanced Materials Research*, 391–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.391-392.677>
- Litracon. (2022). Litracon Classic. <http://www.Litracon.Hu/En/about-Us/>Erişim tarihi: 22.05.22.
- Luhar, S., & Khandelwal, U. (2015). Compressive Strength of Translucent Concrete. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 8(2).
- Momin, A. A., Kadiranaikar, R. B., Jagirdar, V., & Inamdar, A. (2014). Study on Light Transmittance of Concrete Using Optical Fibers and Glass Rods. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*.
- Nam, H. P., Hai, N. M., Van Huong, N., Quang, P. D., Tuan, N. D., Binh, N. T., & Vy, T. Q. (2023). Experimental study on 80 MPa grade light transmitting concrete with high content of optical fibers and eco-friendly raw materials. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01810.
- Pagliolico, S. L., Lo Verso, V. R. M., Torta, A., Giraud, M., Canonico, F., & Ligi, L. (2015). A preliminary study on light transmittance properties of translucent concrete panels with coarse waste glass inclusions. *Energy Procedia*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.317>

- Pilipenko, A., Bazhenova, S., Kryukova, A., & Khapov, M. (2018). Decorative light transmitting concrete based on crushed concrete fines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032046>
- Said, S. H. (2020). State-of-the-art developments in light transmitting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1967-1973.
- Shen, J., & Zhou, Z. (2021). Light transmitting performance and energy-saving of plastic optical fibre transparent concrete products. *Indoor and Built Environment*, 30(5). <https://doi.org/10.1177/1420326X20903368>
- Silalahi, Y. N. (2023). Penggunaan Kabel Fiber Optik.
- Spiesz, P., Rouvas, S., & Brouwers, H. J. H. (2016). Utilization of waste glass in translucent and photocatalytic concrete. *Construction and Building Materials*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.063>
- Subathra, P., & Sangeetha, S. P. (2020). Study on pellucid concrete incorporating optical fibers—a review. *Materials Today: Proceedings*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.110>
- Tahwia, A. M., Heniegal, A. M., Abdellatif, M., Tayeh, B. A., & Abd Elrahman, M. (2022). Properties of ultra-high performance geopolymer concrete incorporating recycled waste glass. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01393.
- Tahwia, A. M., Abdel-Raheem, A., Abdel-Aziz, N., & Amin, M. (2021). Light transmittance performance of sustainable translucent self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102178>
- Topçu, B. İ., & Uygunoğlu, T. (2016). Saydam Betonların Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. *İMO Teknik Dergi*, 7469–7475.
- Tuaum, A., Shitote, S., Oyawa, W., & Biedebrhan, M. (2019). Structural Performance of Translucent Concrete Façade Panels. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4604132>
- Valambhiya, H. B., Tuvar, T. J., & Rayjada, P. V. (2017). History and case study on light transmitting concrete. *J. Emerg. Technol. Innov. Res*, 4(1).
- Zielińska, M., & Ciesielski, A. (2017, October). Analysis of transparent concrete as an innovative material used in civil engineering. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 2, p. 022071). IOP Publishing.