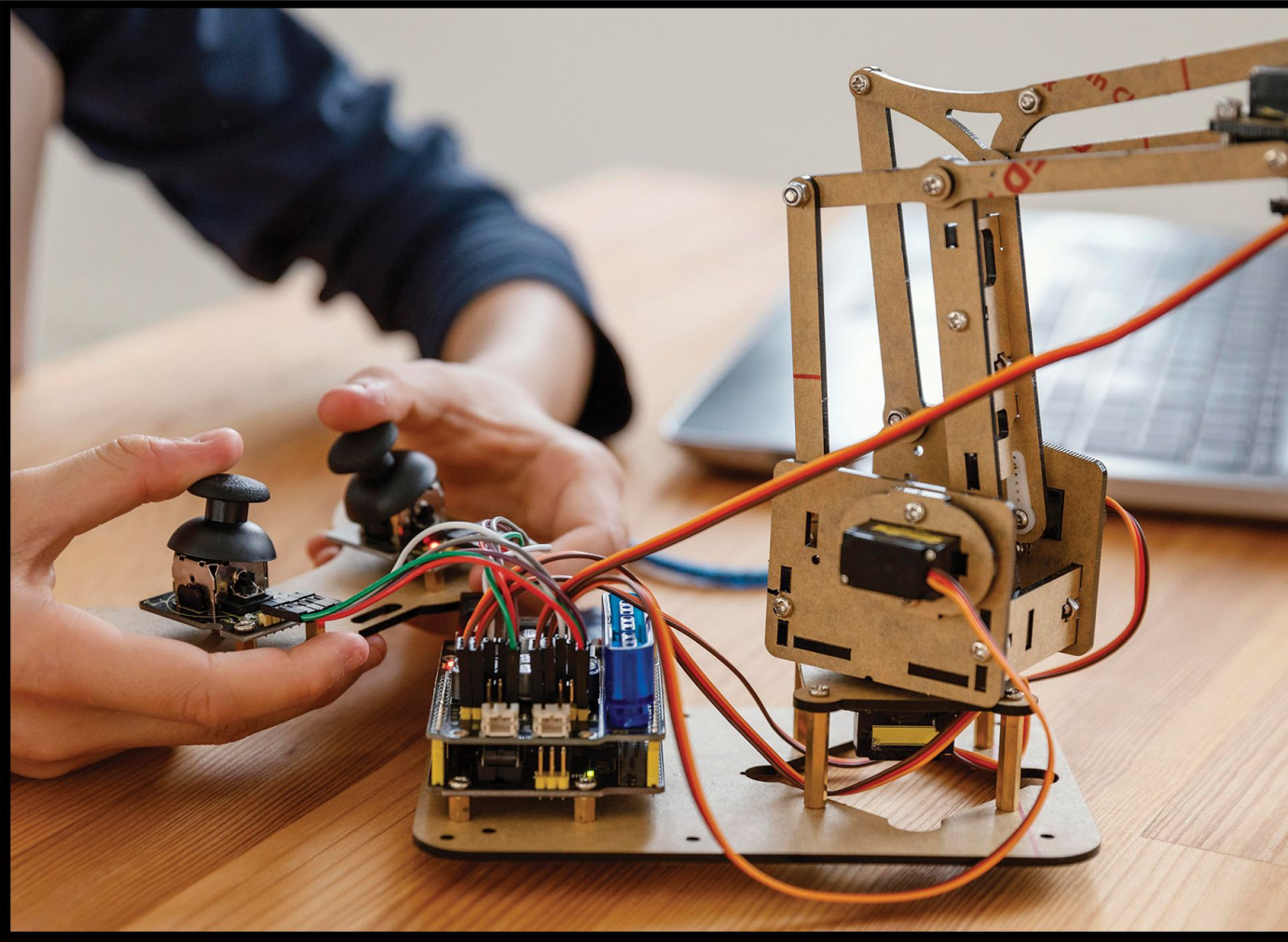


Mühendislik Bilimleri

Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar



Editor

Duygu KAVAK



LIVRE DE LYON

2023

Mühendislik Bilimleri

Mühendislik Bilimleri

Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar

Editor

Duygu KAVAK



LIVRE DE LYON

Lyon 2023

Mühendislik Bilimleri

Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar

Editor

Duygu KAVAK



LIVRE DE LYON

Lyon 2023

Mühendislik Bilimleri: Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar

Editor • Prof. Dr. Duygu Kavak • Orcid: 0000-0002-1189-3110

Cover Design • Motion Graphics

Book Layout • Motion Graphics

First Published • July 2023, Lyon

ISBN: 978-2-38236-567-0

copyright © 2023 by Livre de Lyon

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without prior written permission from the Publisher.

Publisher • Livre de Lyon

Address • 37 rue marietton, 69009, Lyon France

website • <http://www.livredelyon.com>

e-mail • livredelyon@gmail.com



LIVRE DE LYON

ÖNSÖZ

“Mühendislik Bilimleri Sorunlar, Fırsatlar ve Araştırmalar” isimli bu kitap, mühendislik, bilim-teknoloji ve farklı disiplinlerdeki güncel bilimsel çalışmaları bir araya getirmektedir. On üç bölümden oluşan kitap, ısı boruları, ısı eşanjörleri ve türbülantörlerin incelemesi, klor kaynaklı korozyon başlangıç süresi hesap yöntemleri ve LIFE-365 örneği, ikili koati optimizasyon algoritması, unlu mamüllerin antioksidanlar ile zenginleştirilmesi, metal matrise sahip kompozitlerde infiltrasyon yöntemi, sürdürülebilir kompoze çimento harçlarının fiziksel ve mikroyapı özellikleri, atık lastik ilaveli karma bağlayıcılı çimento harçlarının mikroyapı özellikleri, bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yöntemleri, kömür yanma atıklarının çevresel etkileri ve SR izotopu uygulamaları, bitkisel madde katkılı kompozit malzeme, atık malzeme içeren nanokompozitler, çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağları ile tahminleme, alabalık (*oncorhynchus mykiss*, walbaum,1792) filetolarının kimyasal kalitesi üzerine aloe vera jel kaplamanın etkinliği başlıklı çalışmalardan oluşmaktadır.

Kitabın hayata geçirilmesinde emeği geçen tüm bölüm yazarlarına, eser incelemelerini gerçekleştiren değerli hakemlere, kitabın baskısını gerçekleştiren Livre de Lyon Yayınevi ve tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Bu kitabın tüm okuyucular için faydalı olmasını dilerim.

Editör
Prof. Dr. Duygu Kavak

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
BÖLÜM I. ISI BORULARI, ISI EŞANJÖRLERİ VE TÜRBÜLATÖRLERİN İNCELEMESİ	1
<i>Helin YILDIZ & Adem YILMAZ</i>	
BÖLÜM II. KLOR KAYNAKLI KOROZYON BAŞLANGIÇ SÜRESİ HESAP YÖNTEMLERİ VE LIFE-365 ÖRNEĞİ	25
<i>Seda AKDUMAN</i>	
BÖLÜM III. İKİLİ KOATİ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI	43
<i>Ayşegül İHSAN & Tahir SAĞ</i>	
BÖLÜM IV. UNLU MAMÜLLERİN ANTİOKSİDANLAR İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ	65
<i>Dilek DÜLGER ALTINER & Merve SABUNCU Yasemin ŞAHAN</i>	
BÖLÜM V. METAL MATRİSE SAHİP KOMPOZİTLERDE İNİFİLRASYON YÖNTEMİ	95
<i>İsmail KAYABAŞI</i>	
BÖLÜM VI. SÜRDÜRÜLEBİLİR KOMPOZE ÇİMENTO HARÇLARININ FİZİKSEL VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ	115
<i>Levent BOSTANCI</i>	
BÖLÜM VII. ATIK LASTİK İLAVELİ KARMA BAĞLAYICILI ÇİMENTO HARÇLARININ MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ	133
<i>Levent BOSTANCI</i>	
BÖLÜM VIII. BİLYELİ HADDELEME VE DERİN HADDELEME YÖNTEMLERİ	149
<i>Oktay Adıyaman & Feyza AYDIN & Musa KILIÇ</i>	
BÖLÜM IX. KÖMÜR YANMA ATIKLARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE SR İZOTOPU UYGULAMALARI	167
<i>Mehmet Ali ERTÜRK & Hatice KARA</i>	
BÖLÜM X. BİTKİSEL MADDE KATKILI KOMPOZİT MALZEME	181
<i>Erdi BULUŞ & Yeşim Müge ŞAHİN & Gülseren SAKARYA BULUŞ Mehmet AKKAŞ</i>	

- BÖLÜM XI.** ATIK MALZEME İÇEREN NANOKOMPOZİTLER 195
Erdi BULUŞ & Yeşim Müge ŞAHİN & Kübra GÖDEK
Gülseren SAKARYA BULUŞ & Mehmet AKKAŞ
- BÖLÜM XII.** ÇOK KATMANLI ALGILAYICI YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
TAHMİNLEME 215
Mehmet Şirin ATEŞ & Erol TERZİ & Ercan SIR
- BÖLÜM XIII.** ALABALIK (ONCORHYNCHUS MYKISS, WALBAUM,1792)
FİLETOLARININ KİMYASAL KALİTESİ ÜZERİNE ALOE
VERA JEL KAPLAMANIN ETKİNLİĞİ 227
Mehmet Zülfü ÇOBAN

BÖLÜM I

ISI BORULARI, ISI EŞANJÖRLERİ VE TÜRBÜLATÖRLERİN İNCELEMESİ

*Investigation of Heat Pipes,
Heat Exchangers And Turbulators*

Helin YILDIZ¹ & Adem YILMAZ²

*¹Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı
ogrt.helinyildiz@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4133-3568*

*² (Doç. Dr.) Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi
Enerji Sistemleri Mühendisliği
adem.yilmaz@batman.edu.tr
ORCID: 0000-0001-7266-0866*

1. Giriş

Enerjinin ve ısı transferinin daha verimli kullanılması için mevcut sistemlerde enerji tasarrufu çalışmalarının yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, ısı transferini iyileştirmek için farklı yöntemlerin geliştirilmesi, aynı performansa sahip, daha küçük boyutlu ve daha hafif ısı eşanjörleri tasarlamayı amaçlamaktadır. Isı geri kazanım teknolojisine maruz kalan bir ısı değiştirici, ısı geri kazanım teknolojisine maruz bırakılmayan bir ısı değiştiriciye kıyasla yatırım ve işletme açısından daha fazla tasarruf sağlar. Isı transferini iyileştiren teknolojilerin kullanılması, işin enerji maliyetlerini ve ısı eşanjörünün büyüklüğü artıkça uygulanan tekniklerle artmaktadır. Isı transferini arttırmanın birçok yöntemi vardır. Bazı uygulamalarda fonksiyonel (pratik) olarak kullanılmaktadır.

Isı transferini iyileştiren teknolojiler, konveksiyon katsayısını arttırmaya, birim uzunluk başına yüzey alanını arttırmaya, sıcaklık farklarını

azaltmaya veya hem konveksiyon katsayısını arttırmaya hem de birim uzunluk başına yüzey alanını arttırmaya dayanmaktadır. Boru içindeki ısı transferini iyileştiren ve türbülansı artıran elemanlar türbülötörlerdir. Ayrıca türbülötörler tüpün içine yerleştirilen element ve türbülans üreteçleri olarak da adlandırılırlar. Maliyeti yüksek ve tüketimi hızla olan enerji verimliliğini kullanılabilmesi için ısı eşanjörlerinde oluşan modifikasyonlardan biri de boruların içerisine çeşitli türbülans arttırıcı elemanlar yerleştirilerek en küçük hacimde ısı transfer veriminin arttırılmasıdır. Boru içerisinde boydan boya uzanan mil kullanılması amaçlanmıştır. Transfer verimini artırma da kullanılan yöntemlerinden biri olan pasif yöntem kullanılmıştır. Tüpün tamamı boyunca uzanan bir mil ile kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Isı transferini arttırmayı amaçlar. Isı transfer verimini artırma yöntemlerinden biri olan pasif yöntem kullanılmaktadır.

Türbülötörler ve ısı değıştirici sistemlerin ısı verimlerinin arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ile ısı eşanjörlerinin ısı verimleri ve dolayısıyla enerji verimleri belirlenmiştir. Yıldız, Ş. (2007), sabit duvar sıcaklığı ve buharla ısıtılan dış yüzeyleri olan eş merkezli borulu bir ısı eşanjöründe ısı transferini arttırmak için farklı çaplarda yaylar kullanmıştır. Bu çalışmada türbülanslı (tüplerdeki yaylar) ve türbülanssız (boş tüpler) koşullar için ısı transferi, basınç düşüşü ve ekserji analizleri hesaplanmış ve deneysel ilişkiler kurmak için karşılaştırılmıştır. Kahraman, N. ve diğerleri, (2008), Tüp içerisinde türbülans difüzörü için 2 farklı paslanmaz çelik kanat açıklığı ($b = 0,1$ ve $0,2$ m) ve 3 farklı kanat açısına ($\theta = 30^\circ$, 45° ve 60°) göre türbülötör kullanılmıştır. Isı geçişinde oluşan artışı 3 boyutlu olarak ele almıştır. Yapılan deneysel çalışmada, borularda türbülötör kullanımının Nu sayısını arttırdığını, türbülötörlerin kanatçık aralığının (b) ve kanat açısının (θ) da ısı transferini etkilediğini, reynolds sayısı arttıkça Nusselt sayısı arttığını ve sürtünme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Karahhan, F. (2010), bu çalışmada Malatya Mimsang Kazan İşletmesi'nde 125.000 kcal/h katı yakıtlı bir kazanda sekiz farklı bant türbülötörü kullanılarak ısı transferindeki iyileştirmeler incelenmiştir. Türbülötördeki basınç kayıpları da incelenmiştir. Kazandaki tüm bacalara takılan türbülötörler ile deneyler yapılmıştır.

Yiğit, M. (2010), ticari bir SAD kod programı kullanarak eş merkezli boru yaylı ısı eşanjörlerinin sayısal analizinde kullanılan bir türbülans modelinin etkilerini incelemiştir. Farklı türbülans modellerinden elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak optimum türbülans

modeli belirlenmiştir. Alt, N. ve ark. (2010), kişisel bilgisayar (PC) mikroişlemcilerinin (CPU'lar) farklı ısı boruları kullanarak soğutulmasını deneysel olarak incelemiştir. Farklı üç ısı borusunu ve çalışma akışkanının verimleri kıyaslanmıştır. En etkili sıvıların doğrudan(düz) ısı borusundan ve çalışma akışkanının etanol olduğu tespit edilmiştir. Uğurlubilek, N. ve Uralcan, İ.Y. (2011), 18 mm çapındaki bir bakır boruya sıkıca yerleştirilmiş sarmal bir türbülâtörün ısı transferi üzerindeki etkisini sayısal olarak araştırılmıştır. Reynolds sayısının 1.000 ile 20.000 arasında alınmıştır. Üç farklı geometri için sayısal olarak belirlenen Nusselt değerleri, kaynak ile Reynolds sayısı arasındaki ilişkiden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Boran, K. ve diğerleri, (2014), yapılan çalışmada boru içinde borulu bir ısı eşanjörü tasarlayarak deneysel bir sistem kurmuştur. Eş merkezli bir boru içinde boru ısı eşanjöründe, iç borularda sıcak hava zıt yönlerde akması ve dış borularda su akmasıyla tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen grafikler, borudaki türbülâtörlerle akış türbülansının artırılmasıyla ısı transferinin iyileştiğini göstermektedir. Seyhan D. (2015), önce gaz türbinli motorların genel soğutmasını anlatmış, ardından türbülâtörlerin türbin kanadı soğutma kanallarında kullanımını detaylı olarak araştırmıştır. Ardından türbülans modellemenin sayısal yöntemleri ve RANS tabanlı türbülans modelleri incelenmiştir. Bademci, N. (2017) Araştırması, dairesel bir tüp içine yerleştirilmiş plaka benzeri türbülâtörleri ve bu plaka üzerinde oluşturulan farklı hatve ve farklı kanat açlarına sahip türbülâtörleri sayısal olarak ele almıştır. Güneş, S. ve diğerleri, (2018), V-nozullu bir türbülâtörün, düzgün ısı akışı koşulları altında dairesel borularda ısıl performans üzerindeki etkisinin sayısal olarak çalışması üzerinde durmaktadır. Test tüpünün içine, türbülanslı zıt akım akışı oluşturmak için bir venturi yapısı olarak yakınsayan/uzaklaşan bir nozul monte edilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar için Nusselt sayısı (Nu) ile sürtünme katsayısı (f) arasındaki değişim; Reynolds-Sayı (Re) da verilmiştir. Sungur, B. ve Topaloğlu, B. (2018), ısıtma amaçlı duman borulu kazanların verimini artırmak için bir çalışma yapmıştır. Bu kapsamda duman borusu içerisine konik türbülâtörler yerleştirilmiş ve bunların ısı transferine etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

Dağdevir, T. ve diğerleri, (2019), ısıtılmış bir boruyla sabit ısı akısı tüpünde oluklar düzenleyerek ısı transferini iyileştirmenin etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Analiz sonuçları sürtünme katsayısı (f), Nusselt sayısı (Nu), ve performans değerlendirme kriterleri (PEC) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sarı, O. (2019), farklı hatve yükseklikleriyle (H) tasarlanan türbülâtörlerin

farklı zaman dilimlerinde (L_p) borulardaki ısı transferi ve akış hızı üzerindeki etkileri deneysel veri olarak incelenmiştir. Sıvı olarak hava kullanılmıştır. Amaç, boru akışına yerleştirilen yeni türbülatorlerle uzunlamasına vorteksler oluşturarak ısı transferini iyileştirmektir. Erzincanlı, S. (2019) Tek fazlı akışa sahip bir tüp içine yerleştirilen türbülatorlerin akışa etkisinin araştırıldığı bu deneysel çalışmada, üç farklı yarıçaplı türbülator kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Baykara, Ş. (2019), eş eksenli bir ısı eşanjörünün iç borusuna yerleştirilen konik bir türbülatorün ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Deney setinde kullanılacak tasarım parametreleri; koni tipi, çap, adım sayısıdır. Deneyler, 18.000 ile 37.000 arasındaki Reynolds sayıları aralığında bulunmuştur. Ertan, U. (2019), bu çalışmada iç içe borulu ısı değiştiricilerin farklı konfigürasyonlarına sahip türbülatorler kullanılarak $5.000 \leq Re \leq 30.000$ arasında değişen altı farklı Reynolds sayısı için deneyler yapılmıştır. Şendoğan K. ve diğerleri, (2019), türbülans oluşturmak için bir tüpün içine kanatçıklar yerleştirmiş ve bunu boş bir tüple karşılaştırmıştır. Kanatlar arası mesafe arttıkça Nu sayısının azaldığını gözlemlenmiştir. En küçük S_y aralığına sahip türbülatorler, tüm Re sayıları arasında en yüksek Nu sayılarına sahiptir. Çalışmalar, bu türbülatorlerin bıçaklar arası aralığının (S_y) ve kanat açısının (α) Nu sayısını etkilediğini göstermiştir. Turgut, E. (2020), iç içe iki borudan oluşan bir eş eksenli ısı eşanjörünün iç borusuna montaj için hazırlanan dairesel kesitli türbülatorlerin ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şahin, H.M. ve ark. (2020), sayısal analizler, boru içinde boru eş merkezli ısı değiştiricilerin boyutlarını küçültmek, ısı transferini iyileştirmek ve sürtünme özelliklerini belirlemek için yay türbülatorleri kullanan RNG k-K'yi göstermektedir. ϵ modelinde çalıştırılmıştır.

Aslantaş, M. E. ve ark. (2021), bu çalışmada ısı borularının ısı ve akış özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada incelenen parametreler aralığında, model geometrisinin kondenser kısmının uzunluğunu artırmanın ısı performans üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir. Baysal, E. ve diğerleri, (2021), göre zıt akışlı borulu ısı eşanjörlerinde türbülatorler kullanılmıştır. İç kanal içine farklı aşamalarda yerleştirilen halka şeklindeki türbülatorleri sayısal olarak incelemiştir. Sabit ve türbülanslı akış koşulları için üç boyutlu durum koruma denklemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemine dayalı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılmıştır.

Çeri, B. ve Koca, T. (2022), bu çalışmada gaz yakıtlı bir kazanın üçüncü geçiş borusuna farklı açılarda kanatçıklara sahip türbülatorlerin takılması ve türbülatorlerin kanat açısındaki değişimin iletim ve baca üzerindeki etkileri deneyleri yapılmıştır. Gaz çıkış sıcaklıkları incelenmiştir. Ek olarak deneyler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirmek için Solidworks, Flow, Simulation programı kullanılarak yapılan analizlerle doğrulanmıştır. Demiray, M. (2022), tarafından yapılan bu çalışmada, yassı bir bakır boruda ısı transferini arttırmak için, ısı transferini arttırmak için 0,5 mm kalınlığında bakır, alüminyum ve çelik tabakalardan yapılmış bir türbülator kullanılmıştır. Deney verilerine göre alüminyum, çelik ve bakır türbülatorlerin basınç kayıpları, ısı verimi, ve sürtünme katsayısı hesapları ve grafikleri oluşturulmuştur. Wang, Z. (2023), oluklu kanat, plaka kanatlı ısı eşanjörlerinde yaygın kanat tiplerinden biridir. Oluklu kanatçıklar sıvı türbülansını destekleyebilir ve sınır tabakasını ayırabilir veya yok edebilir. Kanaldaki akışkanın türbülansını daha da arttırmak için, oluklu kanatlı kanala yenilikçi bir şekilde silindirik türbülator eklenir ve bunun ısı transferi ve akış direnci üzerindeki etkileri sayısal simülasyonla araştırılır. Bu araştırmadaki temel tartışmalı nokta, tablolayıcıların ve belirli bir geometriye sahip parçaların kullanılması olan yüksek ısı akısına sahip yüzeylerden ısının uzaklaştırılmasıdır, bu tartışmalı noktaya bir çözüm olarak seçilmiştir.

Moria, H. (2023) Esnek yapısından dolayı son zamanlarda kavisli tabanlı sarmal ve spiral borular için bir türbülator olarak yaylı tel önerilmiştir. Bununla birlikte, yay telinin üretim sürecinde normal olarak kullanılan tek dairesel tel, bu araştırmanın sonuçları, diğer tel kesit şekillerinin çok daha yüksek termal performans ve Nu sayısı sağlayabildiğini göstermektedir. Alizadeh, E. ve diğerleri, (2023), bu araştırmadaki birincil hipotez, türbülansı artırarak sıvı ısı transferini ve ısı transfer düzlemini artırarak ve bir girdap akışı oluşturarak ısı transferini arttırmaktır. Bu araştırmanın temel fikri ve yeniliği, bir türbülatorün eş zamanlı kullanımı (türbülansı iyileştirmek ve daha etkin ısı iletimi sağlamak için) ve kullanılan farklı türbülatorlerden elde edilebilecek temas yüzeyini (benzersiz geometriye sahip parçaların montajı yoluyla) arttırmaktır. Diğer geometrileri ise Ansys Fluent yazılımı kullanılarak ağ üzerinde üç boyutlu uzayda yönetici denklemleri ve Kartezyen koordinatları çözmek için sınırlı hacim yöntemi kullanılmıştır. Fırat, İ. ve diğerleri, (2023), boru hattındaki türbülatorün performansını kontrol etmeden önce, deneylerin güvenilirliğini ve elde edilen verilerin geçerliliğini kontrol etmek için dairesel içi boş borunun deneysel sonuçları incelenmiştir.

2. Isı Transfer Mekanizmaları

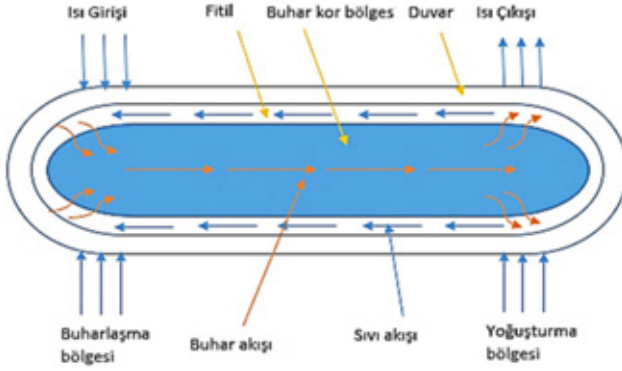
Sıcaklık farklarından dolayı bir yerden başka bir yere aktarılabilen enerji türü ısıdır. Termodinamik analiz, sistem denge durumundan diğerine geçerken ısı transferinin miktarı ile ilgilidir. Bu tür enerji transferinin hızını belirlemekle ilgilenen bilim dalı ısı transferidir. Sıcak bir ortamdaki soğuk bir ortama enerji aktarımı her zaman ısı olarak gerçekleşir, ortam iki yerde de sıcaklıkları eşitlendiğinde ısı aktarımı durmaktadır. Her türlü ısı transferi bir sıcaklık farkı gerektirir (Çengel, 2011).

3. Isı Borusu

Isı kontrol yöntemleri, elektronik veya elektromekanik sistemlerin ömrünü uzatmak, performanslarını iyileştirmek ve tasarım sürecini mini/mikro boyutlara doğru kolaylaştırma amacı büyük önem taşır. Bundan kaynaklı bu tür sistemlerde üretilen ısının dağıtılması için etkili yöntemlere ihtiyaç vardır. Mevcut bir yöntem ısı borularıdır. Isı boruları, küçük sıcaklık farkları ile uzun mesafelerde yüksek ısı transferine izin veren, çalışma sırasında pompa veya kompresör gibi mekanik cihazlara ihtiyaç duymayan, yüksek verimli pasif ısı transfer cihazlarıdır. Isı borusu bileşeni; sızdırmaz bir kap, difüzyon yapısı, kendi buharı ile dengede çalışan az miktarda sıvıdır. Çalışma sıcaklığına göre etanol, su, amonyak ve metanol gibi farklı çalışma ortamları tercih edilebilir. Isı borusu genellikle üç bölümden oluşur:

- Buharlaştırıcı kısım
- Yoğuşturucu kısım
- Adyabatik kısım

Isı borularının işleyişi şu şekilde özetlenebilir. Evaporatör bölümünden ısı çekilmesi sonucunda sıvı fazdaki akışkan buhar fazına geçerek boru içinden yoğuşturucu bölümüne hareket eder. Kondenser bölümünde ısı dışarıya aktarılır ve gaz fazdaki akışkan sıvı döngü halinde tekrardan sisteme geçer. Bu şekilde sıcak yüzeylerden emilen ısı daha soğuk alanlara aktarılır. Sıvı haldeki sıvı, fitil adı verilen kılcal bir yapı vasıtasıyla kılcal hareketle buharlaştırıcı bölgesine geri döner. Bu işlem, yoğunlaşan sıvıyı tekrar buharlaşma bölgesine zorlamak için yeterli kılcal kuvvet olduğu sürece devam eder. Isı boruları çok yüksek ısı transferi sağlar çünkü ısı transferinin fiziksel mekanizması faz değişimine dayanır (Markal, 2018).



Şekil 1: Isı Borusunun Genel Yapısı (Bakır, 2023)

3.1. Isı Borusu Yapı Elemanları

Isı borusu 3 temel yapı elemanından oluşur:

- İş akışkanı
- Fıtil
- Dış muhafaza

Isı borusunu tasarlarken göz önünde bulundurulması gereken en önemli hususlardan biri, doğru çalışma akışkanı seçmektir. Isı borularında en sık kullanılan çalışma akışkanı Tablo 1’de listelenmiştir. Isı borusunda olan çalışma akışkanı, evaporatör bölümünden alacağı ısıyı kondenser bölümüne hızla aktarabilmelidir. Bunu gerçekleştirmek için bazı özellikler gereklidir. Kullanılan akışkan ısı borusunu borunun iç hacminin yaklaşık 1/3’ü oranında doldurur (Kullanıma göre değişir). Isı borusunu dolduracak akışkan miktarına bakıldığında ısıtma veriminin sıvı miktarına bağlı olarak değiştiğini görülmektedir.

Akışkan ve malzeme uyumluluğu ısı boruları tasarlanırken ve üretilirken önceden bilinmesi gereken parametrelerdir. Uygun çalışma akışkanların belirlenmesindeki ilk husus, buharlaşma sıcaklığıdır. Kullanılan çalışma akışkanları, buharlaşma ısısı, kaynama noktası, başka malzemelerle uyumluluğu, ıslanabilirlik, kinematik viskozite, ısı iletkenlik, ısı kararlılık, buhar basıncı, donma noktası ve yüzey gerilimi gibi önemli özelliklere bakılarak seçilmektedir. Paralel bir biçimde ısı transferi için, çalışma akışkanının yüksek gizil buharlaşma ısısına sahip olması gerekir. Yeterli pompalama gücü elde etmek için yüksek bir yüzey gerilimi gereklidir. Yüzeyin ıslanabilirliği iyi olmalıdır. Isı transferini

iyileştirmek için ısı iletkenliği yüksek olmalıdır. Akışı kolaylaştırmak için viskozite düşük olmalıdır. Çalışma sıvısı kullanılan tüp veya fitil malzemesi ile uyumsuz olduğunda iki ana sorun ortaya çıkabilir. Akışkan içinde yoğunlaşmayan gazların oluşumu, dış veya fitil ceketin içindeki yüzeyinde kimyasal değişimler nedeniyle deformasyon oluşabilmektedir. Her iki sorun da düşük performansla neden olmaktadır (Alkaç, 1996).

Tablo 1: Isı Borusunda Kullanılan İş Akışkanları Ve Uyumlu Olduğu Malzemeler (Alkaç, 1996)

İşletme Aralığı (°C)	Akışkan Cinsi	Kaynama noktası sıcaklığı (°C)	Gövde ve Fitol İçin Uygun Malzeme
-200 ile -80	Nitrojen	-196	Paslanmaz çelik
-70 ile -60	Amonyak	-33	Paslanmaz çelik
-60 ile 40	Freon 134a	-26,5	Paslanmaz çelik
-40 ile 120	Freon 21	8,92	Paslanmaz çelik
-10 ile 180	Freon 113	47,6	Paslanmaz çelik
40 ile 220	Freon 114	92,8	Paslanmaz çelik
-20 ile 120	Pentan	28	Paslanmaz çelik
0 ile 120	Aseton	56,2	Bakır, Paslanmaz çelik
10 ile 130	Metanol	65	Bakır, Paslanmaz çelik
0 ile 130	Etanol	78,6	Bakır, Paslanmaz çelik
10 ile 200	Su	100	Bakır, Nikel
190 ile 500	Cıva	356	Paslanmaz çelik
400 ile 800	Potasyum	760	Nikel, Paslanmaz çelik
500 ile 900	Sodyum	883	Nikel, Paslanmaz çelik

Bir ısı borusunu çalıştırırken, çalışma ortamı bir fitil ile (ısı borusu tipine bağlı olarak) kondenser bölgesinden evaporatör bölgesine döndürülür. Fitol kılcal damarları, fitilin iç yüzeyinde oluşur ve yüzeyinde gerginlik oluşturur. Bu gerilim, sıvının fitilin iç yüzeyi boyunca hızla hareket etmesine neden olur (Silverstein, 1992). Fitol kullanılan ısı borularında fitil yapısının sahip olması gereken en önemli işlev gözenek boyutunun, kılcal hareket nedeniyle sıvı fazlı

çalışma sıvısının buharlaştırıcıya geri dönmesi için yeterince büyüktür. Bu özellik akış direncini en aza indirmek için önemlidir (Bese, 1988). Kullanım sırasında maksimum kılcal pompa basıncında bir artış, yüzeyin gözenekliliği azaltılarak oluşturulabilir. İdeal olan fitil için olması gereken özellikler:

- Duvar malzemeleri ve akışkanlar ile uyum içinde olmalıdır.
- Sıcaklık değişimlerinden dolayı deformasyon olmamalıdır.
- Sürtünme katsayısı düşük olmalıdır.
- Emici olmayan ısı boruları için uygun çap ve ebatta olmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda bozulmamalıdır.

Isı borusunun içindeki sıvıyı ortamdaki izole etmekten sorumludur. Bu nedenle dış muhafazanın geçirimsiz olması, iç-dış basınç farklarına dayanması ve akışkan ile dış ortam arasında ısı alışverişine izin vermesi gerekmektedir. Bir dış muhafaza seçerken dikkat edilmesi gerekenler:

- Hem ortam koşullarına hem de ısı borusu içindeki akışkan koşullarına uymalıdır.
- Makul bir dayanıklılık/ağırlık oranı olmalıdır.
- İmalat prosesine (kaynaklanabilirlik, işlenebilirlik vb.) uygun olmalıdır.

Isı borusu elemanların birbiri ile uyum içinde olması gerekir. Malzemeler birbiriyle uyumsuz olduğunda ortaya çıkan en önemli iki sorun, korozyona yol açan reaksiyonlar ve yoğunlaşmayan gaz oluşumudur (Dunn, 1994). Yoğunlaşmayan gazlar kondenserde toplanarak akışı ve ısı transferini engeller. Dış muhafaza çalışma ortamı ile temas edip eridiğinde, malzemedeki ayrılan kısım akış boyunca hareket eder ve burada biriktiği ısı borusunun kondenser kısmına taşınır. Bu, yüzeydeki eşit sıcaklık dağılımını bozar ve akış hatlarını tıkayabilir.

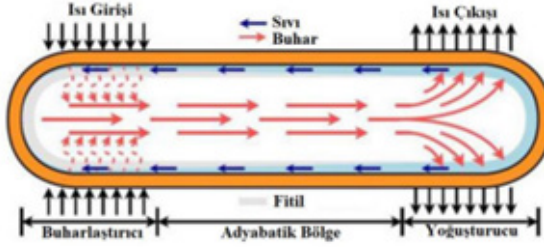
3.2. Isı Borusu Çeşitleri

Kullanım yöntemlerine göre farklı ısı boruları imal edilmiştir.

3.2.1. Geleneksel Isı Borusu

Bir ısı borusu, kondenser ve evaporatör kısımlarından oluşur. İçerideki hava tamamen emilir ve saf soğutucu akışkanın faz değişimi prensibi ile çalışır. Evaporatör bölgesinde çalışma ortamının ısı emmesi faz değişimine neden olur ve bir basınç gradyanı oluşturur. Bu, çalışma ortamının kondenser alanı yönünde hareket etmesine neden olur. Evaporatörün üst yüzeyinde akışkan

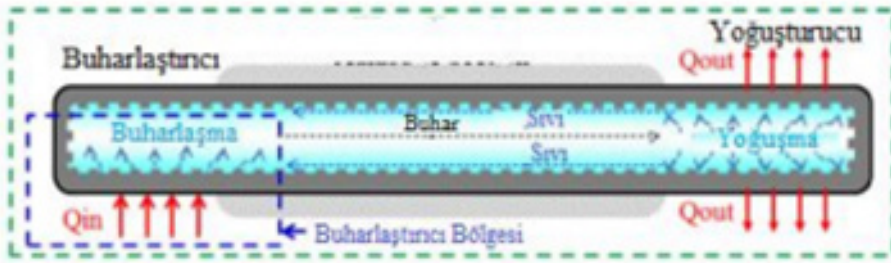
buharlaştıkça basınç artışı gözlemlenir. Bunun sonucunda sıvı-buhar arayüzü bir fitil vasıtasıyla buharlaştırıcıya doğru çekilir. Bu durgunluğun yarattığı kılcal basınç, kondenser bölümündeki akışkan çalışma ortamını fitile çeker ve tekrar evaporatör bölümüne gönderir (Arslan, 2007). Şekil 2’de düz plakalı ısı borusu gösterilmiştir.



Şekil 2: Geleneksel Isı Borusu (Boukhanouf ve Haddad, 2006)

3.2.2. Düz Plakalı Isı Borusu

Dikdörtgen panellerin birleştirilmesiyle düz plakalı ısı borusu oluşturulur. Geleneksel ısı borusu ile çalışma prensibi aynıdır. İkisi arasındaki temel fark, sıvının geniş bir yüzey alanına yayılmasını ve depolanmasını sağlayan fitilin şeklidir. Bu ısı borusu geometrisinin önemli bir özelliği, yüzeyde daha düşük bir sıcaklık gradyanına sahip bir yüzeyi oluşturma yeteneğidir. Bu izotermal yüzey, ısıtıcı tarafından oluşturulan sıcak bölgeyi eşitlemek ve sistemi soğutmaya sağlar (Boukhanouf, 2006). Şekil 3’te düz plakalı ısı borusunun şematik resmi verilmiştir.



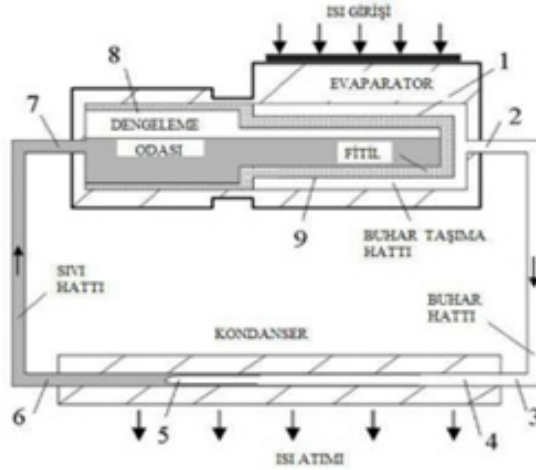
Şekil 3: Düz Plakalı Isı Borusunun Şematik Resmi (Chen ve diğerleri, 2017)

3.2.3. Döngülü Isı Borusu

Döngülü ısı boruları, düşük sıcaklık farkları ile yüksek ısı yüklerini taşıyan ve geleneksel ısı boruları gibi pasif olarak çalışan iki fazlı cihazlardır. Şekil

4'te gösterildiği gibi, bu ısı borusu: Bir evaporatör, bir kondenser, sıvı ve buhar geçişleri, bir oda ve bir fitilden oluşmaktadır. Bu ısı borularında, boru boyunca fitil kullanmak ısı iletkenliği azaltmaktadır. Bu sorunu çözmek ilmekli ısı borularına 1. fitil, ara hazne ve 2. fitil konulmuştur. 2. fitil ile kondansatörden alınan akışkan fazlı çalışma ortamı, fitil içerisinde tüpün evaporatör bölgesine emilerek ara haznede toplanır. Akışkan, birinci fitil vasıtasıyla ara haznedeki buharlaştırıcıya iletilir. Bir ara bölme, ikinci bir yoğunlaştırıcı görevi görür. Bu çalışma da akışkanın evaporatör bölümünde buhar fazına geçişi, 1. fitilde kılcallık yaratarak evaporatöre sürekli olarak sıvı faz çalışma akışkanı sağlar. İkinci fitilin kullanılmasının ana nedeni, sıvı çalışma ortamının evaporatör bölümüne sürekli girişi sağlamaktır (Demir, 2015). Bunun en önemli özelliği ortamın atık ısısı sayesinde boru içerisinde bir devre sağlamaktadır. Bu sistem için herhangi bir dış kuvvet gerekmez.

Rus bilim adamları Gerasimov ve Maydanik tarafından 1972 yılında yapılan ilk döngü ısı borusu 1.200 mm uzunluğundaydı. Akışkan olarak su kullanılmaktadır. 1 kW ısı geçiş kapasitesi sağlamaktadır. Kullanılan çalışma akışkanı ve fitil özelliklerine göre döngü ısı borularının etkinliği 10.000 ve 100.000 W/m²K arasında değişmektedir (Arslan, 2007).

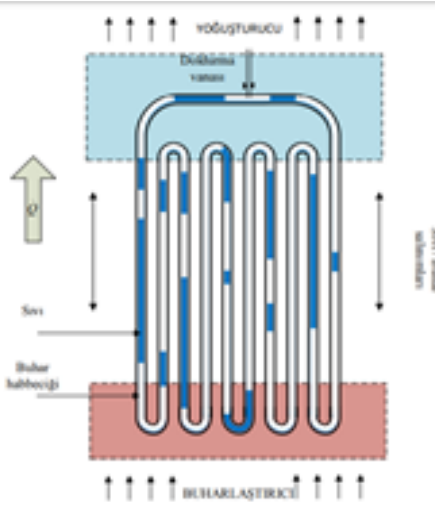


Şekil 4: Döngü ısı borusu (Launay ve diğerleri, 2007)

3.2.4. Titreşimli ısı borusu

Bu ısı borusu, hızla termal yanıtı ve yüksek verimliliğine sahip olan basit düzeyde bir ısı cihazıdır. ısı boruları kondansatör, buharlaştırıcı kısım ve uzun

sarmal bir kılcal boru ve adyabatik kısımdan oluşmaktadır. Isı borusunda, geleneksel ısı borusunda olduğu gibi sıvının kondenser ve buharlaştırıcı kısım arasında hareket etmesine izin veren bir fitil olmamaktadır. Evaporatörden kondansatör kısmına ısı transferi, borulardaki çalışma ortamının paralel titreşimi nedeniyle gerçekleşir. Kılcal boru kullanılarak, çalışma ortamının buhar kabarcıkları sıvı fazda çalışma ortamından ayrılabilir. Şekil 5'te titreşimli ısı borusu gösterilmiştir (Demir, 2015).



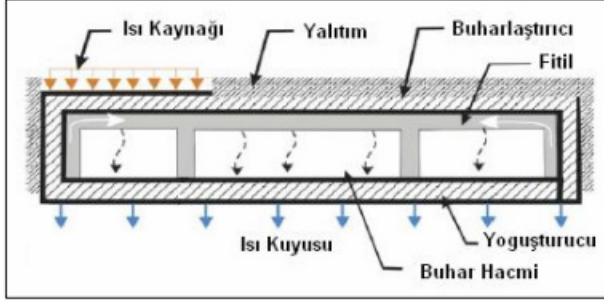
Şekil 5: Titreşimli Isı Borusu (Demir, 2015)

3.2.5. Minyatür Isı Borusu

Bu ısı boruları genellikle uzay elektroniğinde ısı kontrolleri için kullanılır. Geleneksel ısı borularına benzer şekilde, minyatür ısı boruları bir buharlaştırıcı, bir kondansatör ve bir fitil malzemesinden oluşur. Bu tip ısı borusu ile geleneksel ısı borusu arasındaki fark, boyutudur. Boyutlar tipik olarak 100 mm ile 300 mm arasındadır (Murer ve diğerleri, 2005).

3.2.6. Yassı Plaka Isı Borusu

Yassı plaka ısı borusu, dikdörtgen bakır plakaların yanyana birleştirilmesi ile oluşan bir borudur. Şekil 6'da yassı plakalı ısı borularında, ısı düzlemin bir tarafından alınır (buharlaştırıcı) ve öteki taraftan verilir (yoğuşturucu). Buharlaştırıcı iç yüzeyi fitil ile kaplanmalıdır. Bundan kaynaklı çalışma ortamının evaporatör ile kondenser arasındaki hareketi sağlanmış olur (Arslan, 2007).



Şekil 6: Yassı Plaka Isı Borusu (Arslan, 2007)

4. Isı Eőanörü

Isı eőanörü, farklı sıcaklıklardaki iki sıvı arasında ısının birbirine karışmadan transfer edildiği bir cihazdır. Isıtma sistemlerinde, iklimlendirmede, kimyasal proseslerde ve enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılırlar. Farklı endüstrilerde farklı amaçlar için kullanılan ısı eőanörleri, ısı alışverişinin türüne, akışkan sayısına, ısı transfer alanının ısı transfer miktarına oranı, yapısal özellikleri, akış şekli, ısı transfer mekanizmasına göre sınıflandırılmaktadır.

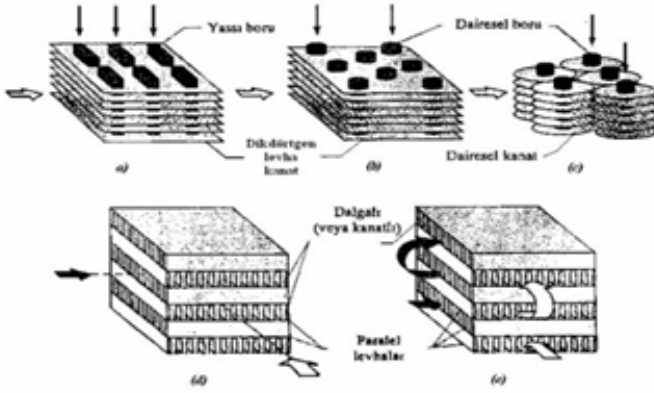
4.1. Isı Değişim Şekline Göre Sınıflama

Isı eőanörlerini doğrudan sıvıdan sıvıya veya katıdan sıvıya teması olan ve olmayanlar olarak iki gruba ayırır. Doğrudan temaslı bir ısı eőanöründe, sıvılar veya farklı sıcaklıklardaki sıvılar ve katılar doğrudan karıştırılır veya temas ettirilir. Farklı sıcaklıklardaki iki sıvının temas halinde olduğu sistemlerde, sıvılardan biri genellikle gaz, diğerisi ise düşük buhar basıncına sahip sıvıdır. Isı transferi işleminden sonra iki akışkan doğal olarak birbirinden ayrılır. Bu tip ısı eőanörüne iyi bir örnek, pratikte endüstriyel proseslerde oluşan ısıyı uzaklaştırmak için yaygın olarak kullanılan soğutma kulesidir. Sıvılar arasında direkt temasın olmadığı bir ısı eőanöründe, önce sıcak sıvıdan ısı, iki sıvıyı ayıran yüzeye veya kütleye aktarılır. Bu ısı, o yüzeyden veya kütleden soğuk sıvıya aktarılır.

4.2. Isı Geçişi Yüzeyinin Isı Geçiş Hacmine Oranına Göre Sınıflama-Kompaktlık

Bu sınıflamada ısı eőanörleri β şeklinde yüzey alanı yoğunluğu adı verilen bir büyüklük tanımlanır ($\beta = \text{Isı geçiş yüzeyi (m}^2) / \text{Isı değiştirici hacmi (m}^3)$). Literatürde $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ olan ısı eőanörleri kompakt, $\beta < 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ olanlar ise

kompakt olmayan ısı eşanjörleri olarak göz önüne alınır. Şekil 7’de kompakt ısı eşanjörleri gövdeleri resmedilmiştir (Durmaz, 2007).



Şekil 7: Kompakt Isı Eşanjörleri Gövdeleri. (A) Kanatlı Boru (Yassı Borular, Sürekli Levha Kanatlar). (B) Kanatlı Boru (Dairesel Borular, Sürekli Levha Kanatlar). (C) Kanatlı Boru (Dairesel Borular, Dairesel Kanatlar). (D) Levha-Kanat (Tek Geçiş). (E) Levha-Kanat (Çok Geçiş) (Çolak 2012).

4.3. Farklı Akışkan Sayısına Göre Sınıflama

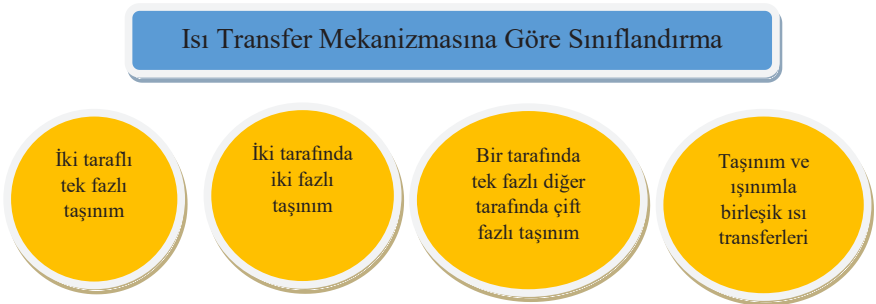
Bir ısı eşanjöründeki iki farklı akışkan arasındaki ısı transferi, birçok pratik uygulamada yaygın olarak kabul edilir. Üç akışkanlı ısı eşanjörleri ise bazı kimyasal işlemlerde, soğutma teknolojisinde, hava ayırıştırma, arıtmada ve hidrojen sıvılaştırmada kullanılmaktadır. Üç akışkanlı ısı eşanjörlü bir sistem için verilecek örnek, evsel ve otomotiv uygulamaları için daha minimal hacimli erime absorpsiyonlu (NH_3+su) sistemlerde H_2 gibi üçüncü bir nötr gaz kullanılarak geri kazanılan termal enerji verilebilir. İki den fazla akışkanla çalışan ısı eşanjörlerinin teorik analizi çok karmaşık ve tasarımı zordur. Akışkan sayısına göre ısı değiştiricilerin sınıflandırılması Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Akışkan Sayısına Göre Isı Eşanjörlerinin Sınıflandırılması

4.4. Isı Geçişi Mekanizmasına Göre Sınıflama

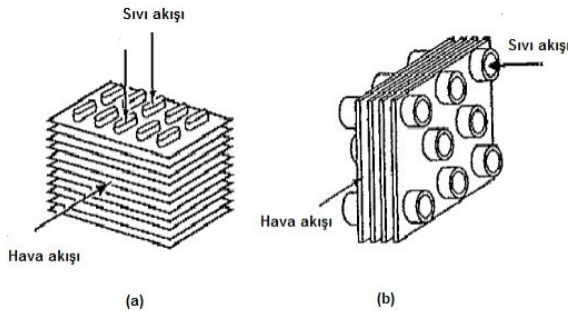
Isı eşanjörünün her iki tarafında tek fazlı akıőta, ısı taşınımı pompalar veya fanlar tarafından tahrik edilen yoğunluk farklılıkları nedeniyle zorlanabilir veya kendiliğinden olabilir. Oda ısıtıcısı örnek olarak verilebilir. Bir tarafta tek fazlı akış, diğer tarafta iki fazlı akıőın olduğu ısı eşanjörlerinde bir tarafta zorlamalı veya tek fazlı akış ve diğer tarafta kaynama veya yođuőma olmak üzere iki fazlı akışa sahiptir. Bir buhar kazanı düşünülebilir. Çift Yönlü İki Fazlı Akış, bir tarafının buharlaőtıđı ve diğer tarafının yođuőtuđu bir ısı eşanjörüdür. Hidrokarbonların damıtılması örnek olarak verilebilir. Şekil 9’da Isı transfer mekanizmasına göre ısı değiştiricilerin sınıflandırılması



Şekil 9: Isı Transfer Mekanizmasına Göre Isı Eşanjörlerinin Sınıflandırılması

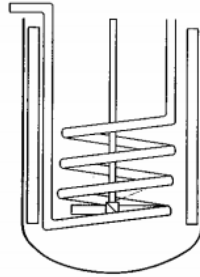
4.5. Borulu Isı Eşanjörleri

Bu tip ısı eşanjörü dikdörtgen, dairesel ve oval kesitte borular kullanır. Projelendirme için çok kullanıőlı olan boruların çapını, uzunluğunu ve yerleőimini kolayca değiştirilebilir. Bundan farklı dairesel kesitli borular diğer modellere göre daha yüksek basınçlara dayanabildiği için bu ısı eşanjörleri yüksek basınçlarda rahatlıkla tercih edilebilir. Şekil 10’da borulu kanatlı ısı eşanjörleri gösterilmiştir.



Şekil 10: Borulu Kanatlı Isı Eşanjörleri (A)Oval Kesit, (B)Dairesel Kesit (Çolak, 2012)

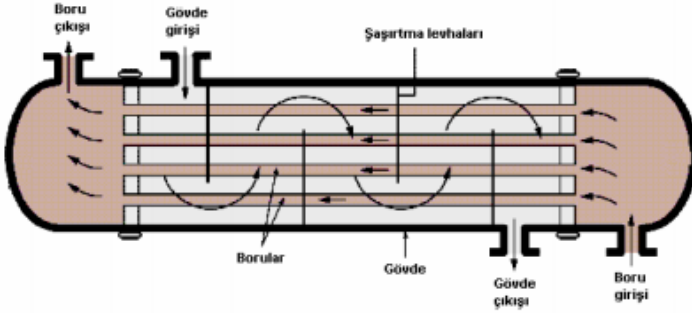
Pratikte çift borulu olanların yanı sıra boru demetinden yapılmış çeşitleri vardır. Çift borulu ısı eşanjörleri, en basit ısı eşanjörü türüdür. Bir sistem genellikle aynı eksene sahip iki tüpten oluşur. Bir sıvı iç borudan, diğeri dış borudan akar. Akışkanın yönü paralel veya zıt akımlı olabilir. Bir veya daha fazla spiral tüpten ve bu spiralın dışında bir kaptan oluşur. Bu basit ve ucuz ısı eşanjörleri, kaplardaki ve tanklardaki sıvıların sıcaklığını kontrol etmek için yaygın olarak kullanılır (Yakut, 2007). Şekil 11’de Spiral levhalı ısı eşanjörleri gösterilmiştir.



Şekil 11: Spiral Levhalı Isı Eşanjörleri (Durmaz, 2007)

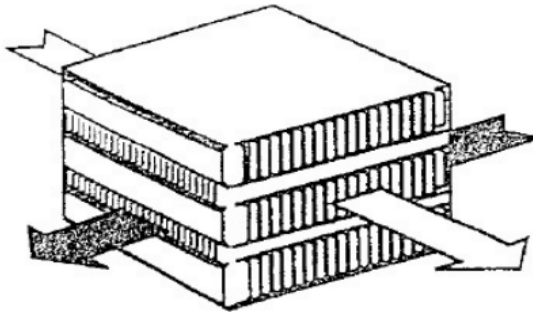
Gövde tipi boru ısı eşanjörleri, sanayide en yaygın kullanılan ısı eşanjörlerinden bir tanesidir. Isıtma yüzeyleri, birbirinden aralıklı bir dizi tüpten oluşmaktadır. Akışkanlar herhangi biri borunun içinden, diğeri akışkan ise borunun etrafından akış sağlar. Boru uçlarında, kıvrımlı veya kaynaklı iki kapak plakası deliğine bağlanır. Borular genellikle dışarıda ara perdelerle tutulur. Çevre sacı iki uçtan da gövdeye kaynaklanmıştır. Uç kapaklarını gövdeye önden ve arka kısımdan flanşlarla takılır. Genellikle farklı boyutlarda yapılabilir. Hareketli borunun levhası, hareketli kafa flanş ile flanş üzerindeki destek bileziği arasında sıkıştırılır. Gövdedeki flanş açıldıktan ve kafa flanş çıkarıldıktan sonra boru demeti çıkarılabilir. Çok sayıda normal gövdeli ve borulu ısı eşanjörü kolaylıkla imal edilebilmektedir. Her zaman mevcut olan standart malzemeler ve üretim teknikleri bilinmektedir. Bu nedenle, belirli uygulamalarda kullanılan diğeri ısı eşanjör tiplerinden daha büyük ve ağırdırlar ancak karbon çeliği veya bakır alaşımlarından ucuza temin edilebilirler. Ayrıca tasarımları yüksek işletme basınçlarına uygundur. Diğeri eşanjör tiplerine göre tamiri ve bakımı oldukça kolaydır. Tüplerden biri çalışmayı durdurursa, kapatılabilir veya bir kör tapa ile değiştirilebilir. Bu tip ısı eşanjörlerinin boru kısmı elle temizlenebilir. Ayrılabilir boru demetli ısı eşanjörü, çok büyük değilse birlikte de temizlenmektedir. Bu yöntemler ona oranla uzun vakit alır ve özellikle tesis arıza süresi maliyetleri

söz konusu olduğunda uygun değildir. Tüplerden biri tamamen tıkalıysa tüpün veya gövdenin kimyasal olarak temizlenmesi uygun değildir. İçinden akan sıvının hızı hem gövdelerin hem de boruların çapını ve sayısını belirlemede önemlidir. Yüksek hız, ısı transfer katsayısını artırır ve ısı eşanjörünün daha kompakt bir tasarımına izin verir, ancak basınç kaybına ve dolayısıyla pompa veya fan çıkışına neden olur. Eşanjör gövdesi, dökme demirden, çelik levhanın silindirik kıvrımlı kaynağından veya çelik borudan yapılabilir. Gövde boru tipi ısı eşanjörlerinde kullanılacak boru 10 mm-57 mm çap aralığında değişmektedir. Bundan daha da küçük boru çapları (16 mm ile 25 mm), daha kompakt ve daha ucuz bir ısı eşanjörü tasarımına izin verdiği için sıklıkla tercih edilir. Şekil 12’de gövde boru tipi ısı eşanjörleri gösterilmiştir.



Şekil 12: Gövde Boru Tipi Isı Eşanjörü (Durmaz, 2007)

Plakalı eşanjörlerde ısı transfer yüzeyleri genellikle ince metal saclardan oluşmaktadır. Bu saclar dalgalı, düz olabilir. Plakalı eşanjörler gövde borulu ısı eşanjörlerinden daha düşük basınç ve sıcaklıklarda çalışır. Şekil 13’te levhalı kanatlı ısı eşanjörleri gösterilmiştir.



Şekil 13: Levhalı Kanatlı Isı Eşanjörleri (Genceli, 2005)

Kondenseler, gaz halindeki bir soğutucuyu sıvı faza dönüştüren bir ısı eşanjörüdür. En sık kullanılan tipler, hava kondansatörü ve gövde boru tipleridir. Bir ısı eşanjörleri seçerken göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör, benzer proses koşullarında çalışan ısı eşanjör tipine tasarım olarak benzer bir ısı eşanjör sistemi seçmektir. Bu faktörü, kirlenme eğilimi, ısı transfer hızı, ağırlık ve boyut, malzeme, kullanılan sıvı, pompa kapasitesi, maliyeti, kullanılabilirlik ve öteki faktörler gibi dikkate alınması gereken koşullar incelenmelidir. Kirlenme faktörü, akışkanlar ve içerisinde bulunan katı maddelerden kaynaklı oluşabilen kireçlenmeye sebep olan bir sorundur. Sistemde kullanılan akışkanlar, bu tip yüzeyleri etkileyen faktörler ve kirlenme potansiyeli dikkatle belirlenmelidir. Kullanılan akışkanın hızı, akışkanın yüzeydeki hızının kesme kuvveti, akışkan yüzey duvarında kalma süresi, ısıdaki değişim kanalındaki akışkanın hızı veya akış bunlardan bazılarıdır. Isı eşanjörü seçerken dikkat edilebilecek en önemli özelliklerden biri ısı transfer hızıdır. Isı transfer hızı, kullanılan akışkan cinsi, kesit alanı ve sistem boyutuna, transfer edilen ve ısı ileten kısımlardaki duvar kalınlığı ve sıcaklık farkına bağlıdır. Seçilen ısı eşanjörünün boyutu ve ağırlığı, istenilen ısı transfer işleminin çok sayıda paralel ünite kullanılmadan kolaylıkla gerçekleştirilmesine imkân vermelidir. Birçok paralel ünite, akış dağıtım sorunlarına yol açtığı ve kullanılan ekipmanın maliyetini artırdığı için istenmez. Ayrıca şantiyede yer sorunu varsa, sistem gereksinimlerini karşılayabilecek yeni bir eşanjör paralel olarak yerleştirilerek bu sorun çözülebilir. Isı eşanjörleri, malzeme yapısı, performans ve ekonomik özelliklerin bir kombinasyonuna göre seçilir. Kullandığınız cihazların maliyeti, cihazların kullanım ömürlerini karşılayabilecek seviyede olmalıdır. Malzeme yapısı da sistemde kullanılan akışkanın cinsine göre büyük farklılıklar gösterir. Isı eşanjörleri için mevcut malzeme türleri: çelik, zirkonyum, titanyum paslanmaz çelik, TFE plastikleri, nikel alaşımları, PVDF plastikleri, niyobyum, grafit, tantal vb.

5. Türbülütörler

Kazanlarda kullanılan türbülütörler, duman borusu içerisinde akan gazın borunun iç yüzeyine temas edecek şekilde olması ve boru içinde ısı transferini arttırmada kullanılmaktadır. Isı transferi yükseldikçe gazın üzerinde de ısı artarak kazan içerisindeki suyu ısıtıp, kazanın gaz akış sıcaklığını düşürmektedir. Sistemdeki bu çalışma düzeni de sistemin verimliliğini artırmaktadır. Avantajları içerisinde aynı ısı kapasitesi için azaltılmış yakıt tüketimi, optimize edilmiş kazan kapasitesi ve verimliliği yer alır. Baca kayıplarını azaltan ilk ve en ucuz cihazlardan biri türbülütörlerdir. Kazandan çıkan buharın çıkış sıcaklığına ve yakıt cinsine bağlı olarak kazan veriminde iyileşme sağlanmaktadır.

Türbülátörler, akışkanın içinde türbülans oluşturarak ısı transferini artırır. Bu türbülans, akışkanın içerisindeki sıcak ve soğuk bölgeler arasında daha hızlı karışım sağlar ve dolayısıyla daha etkili bir ısı transferi gerçekleşir. Isı borusu üzerindeki türbülátörler, akışkanın içerisinde hareketin yoğunlaşmasına ve karışmasına yardımcı olur. Türbülátörler, ısı transferini iyileştirmek ve türbülansı artırmak için borunun içine yerleştirilen elemanlardır. Başka bir değişle türbülátörler, boru içindeki elemanlar ve türbülans üreteçleri olarak da bilinirler. Maliyeti yüksek ve tüketimi hızla olan enerji verimliliğini kullanılabilmesi için ısı eşanjörlerinde oluşan modifikasyonlardan biri de boruların içerisine çeşitli türbülans arttırıcı elemanlar yerleştirilerek en küçük hacimde ısı transfer veriminin arttırılmasıdır.

6. Sonuç ve Öneriler

Isı borusu, yüksek ısı transferi kapasitesi olan bir ısı transfer cihazıdır. İçerisinde çalışma akışkanını bulunan bir tüp sistemi ile çalışır ve sıcaklık farkı olan bölgeler arasında ısıyı aktarır. Isı borusu, türbülans yaratma amacıyla kullanılan türbülátörlerle birlikte kullanılabilir. Türbülátörlerin ısı borusu üzerindeki etkisi, ısı transferini artırarak daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlamaktır. Bu da ısı borusunun daha hızlı bir şekilde ısıyı transfer etmesini ve daha geniş bir sıcaklık farkını dengelemesini mümkün kılar. Bu sayede, türbülátörler kullanıldığında, ısı borusunun performansı ve verimliliği artar. Ancak, türbülátörlerin kullanılmasıyla birlikte bazı dezavantajlar da beraberinde gelir. Örneğin, türbülátörlerin akışkanın içerisindeki basınç kaybını artırması mümkündür. Bu, sistemin enerji gereksinimlerini artırabilir. Ayrıca, türbülátörlerin yüksek hızlarda çalıştığı durumlarda, aşırı türbülans nedeniyle sistemde titreşim ve gürültü oluşabilir. Genel olarak, hava geçiş hızı süreleri sıcaklık farkının da artabileceği veya azalabileceği gözlemlenebilir. Örneğin, daha yüksek hızlarda hava görülmesi, ısının daha hızlı bir şekilde transfer edilmesi ve sıcaklık farkının artması neden olabilir. Ancak, bu durum diğer faktörlerden de etkilenebilir, örneklemeleri açıklayan türbülanslı ısı borusu veya türbülanslı düz boru olması, beklemenin özellikleri ve borunun yapısı gibi değişkenlikler gösterebilir. Türbülátörlerle ilgili yapılan çalışmalar geniş alana yayılmaktadır ve çeşitli alanlarda gerçekleştirilmektedir. Türbülátör Tasarımı ve Optimizasyonu türbülátörlerin şekli, boyutu ve konumu gibi boyutları üzerindeki boyutları inceleyerek daha verimli türbülátör tasarımlarını belirlemeyi hedefler. Isı transferinde türbülátörler ısı transferindeki yollarını araştırarak, uzunluğunun içindeki sıcaklık profillerini optimize etmeyi amaçlar. Böylece, ısı aktarımını sağlamayı artırılabilir. Türbülátörlerin enerjisini sonuna kadar artırmak

amacıyla elde etmek için, süresinin uzamasını azaltacak ve enerji kayıplarını en aza indirecek türbülötör modelleri seçilmelidir. Sonuç olarak, türbülötörlerin kullanılması ısı borusu sisteminin performansını artırabilir, ancak enerji ve olumsuz yan etkileri göz önünde bulundurmaktır önemlidir. Tasarım ve uygulama aşamasında dikkatlice değerlendirilmeli ve sistemin spesifik ihtiyaçlarına uygun olarak seçilmelidir. Yapılacak çalışma, bakır borudaki ısı transferini arttırmak için boru boyunca uzanan millerin kullanılmasını sağlayacaktır. Düz bakır borulardan ve ısı borusu katmanlarından oluştuğu pervanenin ısı transferini artırması amaçlanıyor. Akışkan olarak buhar ve hava kullanılması planlanmaktadır. Yapılması amaçlanan deney bakır türbülötörlerin ve ısı borularının etkisini inceleyecektir. Sonuç olarak, türbülötörlerin kullanılması ısı borusu sisteminin performansını artırabilir, ancak enerji kayıplarını ve olumsuz yan etkileri göz önünde bulundurmaktır önemlidir. Tasarım ve uygulama aşamasında dikkatlice değerlendirilmeli ve sistemin spesifik ihtiyaçlarına uygun olarak seçilmelidir.

Kaynakça

Alkaç, Ö. (1996). *Isı borusu prensibinin güneşli su ısıtıcılarına uygulanması* (Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Alizadeh E., Abed A. M., Zekri H., Smaism G. F., Celili B, Paşa P. and Ganji, D. D. (2023, April). Numerical investigation of the effect of the turbulator geometry (disturber) on heat transfer in a channel with a square section. *Alexandria Engineering Journal*, Volume 69, 383-402. doi:10.1016/j.aej.2023.02.003.

Alt, N., Özbas, E. ve Çay, Y. (2010). Tek kanallı ısı borusu ile çok kanallı ısı borusu verimlerinin karşılaştırılması. *Teknolojik Uygulamalı Bilimler*, cilt 5(4), 344-352. doi:10.12739/10.12739.

Arslan, G. (2007). Üç kolonlu titreşimli ısı borusunun matematiksel modellenmesi ve deneysel incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aslantaş, M. E. ve Demircan, T. (2021). Bir ısı borusunun akış ve ısı transfer karakteristiklerinin sayısal olarak incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, cilt 13(2), 600-611. doi:10.29137/Umagd.878818

Bademci, N. (2017). *Boru içine yerleştirilen türbülátörlerin ısı transferi ve akış karakteristiklerinin sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.

Bakır, G. (2023). Bir ısı borulu nükleer reaktörde ısı limitasyonlarının analizi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(19), 54-65. doi: 10.54365/Adyumbd.1212192

Baykara, Ő. (2019). *Isı değiştiricilerinde konik şekilli türbülátörlerin ısı transferi ve basınç kaybına etkisinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Boran, K., Daştan, F., şahin, H. M., ve Aktaş, M. (2014). Isı eşanjörlerinde ısı transferi iyileştirme yöntemlerinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, cilt 17(4), 183-191. doi: 10.2339/2014.17.4.

Baysal, E., Solmaz, Ö., Ökten, M., ve Bařeski, Y. (2021, Mayıs). İç içe borulu ısı değiştiricide zıt akışta türbülátör kullanımının basınç değişimine etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *El-Cezeri*, cilt 8(2), 817-826. doi:10.31202/ecjse.871896.

Silverstein, C. (1992). *Design and technology of heat pipes for cooling and heat Exchange*, Washington, Boca Raton: CRC Press.

Çengel, Y.A. (2011). *Isı ve Kütlev Transferi Pratik Bir Yaklaşım*. Çeviri Editörü Vedat Tanyıldızı, 3.Baskı, İzmir: Güven Bilimsel Kitabı.

Çeri, B. ve Koca, T. (2022). Farklı açılı kanatçıklara sahip türbülátörlerin gaz yakıtlı kazanda kullanımının ısı transferine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt (35), 161-167. doi: 10.31590/ejosat.1077986.

Çolak, S. (2012). *Genetik algoritma ile gövde borulu ısı değiştiricisi optimal tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dağdevir, T., Keklikcioglu, O., Ozceyhan, V. and Gunes, S. (2019). Numerical investigation on heat enhancement method with using circular dimpled tube. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, cilt 3(1), 19-31. doi: 10.31200/makuubd.481202

Demiray, M. (2022). *Farklı malzemelerden üretilen türbülátörlerin ısı kazancına etkisinin deneysel analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.

Demir, M.E. (2015). *Üç kolonlu titreşimli ısı borusunun farklı çalışma basınçlarında deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Durmaz, M. (2007). *Isı geri kazanım ısı değiştiricilerinin bilgisayar yardımıyla optimizasyonu* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Durmuş, S. (2015). *İç soğutma kanallarında türbülötör kullanımının incelenmesi ve rans temelli türbülans modelleriyle benzetimi* (Doktora Tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ertan, U. (2019). *Isı değiştiricilerinde yeni geliştirilen türbülötörlerin ısı transferi ve basınç kaybına etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.

Erzincanlı, S. (2019). *Borularda dalgalı türbülötörlerin ısı transferi performanslarının deneysel olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

P.D. Dunn, D.A. (1994). *Reay, Heat Pipes*, Pergamon Press, Great Britain.

Genceli, O. F. (2005). *Isı Değiştiricileri*. İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 9789755112183.

Güneş, S., Keklikcioğlu, O., Dağdevir, T., ve Özceyhan, V., (2020). Thermal performance of a tube equipped with v-nozzle turbulator Inserts. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Dergisi*, cilt 2(1), 42-54. Doi: 10.31200/makuubd.349798

İlker, F., Karagöz, Ş., Yıldırım, O. and Sönmez, F. (2022, Ekim). Experimental investigation of the thermal performance effects of turbulators with different fin angles in a circular pipe. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, cilt 12(1) , 306-316. doi: 10.18185/erzifbed.459957.

Kahraman, N., Sekmen, U., Çepeer, B., ve Akansu, S. O. (2008). Boru içi akışlarda türbülötörlerin ısı transferine olan etkisinin sayısal incelenmesi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 28(2). 51-59.

Karahan, F. (2010). *Duman borulu kazanlarda yeni geliştirilen türbülötörler kullanarak ısı transferi ve basınç kaybının araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Karagöz, Ş. , Çiltaş, S. , Yıldırım, O. ve Erdoğan, S. (2019). Yatay borularda türbülötörlerin ısı transferine olan etkisinin deneysel araştırılması. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, cilt 12 (1) , 306-316. doi: 10.18185/erzifbed.459957.

Launay, S., Sartre, V. ve Bonjour, J. (2007). Döngü ısı borusu çalışmasının parametrik analizi: bir literatür taraması. *Uluslararası Termal Bilimler Dergisi*, cilt 46 (7), 621-636.

Markal, B. ve Aksoy, K. (2018). Yenilikçi soğutma teknolojileri, ısı boruları. *SETSCI Conference Indexing System*, volume 2 (2018), 336-342.

Moria, H. (2023). Simulation of various cross-section shapes of spring-wire as a turbulator for spiral-pipe. *Ain Shams Engineering Journal*, volume 14(9). doi: 10.1016/j.asej.2023.102112.

Murer, S., Lybaert, P., Gleton, L. ve Sturbois, A. (2005). Minyatür bir ısı borusunun geçici davranışının deneysel ve sayısal analizi, *Uygulamalı Termal Mühendislik*, cilt 25 (16), 2566-2577.

R. Boukhanouf, A. Haddad (2006). Düz plakalı ısı borusu performansının kızılötesi termal görüntüleme kamerası kullanılarak deneysel olarak incelenmesi. *Uygulamalı Termal Mühendislik*, 26, 2148–2156.

Sarı, O. (2019). Boru içerisine yerleştirilen yeni tip *türbülâtörün ısı transferine etkisinin sayısal incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yozgat Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat.

Sungur, B. ve Topaloğlu, B. (2018). Boru içine yerleştirilen konik türbülâtör sayısının nümerik optimizasyonu. *Technological Applied Sciences*, cilt 13(3), 208-218. doi:10.12739/NWSA.2018.13.3.2A0151.

Şahin, H. M., Dal, A. R., ve Özkaya, M. (2020). İç içe borulu yay tip türbülâtörlü bir ısı değiştiricisinin rıng k-ε türbülans modeli ile sayısal analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, volume 8 (1), 64-78. doi: 10.29109/gujsc.625585.

Chen, SW, Chiu, WJ, Lin, MS, Kuo, FJ, Chai, ML, Lee, JD. and Shih, C. (2017). 1D and Q2D thermal resistance analysis of micro channel structure and flat plate heat pipe, *Microelectronics Reliability*, 72, 103-114.

Turgut, E. (2020, Haziran). Dairesel kesitli türbülans üreticilerinin ısı performansının araştırılması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, cilt 11(2), 481-490. doi:10.24012/dumf.511382.

U. Bese, (1988). *Baca gazları için ısı borusu tasarımı ve optimizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Uğurlubilek, N. ve Uralcan, İ. Y. (2011). Halisel türbülâtörün ısı geçmişine etkisinin sayısal incelenmesi. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 24(2), 71-84.

Yakut, M.Z. (2007). *Soğutucu akışkan-hava ile çalışan ısı değiştiricilerinin teorik ve deneysel incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Yıldız, Ş. (2007). İç içe borulu ısı değiştirgeçlerinde yaylı *türbülötörlerin ısı transferi ve basınç kaybına etkisi*.(Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Yiğit, M. (2010). İç içe borulu yay tipi *türbülötörlü bir ısı değiştiricisinde türbülans modelinin ısı transferine etkisinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Wang, Z., Wang, R., Li, Z., Wang, M. and Wan, L. (2023). Numerical investigation on the effect of cylindrical turbulator on performance of corrugated plate-fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, volume 230, Part A. doi:10.1016/j.applthermaleng.2023.120726.

BÖLÜM II

KLOR KAYNAKLI KOROZYON BAŞLANGIÇ SÜRESİ HESAP YÖNTEMLERİ VE LIFE-365 ÖRNEĞİ

Calculation Methods for the Initiation Time of Chloride Induced Corrosion and Life-365 Example

Seda AKDUMAN¹

*¹(Öğr.Gör.Dr.), Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi,
Zonguldak Meslek Yüksekokulu,
İnşaat Bölümü, İnşaat Teknolojisi Programı
e-mail: sedaduyar@beun.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-8017-1891*

1. Giriş

Durabilite, yapı malzemelerinin veya yapıların, işlevlerini servis ömrü boyunca bozulmadan yerine getirmeleridir (Baradan vd., 2010). Uygun projelendirilmiş, üretilmiş, geçirimsiz, yalıtımlı yapılar uzun ömürlü ve dayanıklı iken; yalnızca dayanımın dikkate alındığı bazı yapılarda önemli hasarlar gözlemlenmiştir. 1932 yılında Los Angeles'taki Altıncı Cadde Viyadük Köprüsü, alkali silika sebepli çatlaklar sebebiyle büyük hasar görmüştür (Baradan ve Aydın, 2013). Silver ve Cho (2012), hasarlı köprünün mevcut durumunu değerlendirmiş ve elli yıl içinde oluşabilecek büyük ölçekli bir depremde köprünün yıkılma olasılığını %70 olarak hesaplamışlardır. Görülmüştür ki, başlangıçta öngörülemeyen durabilite sorunları, yapının yıkımına dahi sebep olabilmektedir. Bu sebeple yapının durabilitesini olumsuz yönde etkileyecek parametrelerin proje aşamasında belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bertolini ve arkadaşlarına (2004) göre betonarme yapıların bozulmasına yol açan en büyük çevresel etki korozyondur. Klor iyonu da betonarme yapılardaki çeliğin korozyona uğramasına sebep olan en önemli etkenlerdendir

(Basheer vd., 1996). Deniz kenarlarında bulunan kıyı ve liman yapıları, sahile yakın yapılar, denizde ayakları bulunan köprüler, viyadükler ve yollar, zaman içinde klora bağlı durabilite problemleri yaşayabilmektedir.

Donatının korozyonu ile donatı çevresinde pas tabakası oluşur ve donatı en kesit alanı azalır. Donatıyı saran pas tabakası betonda hacim artışına sebep olur ve hacim artışı da kabuk betonda çekme kuvvetleri oluşmasına sebebiyet verir. Betonun çekme kuvveti çok küçük olduğundan çekme kuvvetleri betonu çatlatır; sonrasında da kabuk betonun dökülmesine sebep olur. Kabuk betonun zarar görmesi ile donatı olumsuz çevresel etkilere açık hale gelir. Bunun sonucunda da korozyon hızı artar, aderans azalır, yapının performansı düşer (Vu and Stewart, 2000). Bu noktada mevcut bir yapının servis ömrünü doğru belirlemek yapının tamir yapılması gereken zamanı ve tamir maliyetini hesaplamak için önemli iken; yeni yapılacak bir yapıda ise çevresel koşullara uygun malzeme ve proje tasarlamak, yapının istenilen servis ömrüne ulaşmasını sağlamaktadır. Betonarme yapıların servis ömürlerini tahmin etmek için korozyon süreci laboratuvarında ve sahada elektrokimyasal, ultrasonik, akustik vb. yöntemlerle izlem gerektirir (Hahrigat ve Zehtab, 2016).

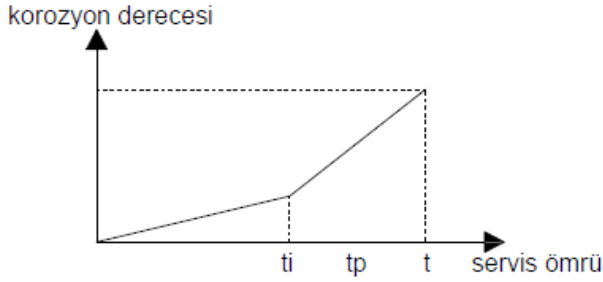
Donatı korozyonuna sebep olan klor iyonlarının içeriden ve dışarıdan olmak üzere çeşitli kaynakları olabilir. Agregat, çimento ve katkı maddelerinde bulunan klor, içeriden klor kaynağına; deniz suyu ve buz çözücü tuzlar da dışarıdan klor kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Betonun üretiminde de klor bulunma ihtimali var olduğundan ülkelerce kabul edilen şartnamelerde klor miktarlarına sınırlama getirilmiştir. Dışarıdan etki eden klor ise difüzyon, geçirgenlik, kılcallık, klor bağlanması gibi farklı mekanizmalarla betona nüfuz eder.

Tutti (1982) klorür iyonlarına maruz kalan betonarme yapıların servis ömürlerini korozyon başlama ve yayılma olmak üzere ikiye ayıran bir tahmin modeli önermiştir. Servis ömrü,

$$t = t_i + t_p \quad (1)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada t_i korozyonun başlangıç zamanını, t_p ise yayılma zamanını ifade eder. Klor iyonlarının korozyonu başlatacak kritik değere ulaşması ile korozyon başlar, donatının etrafındaki pasif tabaka kırılır ve t_i zamanına ulaşılmış olur. Korozyon başladıktan sonra geçen zamanda da korozyon etkilerinin daha da arttığı yayılma zamanı oluşur (Şekil 1). Korozyon başlama ve korozyon yayılma zamanlarını belirlemek için literatürde analitik ve deneysel farklı çalışmalar yapılmıştır (Tuutti, 1982; Muthena vd., 2000;

Ahmad,2003; Kwon vd., 2009; Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018; Thomas ve Bentz, 2018; Borah vd., 2020).



Şekil 1. Klor İyonu Kaynaklı Korozyon Etkisindeki Bir Yapının Servis Ömrü

2. Korozyon Başlangıç Zamanı

Korozyon başlangıç zamanı tahmin modelleri Fick'in ikinci difüzyon yasasına dayanır (Crank, 1956). Literatürde korozyon başlama zamanını tahmin etmek için bazı modeller önerilmiştir; Kwon's Modeli, Bazant Modeli, Life-365 Modeli, ClinClonc Modeli, Duracrete Modeli (Tuutti, 1982; Muthena vd., 2000; Ahmad,2003; Kwon vd., 2009; Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018; Thomas ve Bentz, 2018; Borah vd., 2020). Bu çalışmada başlangıç modellerinden Kwon Modeli ve Life 365 Modeli açıklanacak, çalışmanın sonunda da Life 365 modeli ile farklı özellikteki betonarme yapıların korozyon başlangıç zamanları incelenecektir.

Klor iyonları beton yüzeyinde birikir. Biriken klor çeşitli mekanizmalar ile beton içerisine taşınmaktadır. Taşınma mekanizmasını belirleyen etken ise betonun nem durumu ve çevresel koşullardır. Örneğin sürekli deniz suyu içerisinde bulunan bir köprü ayağındaki doymuş betonda, difüzyon mekanizması etkili olurken, sürekli deniz suyunun içinde olmayan fakat tekrarlı ıslanma-kuruma veya dalgaya maruz tabliye, yol gibi doymamış beton içerisinde kılcallık mekanizmaları da etkilidir (Mehta, 1991). Klor iyonları betona nüfus ettikten sonra donatıya doğru ilerleyerek donatı yüzeyinde yayılırlar. Donatı yüzeyindeki klor iyon konsantrasyonu (C_s), korozyonun başlamasına sebep olan kritik eşik klor değerine (C_{th}) ulaştığında, donatıdaki pasif tabakayı kırar ve korozyon süreci başlamış olur. Bu bilgilere göre korozyonun oluşup oluşmadığı donatı yüzeyindeki klor konsantrasyonunun (C_s) eşik değeri (C_{th}) aşır aşmadığına göre belirlenmektedir. Öyleyse ilk önce klor konsantrasyonu ile mesafe ilişkisi elde edilmelidir. Bu amaçla beton yüzeyinden itibaren farklı derinliklerdeki

numuneler üzerinde klor konsantrasyonları belirlenir. Konsantrasyon betonun kalitesi ve maruz kaldığı çevresel şartlara göre değişmektedir. Klor biriken yüzeydeki konsantrasyon, maksimum iken, beton yüzeyinden içerilere doğru girildikçe klor konsantrasyonu azalır (Neville, 1995).

Korozyon başlangıç zamanı tahmin modelleri Fick'in ikinci difüzyon yasasına göre hesaplanır:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

$C(x,t)$ t anında, x derinliğindeki klor konsantrasyonu, D ise difüzyon katsayısıdır. Bioubakhsh'in (2011) çalışmasında da belirttiği üzere klor girişini tahmin etmek için en çok kullanılan bu yöntem, 1972 yılında Collepardi ve diğerlerinin yaptığı araştırmaya dayanmaktadır. Kwon'un geliştirmiş olduğu modele göre ise $C(x,t)$ klor konsantrasyonu,

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_m(t)f(w)t}} \right) \right] \quad (3)$$

ile hesaplanabilmektedir. C_s yüzeydeki klor miktarı (kg/m^3), x klor ölçülen yerin yüzeyden uzaklığı (mm), D_m hesap yapılan zamandaki difüzyon katsayısı (mm^2/s), erf hata fonksiyonu, $f(w)$ ise korozyon kaynaklı betonda oluşan çatlakların ivmesini ifade etmektedir. Bu modelde beton yüzeyindeki başlangıç klor miktarı sıfır kabul edilir. Yüzey klor miktarı (C_s) veya klor konsantrasyonu $C(x,t)$ beton veya içeriğindeki bir bağlayıcı hacmine bağlı yüzdelik olarak da verilebilmektedir. (1) ve (3) denklemleri çözüldüğünde korozyonun başlama zamanı hesaplanmış olur.

Difüzyon katsayısı betonun su/çimento oranı, sıcaklık, bağlayıcı cinsi ve miktarlarına göre değişmektedir. t anındaki difüzyon katsayısı,

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (4)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada m bir sabittir. Bozulma oran indeksi veya yaş faktörü olarak isimlendirilir ve güç yasasına göre difüzyon katsayısının zamanla azaldığı varsayılır. D_{ref} referans zamandaki difüzyon katsayısıdır. Referans zaman genellikle 28 gün kabul edilir. Model Code 2010'da da aynı m üstel katsayısı kullanılmıştır (Walraven vd., 2010). Collepardi ve arkadaşlarının önerdiği modele göre eğer $m=0$ ise bir $D(t) = D_{ref}$ olmaktadır. Fakat bu model günümüzde genel olarak tavsiye edilmemektedir (Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018). Ortalama difüzyon katsayısı $D_m(t)$ maruziyet süresine göre,

$$D_m(t) = \frac{D_{ref}}{1-m} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad t < t_R,$$

$$D_m(t) = D_{ref} \left[1 + \frac{t_R}{t} \left(\frac{m}{1-m} \right) \right] \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad t \geq t_R \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır (Poulsen, 1993). Denklemdaki t_R genellikle 30 yıl olarak alınır (Thomas ve Bentz, 2018). t_{ref} difüzyon katsayısının ölçüldüğü zamanı vermektedir.

Betonda çatlak gelişmesi ile t anındaki ortalama difüzyon katsayısı $D_m(t)$ artar. Bu sebeple betonda çatlak oluşumuna göre kullanılacak ölçek fonksiyonu,

$$f(w) = 31.61w^2 + 4.73w + 1 \quad (6)$$

şeklinde hesaplanır (Kwon vd., 2009). Denklemdaki w mm boyutunda çatlak genişliğidir; 0.3 mm genişliğinde çatlak olması difüzyon katsayısının 5.26 ölçeğinde büyümesine sebep olmaktadır (Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018). Gerçekte çatlak genişliği arttığı için, fonksiyonun artarak düzenlenmesi gerekir. Adım adım çatlak arttırarak çözüm yapmak uzun süreceğinden, çözümü hızlandırmak için son adımdaki çatlak genişliği değerlendirmesi yapılır (Smilauer vd., 2013).

Bentz ve Thomas su/çimento (w/c) oranına bağlı olarak referans zamandaki difüzyon katsayısını veren bir formül geliştirmişlerdir (Thomas ve Bentz, 2018). Geleneksel portland çimentosu kullanılan betonda referans difüzyon katsayısı,

$$D_{ref} = D_{28} = 10^{(-12.06+2.40w/c)} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Betona ilave edilen silis dumanı (SF) permeabiliteyi düşürür ve yeni difüzyon katsayısı silis dumanına bağlı olarak,

$$D_{SF} = D_{OPC} e^{-0.165\%SF} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. D_{OPC} portland çimentosunun hesaplanan difüzyon katsayısıdır (Borah vd., 2020). Difüzyon katsayısını beton içeriği, çimento özellikleri, çevresel koşullarını da hesaba katarak hesaplamak zordur. DuraCrete modeline göre,

$$D_a(t) = D_m(t) = k_e k_c D_{Cl}(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \gamma_{Da} \quad (9)$$

ile difüzyon katsayısı hesaplanabilmektedir. Denklem 9'da k_e çevresel faktördür; 0.27-3.88 aralığında değişebilir. k_c kür faktörüdür; 0.79-2.08 aralığında değişebilir. $D_{Cl}(t_0)$ t_0 anında ölçülen difüzyon katsayısıdır. m bozulma oran

faktörüdür; 0.2-0.93 aralığındadır. g_{Da} kısmi faktördür; 1.25-3.25 aralığındadır. DuraCrete modelindeki notasyonlar Kwon Modeline göre $D_a(t)=D_m(t)$ ve $t_0=t_{ref}$ olarak ifade edilmektedir. Tablo 1’de bağlayıcı tiplerine bağlı olarak, püskürtme ve sıçrama bölgelerinde kullanılabilir bozulma oran indeksleri verilmiştir (Muthena vd., 2000).

Tablo 1. Farklı Bağlayıcı Tiplerine Göre Püskürtme ve Sıçrama Bölgelerindeki Bozulma Oran Faktörü (Muthena vd., 2000)

Bağlayıcı Tipi	Bozulma Oran Faktörü (m)
Portland çimentosu (CEM I)	0.37
CEM I + silis dumanı	0.39
CEM I + cüruf	0.60
CEM I + uçucu kül	0.93

Luping ve Utgennant’ın (2007) püskürtme/sıçrama bölgelerinde 10 yıl yürütülen deneysel saha verileri en gerçekçi sonuçları vermektedir (Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018). Yazarlar çalışmalarında DuraCrete modelinin püskürtme bölgesi için uzun vadede difüzyon modelini düşük çıkardığını bu sebeple de yapının yetersiz servis ömrü hesaplanmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir (Luping ve Utgennant, 2007). Bu sebeple bazı araştırmacılar Luping ve Utgennant’ın (2007) 10 yıllık gerçek verilerine dayanan ve fiziksel modellerle birleştirilen denklemleri (3, 4, 5, 6, 9) kullanmayı önermişlerdir (Smilauer vd., 2013; Hajkova vd., 2018).

Korozyon başlangıç zamanını yukarıda bahsedilen Kwon ve DuraCrete modelleri olasılığa dayalı hesaplar; Life 365 ise deterministik çözüm ile hesaplamaktadır.

Life 365 modellemesinde çevresel yıpratıcı etkiler DuraCrete modelindeki gibi benzer özellikler taşımakla birlikte; DuraCrete modelinde servis ömrü korozyonun başladığı yani donatı yüzeyindeki pasif tabakanın yok olduğu süreyi baz alırken, Life 365 modelinde ise servis ömrü korozyonun başlaması ve yayılması sürelerini kapsar. Yani modelde klor iyonları donatıya ulaştıktan sonraki bozulma zamanı da servis ömrüne dahil edilir (Violetta, 2002; Ehlen ve Kojundic, 2014). Modelde yayılma süresi korumasız çelik için 6 yıldır. Modelin amacı da farklı çevresel koşullara göre korozyondan en uygun korunma yöntemini belirleyebilmektir. Modellemede ABD için kayıtlı coğrafi bölgelere ait meteorolojik veriler ve klor konsantrasyonları bulunmaktadır. Kayıtlı olmayan bölgeler için ise kullanıcı kendi bölge özelliklerini tanımlayabilmektedir. Bu durum da modelin dünyanın her yerinden kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Life 365 modeli de diğer modeller gibi Fick’in ikinci difüzyon

yasasına dayanır ve denklem 4 ile hesaplanır. Bu denklemde difüzyon katsayısının zamanla azalmasını önleyebilmek adına t süresi 25 yıla kadar alınır; 25 yıldan sonraki her zaman değeri için t=25 yıl seçilerek difüzyon katsayısı sabitlenir.

Life 365 modeli, difüzyon hesabında sıcaklığa bağlı değişiklikleri hesaba katmak için de,

$$D(T) = D_{ref} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (10)$$

ilişkisini kullanır. D(T), t zamanındaki T sıcaklığına bağlı difüzyon katsayısı, D_{ref} t_{ref} (28 gün) zamanındaki difüzyon katsayısı, T_{ref} (=293 K) sıcaklık değeri, U difüzyon işleminin aktivasyon enerjisi (35000 j/mol), R gaz sabitini ifade etmektedir. Eğer model verilerinde istenilen lokasyon bulunmuyorsa denklem 10 ile yeni sıcaklıklara ait difüzyon katsayıları hesaplanabilmektedir. D_{ref} 28.gündeki difüzyon katsayıları da portland çimentosu için denklem 7 ile, katkılı çimento için ise denklem 8 ile hesaplanmaktadır. m, DuraCrete ve Kwon modellerinde olduğu gibi bozulma oran indeksidir ve tüm çimento tipleri için,

$$m = 0.2 + 0.4(\% FA/50 + \% SG/70) \quad (11)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem sadece maksimum %50 uçucu kül ve %70 cüruf ikame oranlarına kadar kullanılabilir. m değeri 0.2 ile 0.6 aralığında değerler alabilmektedir. Model, hidrasyonun 25 yıl sonra tamamlandığını kabul eder ve difüzyon sabitini 25 yıllık değerde tutar. Modelde paslanmaz çeliğin korozyon klor eşik değeri (C_{th}) beton ağırlığına göre %0,05 olarak alınmaktadır.

Deniz suyuna maruz kalan beton yüzeydeki klor konsantrasyonu denizin coğrafi konumuna ve deniz seviyesinden olan uzaklığa bağlıdır. Life 365 bu bölgeleri etkilerine göre; deniz sıçrama bölgesi, deniz püskürtme bölgesi; okyanustan 800 m içeride; okyanustan 1,5 km içeride olmak üzere dört bölgeye ayırır. Her bölge için farklı maksimum yüzey klor değerleri verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. Bölgelere Göre Maksimum Yüzey Klor Konsantrasyonu ve Artış Oranları

Bölge	Artış Oranı (% yıllık)	Maksimum Yüzey Klor Konsantrasyonu (C _{smax} %)
Sıçrama Bölgesi	ani	0.8
Deniz püskürtme bölgesi	0.10	1.0
Okyanustan 800 m içeride	0.04	0.6
Okyanustan 1500 m içeride	0.02	0.6

3. Life 365 Modeli ile Korozyon Başlangıç Süresi Belirlenmesi

Betonarme yapılar için korozyon başlama süresinin farklı modellerle hesaplanabildiği yukarıdaki bölümde anlatılmıştı. Bu bölümde ise anlatılan modellerden Life 365 modeline göre seçilen özelliklerdeki betonarme elemanların korozyon başlangıç süreleri hesaplanacaktır.

Life 365 v2.2.3 Modeli yapının coğrafi konumu, yapının tipi, pas payı kalınlığı, su/çimento oranı ve çimento cinsine göre belirlenen temel verileri kullanarak deterministik ve olasılığa dayalı servis ömrü hesabı yapabilmektedir. Bu çalışmadaki amaç farklı özellikteki korozyona maruz betonarme yapıların korozyon başlangıç sürelerini ve dolayısıyla servis ömürlerini hesaplamaktır. Korumasız çeliğin yayılma süresi Life 365 modelinde 6 yıl olduğundan bütün örneklerde aynı kalacaktır.

Life 365 veri tabanında kayıtlı coğrafi konum, yapı tipi ve çevresel maruziyet koşulları seçildiğinde, program sıcaklık ve coğrafi değerlerden oluşan o bölge için maksimum yüzey klor yoğunluğunu ve sıcaklık değerlerini kullanır. Veri tabanı ABD eyaletlerini kapsamaktadır. Dolayısıyla bu bölgenin dışındaki bölgelerde hesap yapmak için kullanıcı verileri programa manuel girilmektedir.

Çalışmada farklı sıcaklık dereceleri olan Karadeniz ve Akdeniz bölgelerindeki aynı en kesit özelliklerine sahip iki adet betonarme kolonun korozyon başlangıç süreleri incelenmiştir. Burada modelde etkili olan bazı parametrelerin kendi içlerinde ve farklı coğrafyalardaki etkileri incelenmiştir.

Betonarme kolon, TS EN 206 (2014) ve tamamlayıcı standardı TS 13515'te (2014) betonda çevresel etki sınıflarına uygun olarak gelgit-dalga ve serpinti bölgelerini ifade eden XS çevresel etki sınıfından; deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin sebep olduğu korozyonu ifade eden XS3 çevresel etki sınıfına girmektedir. Yapının Batı Karadeniz bölgesinde yer alan Zonguldak ve Akdeniz bölgesinde Antalya şehirlerinde yer aldığı kabul edilmiştir. Betonarme kolon kesiti 40x40 cm alınmıştır. Su/çimento oranı 0.40, çimento tipi CEM I, bozulma oranı $m=0.20$ olarak alınmıştır. Bazı kaynaklarda ıslanma-kuruma döngüsünde bulunan betonarme yapı elemanları için yüzey klorür miktarı ağırlıkça çimentonun %2.5'i olarak alınırken (Muthena vd., 2000), bazı kaynaklarda da %2.2'ye kadar alınması önerilmiştir (Bamforth vd., 1997). Söz konusu modelde ise %2.5 olarak kabul edilmiştir. Korozyonu başlatacak klor eşik değeri ağırlıkça betonun %0.05'i (C_{th}) olarak alınmıştır. Life 365 modeli betonun hidratasyonunun 25 yılda tamamlandığını varsayar, yani 25. yıldan sonra difüzyon katsayısını sabit kabul ederek çözümleme yapar. Elemanın maksimum yüzey konsantrasyonuna ulaşma süresi 50 yıl olarak seçilmiştir.

Çalışmadaki değişkenler coğrafi konuma bağlı sıcaklık değişimi, pas payı ve su/çimento oranı olarak seçilmiştir. Akdeniz’de Antalya iline, Karadeniz’de Zonguldak iline ait on iki aylık ortalama sıcaklıklar Tablo 3’te verilmiştir (URL-1, URL-2).

Tablo 3. Karadeniz ve Akdeniz Bölgelerine Ait Aylık Ortalama Sıcaklıklar (URL-1, URL-2)

Aylar	Karadeniz (°C)	Akdeniz (°C)
Ocak	7	10
Şubat	6	10
Mart	8	13
Nisan	12	16
Mayıs	16	21
Haziran	20	26
Temmuz	22	29
Ağustos	23	29
Eylül	19	25
Ekim	16	20
Kasım	12	15
Aralık	8	11

Paspayı için 25 ve 40 mm olmak üzere iki farklı değer; su/çimento oranı olarak 0.40 ve şartnameye (TS EN 206, 2014; TS 13515, 2014) göre seçilebilecek maksimum oran olan 0.45 seçilmiştir. Çalışmada her bir farklı parametre için toplam 8 adet çözüm yapılmıştır (Tablo 4).

Tablo 4. Karadeniz ve Akdeniz Bölgelerine Ait Modeller

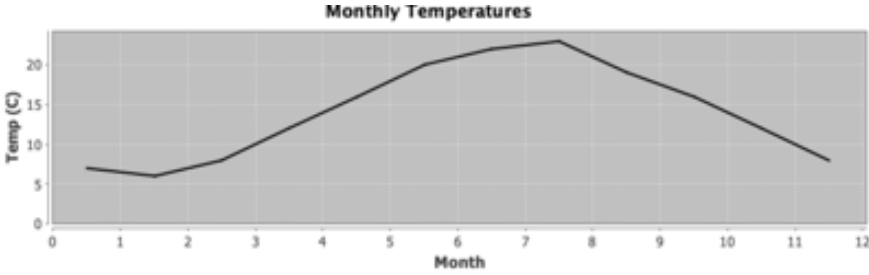
İsim	Bölge	Paspayı (mm)	w/c
Model 1-25-0.40	1-Karadeniz	25	0.40
Model 1-25-0.45	1-Karadeniz	25	0.45
Model 1-40-0.40	1-Karadeniz	40	0.40
Model 1-40-0.45	1-Karadeniz	40	0.45
Model 2-25-0.40	2-Akdeniz	25	0.40
Model 2-25-0.45	2-Akdeniz	25	0.45
Model 2-40-0.40	2-Akdeniz	40	0.40
Model 2-40-0.45	2-Akdeniz	40	0.45

4. Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Söz konusu çalışmada, Life 365 Modelinde yalıtımsız farklı iki coğrafi bölgede, farklı iki paspayı ve su/çimento oranına sahip betonarme bir kolonun korozyon başlangıç süreleri incelenmiştir.

4.1. Karadeniz Bölgesindeki Korozyon Başlangıç Süresi

İlk olarak Life 365 modelinde Karadeniz bölgesinde yer alan Zonguldak iline ait on iki aylık ortalama sıcaklıklar tanımlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Life 365 Modelinde Zonguldak İline Ait Aylık Ortalama Sıcaklıkların Değişimi

Karadeniz bölgesinde Zonguldak ili için model parametrelerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Karadeniz Bölgesindeki (Zonguldak ili) Örnek Betonarme Kolonların Korozyon Başlangıç Süreleri

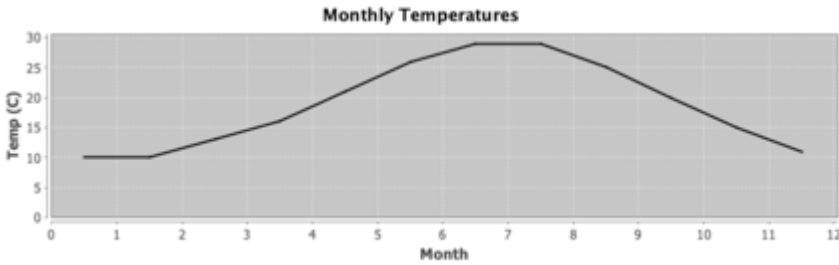
İsim	Difüzyon Kats. (m ² /s)	Korozyon başlangıç süresi (t.)
Model 1-25-0.40	7.94E-12	10.6
Model 1-25-0.45	1.047E-11	9.7
Model 1-40-0.40	7.94E-12	15.5
Model 1-40-0.45	1.047E-11	13.7

Life 365 modelinde referans difüzyon katsayısının Denklem 7 ile hesaplandığı yukarıda belirtilmiştir. Bu denklem su/çimento oranına göre değiştiğinden modellerdeki difüzyon katsayısının da su/çimento oranına göre değişmesi beklenmektedir. Modellerde 0.40 ve 0.45 oranlarında iki farklı su/

çimento oranı kullanılmıştır. 0.40 su/çimento oranına sahip modellerde 28. güne ait difüzyon katsayısı $7.94E-12$ m²/s çıkarken; 0.45 su/çimento oranına sahip modellerde ise 28. güne ait difüzyon katsayısı $1.047E-11$ m²/s çıkmıştır. Değerlerden de görülmektedir ki su/çimento oranının büyümesi difüzyon katsayısını arttırmıştır. Beton karışıma giren su miktarı arttığından betonun geçirimsizliği azalmış, dolayısıyla difüzyon katsayısı da artmıştır. Yani su/çimento oranı daha fazla olan karışımda su dolayısıyla klor daha hızlı ilerleyecek bu durum da korozyonun başlangıç süresini kısaltacaktır. Paspayı 25 mm olan modellerde su/çimento oranı 0.40 iken, korozyon başlangıç süresi 10.6 yıl olarak çıkarken; aynı pas payında su/çimento oranı 0.45'e yükseldiğinde ise korozyon başlangıç süresi 9.7 yıl çıkmıştır. Yani aynı pas payında su/çimento oranının artması korozyon başlangıç süresini yaklaşık 11 ay hızlandırmıştır. 0.40 su/çimento oranına sahip aynı betonarme elemanda sadece pas payının 25 mm'den 40 mm'ye yükselmesi ise korozyon başlangıç süresini 10.6 yıldan 15.5 yıla yükseltmiştir. Yani pas payının daha fazla bırakılması, korozyon başlangıç süresini %46 arttırmıştır. Su/çimento oranı 0.45 olan modellerde ise pas payı artışı ile birlikte korozyon başlangıç süresi %41 artarak 9.7 yıldan 13.7 yıla yükselmiştir.

4.2. Akdeniz Bölgesindeki Korozyon Başlangıç Süresi

Life 365 modelinde Akdeniz bölgesinde yer alan Antalya iline ait on iki aylık ortalama sıcaklıklar tanımlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Life 365 Modelinde Antalya İline Ait Aylık Ortalama Sıcaklıkların Değişimi

Akdeniz Bölgesinde Antalya ili için model parametrelerine göre elde edilen sonuçlar Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Akdeniz Bölgesindeki (Antalya ili) Örnek Betonarme Kolonların Korozyon Başlangıç Süreleri

İsim	Difüzyon Kats. (m ² /s)	Korozyon başlangıç süresi (t _i)
Model 2-25-0.40	7.94E-12	9.8
Model 2-25-0.45	1.047E-11	9
Model 2-40-0.40	7.94E-12	13.8
Model 2-40-0.45	1.047E-11	12.4

Antalya ilinde su/çimento değeri 0.40 iken 28.gün difüzyon katsayısı 7.94E-12 m²/s; su/çimento oranı 0.45 iken ise 1.047E-11 m²/s çıkmıştır. Su/çimento oranının yükselmesi difüzyon katsayısının büyümesine sebep olmuştur. Bu durum da korozyon başlangıç sürelerini kısaltmıştır. 25 mm pas payına sahip modelde su/çimento oranı 0.40 iken korozyon başlangıç süresi 9.8 yıl; su/çimento oranı 0.45 iken de 9 yıla düşmüştür. Yani su/çimento oranının artması korozyon başlangıç süresini yaklaşık 10 ay kısaltmıştır. Su/çimento oranı 0.40 iken pas payının 25 mm'den 40 mm'ye yükselmesi korozyon başlangıç süresini 9.8 yıldan 13.8 yıla; su/çimento oranı 0.45 iken pas payının 25 mm'den 40 mm'ye yükselmesi korozyon başlangıç süresini 9 yıldan 12.4 yıla yükseltmiştir. 0.40 su/çimento oranında pas payı artışı korozyon başlangıç süresinin %41 artmasına; 0.45 su/çimento oranında pas payı artışı korozyon başlangıç süresinin %38 artmasına; sebep olmuştur.

4.3. Genel Karşılaştırma

Antalya şehrindeki sıcaklıkların Zonguldak şehrine göre daha fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3). Sıcaklık artışı korozyon başlangıç sürelerini azaltmıştır (Tablo 7). Örneğin su/çimento oranı 0.40 ve pas payı 25 mm iken korozyon başlangıç süresi Zonguldak şehrinde 10.6 yıl çıkarken, Antalya şehrinde ise 9.8 yıla gerilemiştir. Su/çimento oranı 0.45 iken de sıcaklık artışı korozyon başlangıç sürelerini kısaltmıştır. 25 mm pas payında korozyon başlangıç süresi Zonguldak'ta 9.7 yıl, Antalya'da ise 9 yıl çıkmıştır. Karadeniz bölgesinde su/çimento oranı 0.40 iken pas payının 25 mm'den 40 mm'ye artışı da korozyon başlangıç süresini %46 arttırmışken; Akdeniz bölgesinde ise %41 arttırmıştır. Yani aynı su/çimento oranına sahip bir betonarme yapı elemanında pas payı artışı ile beklenen korozyon başlangıç süresi artışı daha sıcak olan bölgede, nispeten daha düşük sıcaklıktaki bölgeye göre daha az olmuştur. Su/çimento

oranı 0.40'tan 0.45'e arttığında ise 25 mm pas payı için Karadeniz bölgesinde korozyon başlangıç süresi yaklaşık 11 ay azalırken; daha sıcak olan Akdeniz bölgesinde ise 9 ay azalmaya sebep olmuştur. Pas payı 40 mm'ye çıktığında ise Karadeniz bölgesindeki korozyon başlangıç süresi yaklaşık 22 ay azalırken; daha sıcak olan Akdeniz bölgesinde ise 17 ay azalmasına sebep olmuştur.

Tablo 7. Bölgelere Göre Korozyon Başlangıç Sürelerinin Karşılaştırılması

Su/çimento	Pas payı(mm)	Korozyon başlangıç süresi (yıl)	
		Zonguldak	Antalya
0.40	25	10.6	9.8
	40	15.5	13.8
0.45	25	9.7	9
	40	13.7	12.4

Programda korozyon yayılma süreleri bütün modeller için 6 yıl kabul edilmiştir. Bu sebeple servis ömürlerini hesaplamak için korozyon başlama sürelerine 6 yıl ilave edilmiştir (Tablo 8). En uzun servis ömrü Karadeniz bölgesinde 0.40 su/çimento oranına sahip, 40 mm pas payı olan betonarme kolonda 21.5 yıl çıkarırken; en kısa servis ömrü ise Akdeniz bölgesinde 0.45 su/çimento oranında 25 mm pas payı olan betonarme kolonda 15 yıl olarak çıkmıştır.

Tablo 8. Modellerin Servis Ömürleri

İsim	Bölge	Korozyon başlangıç süresi (t _i)	Korozyon yayılma süresi (t _p)	Servis ömrü (t)
Model 1-25-0.40	Karadeniz	10.6	6	16.6
Model 1-25-0.45	Karadeniz	9.7	6	15.7
Model 1-40-0.40	Karadeniz	15.5	6	21.5
Model 1-40-0.45	Karadeniz	13.7	6	19.7
Model 2-25-0.40	Akdeniz	9.8	6	15.8
Model 2-25-0.45	Akdeniz	9	6	15
Model 2-40-0.40	Akdeniz	13.8	6	19.8
Model 2-40-0.45	Akdeniz	12.4	6	18.4

5. Sonuç

Bu çalışmada farklı coğrafi konumlardaki betonarme elemanların servis ömürleri deterministik yöntem ile hesaplanmıştır. Ayrıca çalışmada farklı su/çimento oranlarının ve pas payının sebep olduğu etkiler de incelenmiştir. Yapının gelgit-dalga ve serpinti bölgesinde-deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin sebep olduğu korozyona maruz kalacağı (XS3) kabul edilmiştir. Betonarme elemanları modellemek için Life 365 programı kullanılmıştır. Bu modellemede sıcaklık da hesaplamalara dahil edildiği için farklı coğrafyaları temsil etmesi açısından Türkiye’de denize kıyısı olan Akdeniz bölgesi ile daha soğuk Karadeniz bölgesi tercih edilmiştir. Life 365’te modelleme yaparken veri tabanındaki coğrafi bölgeler kullanılmayacaksa kullanıcının sıcaklık koşullarını belirtmesi gerektiğinden; Karadeniz bölgesi için Zonguldak iline ait, Akdeniz bölgesi için ise Antalya iline ait aylık ortalama sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Pas payı olarak 25 mm ve 40 mm; su/çimento oranları olarak da 0.40 ve 0.45 değerleri kullanılmıştır. Seçilen değerlerin tamamı XS3 çevresel etki sınıfına uygun alınmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Su/çimento oranındaki artış difüzyon katsayısını arttırmıştır.
- Pas payı artışı korozyon başlangıç süresini arttırmıştır.
- Coğrafi konuma bağlı sıcaklık artışı, pas payı ve su/çimento oranından bağımsız olarak korozyon başlangıç süresinin kısılmasına sebep olmuştur.
- Pas payı artışı daha düşük sıcaklıkta aynı su/çimento oranına sahip betonarme elemanlarda yüksek sıcaklığa göre daha etkili olmuştur.
- Korozyon başlangıç süresi üzerinde coğrafi konum, pas payı ve su/çimento oranı etkilidir.
- Korozyon başlangıcı ne kadar geç olursa yapının dayanım ve dayanıklılığı o kadar iyi olacaktır. Bu sebeple yüksek durabilite için, her türlü iklim koşullarında düşük su/çimento oranına sahip beton ile yüksek pas payı kalınlıkları tercih edilmelidir.
- Life 365 modellemesinde yapı servis ömrü çelik donatıların korozyon başlangıcı ve yayılma dönemini kapsar. Yayılma dönemi bütün modellerde 6 yıl olarak alınmıştır. Yani bu modelde yayılma döneminde parametrelerin etkisi yoktur.
- Analizlerde korozyon başlangıç süreleri hesaplanmıştır. Literatürde korozyon yayılma zamanını tahmin etmek için de farklı bazı modeller (Bazant modeli, Morinaga Modeli, Wang and Zhao Modeli vb.) önerilmiştir. Korozyon yayılma zamanı için de diğer modeller kullanılabilir.

- Yapının maruz kalacağı yıpratıcı çevresel etkilere göre yalıtım tipleri ve maliyetlerini hesaplayabilmek için Life 365 kullanılabilir.
- Life 365 modeli farklı maruziyet koşulları için kapsamlı veri tabanına sahiptir (Khan vd., 2017). Tasarım mühendisleri betonarme yapılar için de bu modeli rahatlıkla kullanabilmektedir.

Kaynakça

- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review. *Cement&Concrete Composites*. 25, s. 459-471. doi:10.1016/S0958-9465(02)00086-0.
- Bamforth, P.B., Price, W.F., Emerson, M., (1997). An international review of chloride ingress into structural concrete. *Contractor Report 359*. Report 1303S/96/9092.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2010). *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları.
- Baradan, B. ve Aydın, S., (2013). Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). *Hazır Beton*. s. 54-68.
- Basheer, P., Chidiact, S., Long, A., (1996). Predictive models for deterioration of concrete structures. *Construction and Building*. 10(1), s. 27-37. doi:10.1016/0950-0618(95)00092-5.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R., (2004). *Corrosion of Steel in Concrete*. Wiley-VCH, Weinheim.
- Bioubakhsh, S., (2011). The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling. *Doctoral thesis*. UCL University College London.
- Borah, M.M., Dey, A., Sil, A., (2020). Service life assessment of chloride affected bridge located in coastal region of India considering variation in the inherent structural parameters. *Structures*. 23, s. 191-203. doi: 10.1016/j.istruc.2019.09.020.
- Crank, J., (1956). *The mathematics of diffusion*. Oxford: The Clarendon Press.
- Ehlen, M.A. and Kojundic, A.N., (2014). Life-365TM v2.2 Adding user estimates of chloride exposure. *Concrete International*.
- Hahrigat, A. and Zehtab, B., (2016). Structural reliability of reinforced concrete beams/columns under simultaneous static loads and steel reinforcement corrosion. *Arab J Sci Eng*. 41, s. 3945-3958. doi: 10.1007/s13369-016-2033-6.

Hajkova, K., Smilauer, V., Jendele, L., (2018). Prediction of reinforcement corrosion due to chloride ingress and its effects on serviceability. *Engineering Structures*. 174, s. 768-777. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.006.

Khan, M.U., Ahmad, S., Al-Gahtani, H.J., (2017). Chloride-induced corrosion of steel in concrete: an overview on chloride diffusion and prediction of corrosion initiation time. *Hindawi International Journal of Corrosion*. Volume 2017, s. 9. doi:10.1155/2017/5819202.

Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S. et al. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*. 31(1), s. 75 – 83. doi: 10.1016/j.strusafe.2008.03.004

Luping, T. and Utgennant, P., (2007). Chloride ingress and reinforcement corrosion in concrete under de-icing highway environment a study after 10 years field exposure. *SP Technical Research Institute of Sweden*. SP report :76.

Mehta, P.K., (1991). *Concrete in the Marine Environment*, Essex: Elsevier Applied Science.

Muthena, A., Andrade, C., Nilsson, L.O., Edvardsen, C., (2000). DuraCrete Final Technical Report. *Technical Report*.

Neville, A.M., (1995). Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structures*. 28, s. 63 – 70.

Poulsen, E., (1993). On a model of chloride ingress into copncrete. Having time dependent diffusion coefficient. In: nilsson L-O editör. *Chloride penetration into concrete structures, Nordic Mini Seminar*. Goteburg.

Silver, E. and Cho, A., (2012). Movie star bridge's days numbered. ENR.com Engineering News-Record. Issue:03.12.2012.

Smilauer, V., Jendele, L., Cervenka, J., (2013). *Prediction of carbonation and chloride ingress in cracked concrete structures*. Scotland : Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Civil-Comp Press, 2013.

Thomas, M.D.A. and Bentz, D., (2018). *Life 365 computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete structures exposed to chlorides. User Manual (version 2.2.3)*. Life-365 Consortium III.

TS EN 206, (2014). *Beton-Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk Standardı*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS 13515, (2014). *TS EN 206'nın uygulamasına yönelik tamamlayıcı standard*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Tuutti, K., (1982). *Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete*. Stockholm.

URL-1.WEATHER SPARK. Antalya Bölgesinde Yıl boyu Hava ve İklim Durumu. (20/02/2023 tarihinde <https://tr.weatherspark.com/y/96456/Antalya-Türkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Yıl-Boyunca> adresinden ulaşılmıştır).

URL-2.WEATHER SPARK. Zonguldak Bölgesinde Yıl boyu Hava ve İklim Durumu. (20/02/2023 tarihinde <https://tr.weatherspark.com/y/97033/Zonguldak-Türkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Yıl-Boyunca> adresinden ulaşılmıştır).

Violetta, B., (2002). Life 365 Service Life Prediction Model. *Concrete International*. s. 53-57.

Vu, K.A.T. and Stewart, M.G., (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*. 22. s. 313-333. doi: 10.1016/S0167-4730(00)00018-7.

Walraven, J. et al., (2010). Fib Model Code 2010. *Technical Report*.

BÖLÜM III

İKİLİ KOATI OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Binary Coati Optimization Algorithm

Ayşegül İHSAN¹ & Tahir SAĞ²

¹(PhDc), Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Teknolojileri
Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, Türkiye
e-mail: aysegulih sann@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2829-9660

²(Doç. Dr.), Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
e-mail: tahirsag@selcuk.edu.tr
ORCID: 0000-0001-8266-7148

1. Giriş

Karmaşık ve çok boyutlu gerçek dünya uygulamaları çözümü kritik önem arz eden ve deterministik olarak çözülemeyen birçok NP optimizasyon problemi içerir. Yapısal tasarım, elektronik devre tasarımı, endüstriyel süreç optimizasyonu gibi mühendislik tasarım problemlerinde; üretim ve imalat süreçlerinin düzenlenmesinde; tedarik zinciri yönetimi, taşıma rotalarının planlanması, depolama alanının eniyilenmesi gibi lojistik ve dağıtım problemlerinde; kablosuz ağ planlaması, frekans tahsisi, sinyal gücü kontrolü gibi telekomünikasyon problemlerinde; portföy optimizasyonu, risk yönetimi, tahminleme modelleri gibi finansal problemlerde ve buna benzer pek çok mühendislik alanında bu tür optimizasyon problemleri ile karşılaşılmaktadır. Bu bağlamda, stokastik çalışma karakteristiği, gerçek dünya problemlerinin modellenmesi ve analiz edilmesinde önemli bir rol oynar. Rastgele olaylar ve belirsizlikler göz önüne alındığında, stokastik yaklaşımlar NP optimizasyon problemlerinin çözümünde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için kullanılır

ve karar verme süreçlerini destekler. Metasezgisel algoritmalar, doğal evrim sürecinden ve biyolojiden esinlenilerek stokastik çalışmayı genellikle iteratif şekilde modelleyen optimizasyon teknikleridir. Bu nedenle, metasezgisel algoritmaların kesin çözüm garantisi olmamakla birlikte, pratik uygulamalarda yeterli sonuçlar elde etmek için kullanılırlar. Çünkü iyi tasarlanmış bir metasezgisel algoritma, optimize edilen probleme yakın bir çözüme kolayca yakınsama sağlayabilir (Deb, 2012; Tzanetos & Blondin, 2023).

Optimizasyon problemleri, karar değişkenlerinin değerlerine göre genellikle iki ana sınıfa ayrılır: sürekli optimizasyon problemleri ve tamsayı optimizasyon problemleri (Cinar, 2023). Sürekli problemlerde, karar değişkenleri belirli bir aralıkta sonsuz değer alabilen gerçek sayılardır. Tam sayı optimizasyon problemlerinde ise karar değişkenleri tamsayı değerlerine sahiptir. Tamsayı optimizasyon problemleri, genellikle kombinatoriyal veya ayrık yapılara sahip problemleri ifade eder. Bu problemlerde boyutun artması daha zor çözülen NP-hard problemlerin oluşmasına neden olur (Sag & Ihsan, 2023; Baş, 2023; Sun, Wang, & Jin, 2021). Bu durum, metasezgisel algoritmaların kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

Bir üretim şirketinin, üretim süreçlerindeki farklı seçenekler arasından hangilerini kullanacağını belirlenmesi bir tamsayı optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Burada, üretim hattı sayısı veya üretim miktarı gibi kararlar tam sayı değerlerinde aranmalıdır. Diğer taraftan, bir şirket belirli projelere yatırım yapma kararı verirken, hangi projelerin kabul edilip edilmeyeceği ikili optimizasyonla belirlenebilir. Karar değişkeni sıfır veya bir olabilir, sıfır projenin kabul edilmediğini, bir projenin kabul edildiğini gösterir. İkili optimizasyon problemleri, tam sayı optimizasyon problemlerinin bir alt sınıfıdır. Diğer bir ifadeyle, ikili optimizasyon problemleri sadece sıfır ve bir değerlerine sahip olan değişkenlerle tanımlanır. Değişkeninin değerinin sıfır olması durumu, ilgili karar değişkeninin pasif olduğu, bir olması ise karar değişkeninin aktif olduğu anlamına gelmektedir.

Literatürde, ikili optimizasyona dayalı birçok gerçek dünya problemi, çözüm aşamasında metasezgisel algoritmaların kullanılmasıyla ele alınmıştır. Bunlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir: (i) özellikle sosyal ağ analizi, veri analitiği ve graf teorisi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan Maksimum Bağlılık Problemi (Maximum Clique Problem) (Wu & Hao, 2015). Bu problemde bir graf içinde, birbirine doğrudan bağlı olan düğümlerden oluşan en büyük bağlantılık kümesinin bulunması amaçlanır. (ii) Bir diğer ikili problem Maksimum Kesici Set Problemi (Maximum Cut Problem)'dir (Duarte, Fernández, Sánchez, & Sanz, 2004). Bir graf içindeki düğümleri iki ayrı küme

halinde bölen bir kesimi bulmayı hedefler. Özellikle iletişim ağları, veri ağları ve sosyal ağlar gibi alanlarda kullanılır. (iii) Yatırım Karar Problemi (Investment Decision Problem), belli bir bütçeyle yapılacak yatırımlar arasında en karlı kombinasyonu bulmayı amaçlar. Her yatırımın kabul edilip edilmeyeceği ikili bir karar değişkeniyle ifade edilir. Finansal planlama ve portföy yönetimi gibi alanlarda sıkça karşılaşırlar. (iv) Yol Bulma veya Planlama Problemi (Routing veya Path Planning Problem) (Zhang, Yin, Luo, & Zou, 2023), belirli bir ağ üzerinde, kaynaklardan hedeflere en uygun yolları bulmayı amaçlar. Yolların var olup olmaması veya kullanılması ikili karar değişkenleriyle ifade edilebilir. Lojistik, ulaşım ve telekomünikasyon gibi alanlarda kullanılır. (v) Tesis Yerleştirme Problemi (Facility Location Problem) (Cinar, 2022), belirli sayıda tesisin belirlenen konumlara yerleştirilmesini hedefler. Her konumun seçilip seçilmeyeceği ikili karar değişkenleriyle ifade edilir. Dağıtım ağı planlaması, lojistik yönetimi ve tesis planlaması gibi alanlarda kullanılır. Bunların problemlerin dışında, araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmakta olan ve bir mukayese fonksiyon seti haline gelmiş olan ikili optimizasyon problemleri literatürde yer almaktadır. Bunların bazıları şu şekilde sıralanabilir: Araç Rotalama Problemi, Rüzgâr Türbini Yerleştirme Problemi, Kapasitesiz Tesis Yerleşim Problemi (KTYP), Gezgin Satıcı Problemi ve 0-1 Sırt Çantası Problemi gibi gerçek dünya problemlerini çözmek için metasezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır.

Literatürdeki optimizasyon algoritmalarının çoğu, genellikle sürekli optimizasyon problemlerini çözmek için tasarlanmıştır. Dolayısıyla, ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için bu algoritmaları doğrudan kullanmak mümkün değildir. Bu nedenle, sürekli optimizasyon algoritmalarının, ayrık optimizasyon problemlerine uygulanabilmesi için algoritmanın adımlarının uyarlanması gerekir. Optimizasyon algoritmaları temel olarak aday çözüm vektörünün üretilmesi, eşleşme ve seçim süreci, konum güncelleme ve yerel arama prosedürlerinden oluşur. Bu aşamaların her biri için algoritmanın yapısını bozmadan gerekli uyarlamaların yapılması önemlidir. Sürekli problemler için geliştirilen metasezgisel optimizasyon algoritmalarının ayrık problemlere uyarlanmasında kullanılan adaptasyon ve geliştirme süreci beş aşamada gruplandırılabilir (Sağ, 2023). Bu aşamalar aşağıda listelenmektedir.

- a) Uyarlanacak olan ve orijinali sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiş metasezgisel algoritmanın seçilmesi
- b) Aday çözümlerin oluşturulmasında izlenecek adaptasyon metotları. Bu alanda literatürde önerilen birçok yöntem bulunmaktadır. Örnek olarak, Transfer

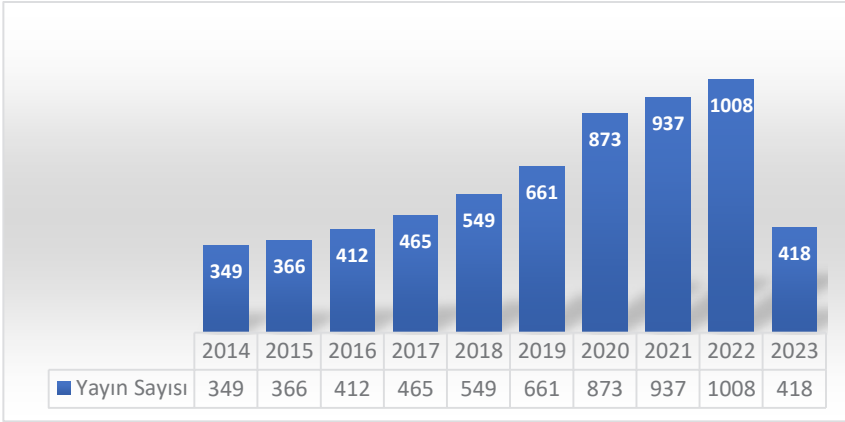
Fonksiyonları, Açık Modülasyonu ve Mod Tabanlı Lojistik Fonksiyonlar bu değişiklikler için kullanılan yaklaşımlardan bazılarıdır.

c) Konum güncelleme stratejilerinin belirlenmesi: bitsel mantıksal operatörler, komşuluk operatörleri, benzerlik ölçüm teknikleri, vb.

d) Yerel arama yöntemleri: açık-gözlü seçim yaklaşımları, graf ve ağaç tabanlı en kısa yol algoritmaları, 2-opt ve 3-opt gibi algoritmalar.

e) Uyarlanan algoritmanın performansının değerlendirilmesi. Bu amaçla daha önce bahsedilen çok sayıda mukayese test fonksiyonu kullanılmaktadır.

İkili optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen pek çok yeni algoritmanın ve varyasyonlarının sunulduğu çalışmalar literatürde yer almıştır. Web of Science (WoS) sorgulamasına göre son 10 yıl içinde sadece SCIE endeksli dergilerdeki yayınlar dikkate alındığında araştırmacıların bu konuya artarak devam eden yoğun bir ilgi gösterdikleri anlaşılmaktadır. Son 10 yılda 2023 yılının beşinci ayına kadar yapılan çalışma sayılarının yıllara dağılımı Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. WoS verilerine göre son 10 yılda ikili optimizasyon algoritmaları ile ilgili yayınlanan SCIE yayın sayıları

Benzer şekilde metasezgisel optimizasyon alanında sürekli optimizasyon problemleri için halen yeni algoritmalar geliştirilmeye ve literatüre girmeye devam etmektedir. Son beş yılda en çok ilgi uyandıran metasezgisellerden bazılarına kronolojik şekilde burada yer verilmiştir. Ayrıca bu algoritmaların listesi Tablo 1’de verilmiştir. Bunlar arasında Saten Çardak Kuşu Optimizasyon Algoritması (SÇKO) bulunmaktadır. Erkek çardak kuşları farklı materyallerle çardak inşa eder, seçilme şansını artırmak için materyal alırken dişiler en

çekici çardaklara yerleşir. SÇKO, bu doğal davranışlardan esinlenerek altı aşamayı gerçekleştirilmektedir (Samareh Moosavi & Khatibi Bardsiri, 2017). 2018 yılında Kallioras ve ark. tarafından geliştirilen Pity Böceği Algoritması (PBA), altı dişli çam kabukları böceğinin yuva ve yiyecek arama davranışından ilham alır. Ağaçlara yerleşerek popülasyonu artıran bu böceklerin birbirleriyle etkileşimi modellenmiştir (Kallioras, & Lagaros, 2018). Harris şahinlerinin doğadaki av stratejilerinden ilham alarak geliştirilen Harris Şahinleri Optimizasyon Algoritması (HŞOA) 2019 yılında Heidari ve ark. tarafından önerildi (Heidar & Mirjalili, 2019). 2019 yılında ortaya çıkan bir diğer algoritma Arora ve ark. tarafından geliştirilen Kelebek Optimizasyonu (KO) algoritması, kelebeklerin koku duyularından hareketle geliştirilmiştir. Kelebekler, besin ve eş aramak için kokularını kullanarak birbirlerini çekme eğilimindedirler. Bu amaçla, daha yoğun kokulara doğru hareket etmeyi tercih ederler. Yoğun koku bulunmadığında ise rastgele bir yöne hareket ederler (Arora & Singh, 2019). 2020 yılında Karadul böceğinden ilham alarak Siyah Karadul Optimizasyon Algoritması (SKOA) Hayyolalam ve ark. tarafından geliştirildi. Dişi Karadul böceği, eşleşme esnasında ya da sonrasında erkeği besler ve yumurtalarını korur. Yavrulardan bazıları kardeşlerini yer. Bu durum, güçlü bireylerin hayatta kalmasını sağlar (Hayyolalam & Pourhaji Kazem, 2020). Aquila Optimizasyonu (AO) 2021 yılında önerilmiştir. AO, Aquila'nın avlama stratejisinden esinlenmiştir (Abualigah, & Yousri, 2021). Hashim ve ark. tarafından 2022 yılında yine doğadan esinlenen yeni bir metasezgisel algoritma olan Yılan Optimizasyon Algoritması önerilmiştir. Her yılan (erkek/dişi), yeterli yiyecek ve düşük sıcaklık durumunda en iyi eşe sahip olmak için rekabet eder. Bu algoritma, yiyecek bulma ve üreme davranışlarını matematiksel olarak taklit eder (Hashim & Hussien, 2022).

Tablo 1. Son yıllarda geliştirilen sürekli optimizasyon algoritmaları.

Ref.	Algoritma
(Samareh & Bardsiri, 2017)	Saten Çardak Kuşu Optimizasyon Algoritması
(Kallioras, & Lagaros, 2018)	Pity Böceği Algoritması
(Heidar & Mirjalili, 2019)	Harris Şahinleri Optimizasyon Algoritması
(Arora & Singh, 2019)	Kelebek Optimizasyonu
(Hayyolalam & Pourhaji, 2020)	Siyah Karadul Optimizasyon Algoritması
(Abualigah, & Yousri, 2021)	Aquila Optimizasyonu
(Hashim & Hussien, 2022)	Yılan Optimizasyon Algoritması

2023 yılında önerilen algoritmalar arasında Koati Optimizasyon Algoritması (KOA) başarısı ve farklı çalışma prensibiyle oldukça dikkat çekmektedir (Dehghani, Montazeri, Trojovska, & Trojovsky, 2023). Bu çalışma kapsamında, orijinal versiyonu sürekli optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik olarak geliştirilmiş olan KOA algoritmasının ikili optimizasyon problemlerinin çözümü için uyarlanmış versiyonu sunulmaktadır. Sunulan çalışmanın motivasyonu ve literatüre olan katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Çok yakın zamanda geliştirilmiş olan ve sürekli optimizasyon problemlerindeki başarılı performansı ile dikkat çeken KOA algoritmasının ilk kez ikili optimizasyon problemleri için uyarlanmaktadır.

- KOA algoritması 4 farklı transfer fonksiyonunun aday çözüm sürecine adapte edilmesiyle ikili optimizasyon için uygulanabilir hale getirilmiştir. Diğer bir ifadeyle 4 farklı ikili Koati Optimizasyon algoritmasının sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

- Önerilen ikili KOA algoritmalarının performansı Kapasitesiz Tesis Yerleştirme Problemlerine aynı koşullar altında uygulanmıştır.

- Adil bir karşılaştırma ve nitel bir analiz sunabilmek amacıyla önerilen algoritmalar tekrar tekrar çalıştırılmış ve elde edilen çıktıların istatistiksel sonuçları (en iyi, en kötü, ortalama, standart sapma ve GAP) sunulmuştur.

Bu bölümün geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de, KOA algoritmasının orijinal versiyonunun çalışma yapısı ve matematiksel modeli ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Önerilen ikili optimizasyon algoritmalarının performans değerlendirmesinde kullanılan KTYP problemleri hakkında Bölüm 3’te bilgi verilmektedir. Bölüm 4’te, geliştirilen ikili KOA algoritmaları açıklanmaktadır. Bölüm 5’te, elde edilen deneysel çalıştırma sonuçları sunulmakta ve performans analizi yapılmaktadır. Son olarak 6.bölümde, sonuç açıklamaları ve gelecekteki olası çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. Koati Optimizasyon Algoritması (KOA)

Koati, Orta ve Güney Amerika’nın yanı sıra Amerika Birleşik Devletleri’nin güneybatısında bulunan ilginç bir canlıdır. Eşsiz özellikleri ve davranışıyla Koati, araştırmacıların dikkatini çekmektedir. İri bir ev kedisi ağırlığındadır. Köpek, maymun ve rakun melezini andırmaktadır. Koati, uzun ve esnek burnunu, kalkık kuyruğunu ve güçlü ön pençelerini yiyecek aramada kullanmaktadır. Koati

burnuyla orman zeminini karıştırır ve yiyecek bulur. Koati etçil ve otçul olarak beslenebilmektedir. Koati, iguana avlamayı ve yemeyi oldukça seven bir canlı olarak bilinmektedir.

Koati, genellikle sürüler halinde yaşar. İlginç bir şekilde, Koati sürüleri av yakalarken iki farklı gruba ayrılır. Sürünün bir yarısı ağaçta ava saldırır, diğer yarısı da avın ağaçtan atlamasını bekler ve ava yerde saldırır. Bilim insanları, Koati'nin avcılık stratejilerinden ve kaçma stratejisinden ilham alarak 2023 yılında yeni bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan Koati Optimizasyon Algoritmasını (KOA) önermiştir (Dehghani, Montazeri, Trojovska, & Trojovsky, 2023). KOA, hayatta kalma amacıyla optimal çözüm arayışında olan Koati sürülerinin avlama ve av olmamak için kaçma stratejilerini modellemektedir. Avlanma sürecindeki Koati'ye avcı, av olmamak için kaçan Koati'ye ise kâşif denir. Avcı Koati, arama alanını kullanmaya odaklanırken, kâşif Koati yeni alanları keşfeder. Avcı ve kâşif Koati davranışları, algoritmanın en uygun çözümleri bulma başarısı için oldukça önemlidir. Denklem-(1) ile Koati'lerin ormanda yiyecek arama davranışı modellenir ve arama alanındaki her bir Koati'nin konumunu rastgele belirlenmiş olur.

$$X_i: x_{i,j} = lb_j + r \cdot (ub_j - lb_j), \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

Burada $x_{i,j}$, i 'inci aday çözümün j 'inci karar değişkeninin değerini gösterir. j 'inci karar değişkeninin alt sınırı lb_j , üst sınırı ub_j ve rastgele bir gerçek sayı için r değişkeni kullanılır. N , popülasyon boyutu ve m ise karar değişkenlerinin sayısıdır. COA algoritmasında Denklem-(2) ile gösterilen X matrisi aday çözümler vektörünü yani popülasyonu temsil eder.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,j} & \dots & x_{1,m} \\ \vdots & \backslash & \vdots & / & \vdots \\ x_{i,1} & \dots & x_{i,j} & \dots & x_{i,m} \\ \vdots & / & \vdots & \backslash & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,j} & \dots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m} \Rightarrow F = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (2)$$

Burada X_i , arama uzayında i 'inci Koati'nin konumunu temsil eder. X 'in her satırı, tek bir Koati için karar değişkeni değerlerini temsil ederken, her sütun, tüm popülasyondaki belirli bir karar değişkenini temsil eder. F matrisi ise her bir aday çözümün uygunluk değerleri ile oluşturulan bir sütun vektörüdür. Aday çözümlerin COA'daki konumunu güncelleme süreci, koati canlısının iki doğal davranışını modellemeye dayanır. Buna göre, KOA popülasyonu iki farklı strateji ile güncellenir.

2.1. Keşif Stratejisi: İguana Saldırısı ve Avlanma Stratejisi

Bu aşamada Koati'nin doğal ortamındaki avlanma stratejileri taklit edilerek arama uzayı yeni aday çözümlerle geniş bir şekilde taranır. İlk gruptaki Koati'ler avcı Koati olarak belirlenir ve yüksek uygunluk değerlerine sahip olan Koati'lerin avlamalarına izin verilir. COA, arama uzayında gezinir ve potansiyel yeni çözümleri ortaya çıkarır. Denklem-(3), keşif aşamasında iguana saldırı ve avlanma stratejisini uygulamak için kullanılır.

$$X_i^{P1}: X_{i,j}^{P1} = x_{i,j} + r.(Iguana_j - I.x_{i,j}), \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \text{ ve } j = 1, 2, \dots, m$$

Burada r , sıfır ile bir arasında rastgele bir reel sayıdır, X_i^{P1} , i 'inci Koati için j 'inci karar değişkeninin güncellenmiş konumunu temsil etmektedir. Yeni konum, en iyi çözüm olan $Iguana_j$ ile Koati'nin mevcut konumu arasındaki farkın rasgele bir gerçek sayı olan r ile ölçeklendirilmesi ve mevcut konumuna ($x_{i,j}$) eklenmesiyle belirlenir. Denklem-(3) ile tanımlanan bu işlem ilk aday çözüme uygulanır. Sonuç olarak bu stratejiyle Koati, daha iyi çözümler bulmak için arama uzayını keşfeder.

Denklem-(4), popülasyonun en iyi üyesini temsil eden iguananın arama uzayındaki tahmini konumunu belirlemektedir.

$$Iguana^G: Iguana_j^G = lb_j + r.(ub_j - lb_j), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

Burada $Iguana^G$ 'nin en iyi çözüm olduğu varsayılır. Koati'lerin yeni konumu popülasyonun iguananın konumuna göre Denklem-(5) kullanılarak yeniden güncellenir.

$$X_i^{P1}: X_{i,j}^{P1} = \begin{cases} x_{i,j} + r.(Iguana_j^G - I.x_{i,j}) & F_{Iguana} < F_i \\ x_{i,j} + r.(I.x_{i,j} - Iguana_j^G) & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (5)$$

$$i = \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 2, \dots, N \text{ ve } j = 1, 2, \dots, m$$

Her bir Koati için hesaplanan yeni konum, amaç fonksiyonunun değerini iyileştiriyorsa güncelleme süreci için kabul edilir. Aksi takdirde, Koati önceki konumunda kalır. Bu güncelleme koşulu, $i = 1, 2, \dots, N$ için Denklem-(6) kullanılarak simüle edilir.

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P1}, & F_i^{P1} < F_i \\ X_i, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (6)$$

Burada, X_i^{P1} popülasyonun i 'inci üyesinin güncellenmiş konumunu, $X_{i,j}^{P1}$ konumun j 'inci boyutunun güncellenmiş değerini, r değişkeni ise sıfır ile bir

arasında rastgele üretilen bir gerçek sayıyı ve $Iguana_j^G$ ise küresel en iyi olarak da bilinen popülasyonun en uygun üyesinin konumunu temsil etmektedir.

2.2. Sömürü Stratejisi: Avcılardan Kaçma Süreci

Koati'lerin av olamamak için kaçmaları ve mevcut konumlarının yakınında güvenli bir alanda konumlanmaları stratejisi bu aşamada modellenmektedir. Koati, böylece değişen ortamlara uyum sağlamış olur. Bu yaklaşım, kâşif Koati'lerin yerel arama alanını keşfetmesine ve konumlarını avcılarının yakınlığına göre ayarlayarak en uygun çözümleri bulmalarına olanak tanır. Stratejinin amacı KOA algoritmasının olabildiğince yerel ekstremum noktalara takılması önlenmektedir. Böylece uzun vadede daha iyi çözümler bulunabilir. Bu işlem aday çözümün mevcut konumu etrafında rastgele bir konum oluşturulmasını sağlayan Denklem-(7) ve Denklem-(8) kullanılarak hesaplanır.

$$lb_j^{local} = \frac{lb_j}{t}, \quad ub_j^{local} = \frac{ub_j}{t}, \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (7)$$

$$X_i^{P2}: X_{i,j}^{P2} = x_{i,j} + (1-2r) \cdot \left(lb_j^{local} + r \cdot (ub_j^{local} - lb_j^{local}) \right), \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, m,$$

Keşif aşamasındaki aç gözlü seçim stratejisinde olduğu gibi bu aşamada da yeni hesaplanan konum, amaç fonksiyonunun değerini iyileştiriyorsa kabul edilebilirdir. Bu koşul Denklem-(9) kullanılarak belirlenmektedir.

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P2} & F_i^{P2} < F_i \\ X_i & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (9)$$

Burada X_i^{P2} , COA'nın ikinci aşamasına dayanarak, Koati için hesaplanan yeni konumdur, $X_{i,j}^{P2}$ bu yeni çözümün i 'inci boyutu ve F_i^{P2} ise amaç fonksiyon değeridir. r , $[0,1]$ aralığındaki rastgele bir sayıdır, t , iterasyon sayacıdır, lb_j^{local} ve ub_j^{local} sırasıyla j 'inci karar değişkeninin yerel alt sınırı ve yerel üst sınırıdır. Burada iterasyon sayısına bağlı olarak yerel arama yapılması sağlanmıştır. İterasyonlar ilerledikçe yerel arama alanını daraltılmaktadır.

3. Kapasitesiz Tesis Yerleştirme Problemi

Kuehn ve Hamburger tarafından önerilen Kapasitesiz Tesis Yerleştirme Problemi (KTYP) bir NP-Hard optimizasyon problemidir. KTYP, ikili optimizasyon algoritmalarının performansını analiz etmek için literatürde sıkça

kullanılan karşılaştırma problemlerinden biridir (Kuehn & Hamburger, 1976). Genellikle basit fabrika veya tesis yerleştirme problemi olarak bilinir. KTYP problemlerinde, tesislerde herhangi bir kapasite sınırlamasının yoktur ve her müşterinin yalnızca bir tesisten hizmet alınması hedeflenir. Her tesisin açık ya da kapalı olma seçeneği vardır. Bu problemde amaç, bir dizi tesis açmanın ve açılan tesislerin müşterilere sunmanın minimum toplam maliyetini hesaplamaktır. KTYP matematiksel olarak iki farklı aşamadan oluşur. Bu sebeple Denklem-(10)'daki toplam formülünün ilk kısmı müşterilere verilen hizmet maliyeti, ikinci kısmı ise tesislerin açılış maliyetini ifade eder.

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(X, W) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} w_{ij} + \sum_{j=1}^n g_j X_j \\ \left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_{ij} &= 1 \\ w_{ij} &\leq X_j \\ w_{ij}, X_j &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, m \\ j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \end{aligned} \quad (10)$$

Burada m müşteri sayısı ve n tesis sayısıdır, d_{ij} müşterinin j 'inci tesisten aldığı hizmetin maliyetini gösterir, w_{ij} ise müşteriye bağlı bir kontrol parametresidir. g_j , j 'inci tesisle ilişkili açılış maliyetidir. Sonuç olarak X_j parametresinde, j 'inci tesis açıksa $X_j=1$, aksi takdirde $X_j=0$ değerini alan tesise bağlı bir kontrol parametresidir. KTYP'de müşteri tesisten hizmet alıyorsa $X_j=1$, aksi halde $X_j=0$ değerini elde etmektedir.

4. İkili Koati Optimizasyon Algoritması

Sürekli optimizasyon algoritmalarının etkin bir şekilde ikili formata dönüştürülmesi için çeşitli transfer fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu dönüşüm süreci, her boyut için transfer fonksiyonlarının kullanılmasıyla sürekli çözümlerin ikili değerlere dönüştürülmesini içermektedir. Bu yöntemle sürekli değerler sıfır ve bir olarak temsil edilen ikili değerlere dönüştürülmektedir. Ancak, sürekli algoritmaların konum güncelleme stratejisi ikili optimizasyon problemlerinde etkisiz olabilmektedir. Transfer fonksiyonları, bir vektörün değerlerini sıfır ve bir aralığına dönüştürmek için kullanılmaktadır. Zaman içinde farklı transfer fonksiyonları ikili optimizasyon için önerilmiş ve kullanılmıştır (Beheshti & Shamsuddin, 2015; Lee, Soak, Oh, Pedrycz, & Jeon, 2008; Nezamabadi-pour, Rostami-Shahrbabaki, & Farsangi, 2008).

Bu çalışmada KOA ikili olarak önerilmiş ve farklı versiyonları sunulmuştur. İKOA (İkili Kaotik Optimizasyon Algoritmaları) için dört farklı S-Şekli transfer fonksiyonu kullanılmış ve bu versiyonlara İKOA-v1, İKOA-v2, İKOA-v3 ve İKOA-v4 adı verilmiştir. Tablo 2’de, İKOA’da kullanılan S-Şekli transfer fonksiyonlarının formülleri verilmiştir.

Tablo 2. Transfer fonksiyonları.

Fonksiyon İsmi	Formül
S1	$S1(x) = \frac{1}{1 + e^{-2x}}$
S2	$S2(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$
S3	$S3(x) = \frac{1}{1 + e^{(\frac{-x}{2})}}$
S4	$S4(x) = \frac{1}{1 + e^{(\frac{-x}{3})}}$

Gerçek sayılara Tablo 2’deki S tipi transfer fonksiyonları uygulandığında, sıfır ile bir arasında değişen gerçek sayılara ölçeklenmektedir. $[0,1]$ aralığına dönüştürülen bu gerçek değerler Denklem-(11) aracılığıyla sıfıra ya da bire eşitlenmiş olur (Karakoyun & Ozkis, 2021).

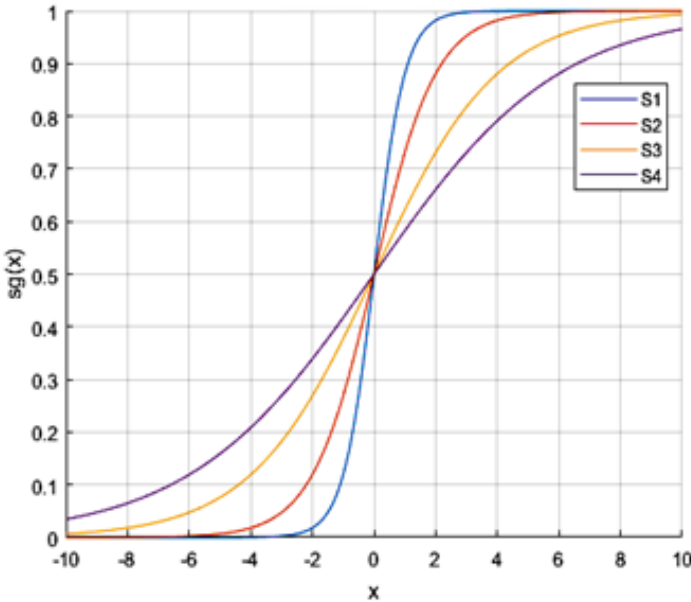
$$I_d = \begin{cases} 1 & \text{if } rand < T(x_d) \\ 0 & \text{if } rand \geq T(x_d) \end{cases} \quad (11)$$

Bu denklemde T transfer fonksiyonunu temsil etmektedir ve gerçek sayılardan oluşan bir x sayı dizisinin elemanlarını parametre olarak alır. x_d ise x dizisinin d boyutundaki gerçek sayı elemanını temsil etmektedir. Sıfıra ve bire dönüştürülen sayılar ikili I dizisine kaydedilir. Sıfır ve bir aralığında rastgele üretilen bir gerçek sayı $rand$ ile temsil edilir.

Şekil 2’de İKOA’nın sözde kodu sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 3’te İKOA’da kullanılan S-Şekli transfer fonksiyonlarının grafikleri gösterilmektedir (Mirjalili & Lewis, 2013).

GİRDİ	İKOA'nın kontrol parametre değerlerini (<i>maxiter</i> , <i>N</i> , <i>d</i> , <i>ub</i> , <i>lb</i> , vb.) ayarla
	Denklem-(1)'i kullanarak popülasyonu oluştur
	Her bir aday çözümü Transfer fonksiyonu ile $\{0,1\}$ kümesine ata
	Popülasyonun uygunluk değerlerini hesapla
	Sonlandırma koşulu sağlanana kadar aşağıdaki adımları tekrarla
	<i>Keşif Stratejisini başlat:</i>
	Popülasyonun ilk $N/2$ elemanı için Denklem-(3) ile yeni çözüm üret
	Popülasyonun sondan $N/2$ elemanı için Denklem-(4) ve Denklem-(5) ile yeni çözüm üret
	Yeni üretilen tüm çözümler, amaç fonksiyonunun değerini iyileştiriyorsa, Denklem-(6) ile güncelleme sürecini başlat
	<i>Sömürü Stratejisini başlat:</i>
	Denklem-(7) ve Denklem-(8) ile yeni N adet çözüm üret
	Yeni üretilen tüm çözümler için Denklem-(9) ile arama uzayında keşif yap
	Şu ana kadar bulunan en iyi çözümü sakla
	Sonlandırma koşulunu kontrol et
ÇIKTI	Algoritma tarafından bulunan amaç fonksiyon değeri en iyi çözüm

Şekil 2. İKOA'nın sözde kodu.



Şekil 3. S-Şekilli fonksiyonu.

5. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, test problemlerinin dördü (Cap71, Cap72, Cap73 ve Cap74) küçük, dördü (Cap101, Cap102, Cap103 ve Cap104) orta, dördü (Cap131, Cap132i Cap133 ve Cap134) büyük ve geri kalanı üçü (CapA, CapB ve CapC) çok büyük boyutta olan toplamda 15 adet KTYP fonksiyonu kullanıldı. Önerilen ikili KOA algoritmalarının performansını analiz etmek amacıyla geliştirilen algoritmalar bu 15 adet KTYP problemlerine aynı koşullar altında uygulandı. Kullanılan KTYP problem setindeki test fonksiyonlarının adı, problem tipi, boyutu ve optimum değeri Tablo-3'te verilmiştir. Bunun yanı sıra, KOA algoritmasının 4 farklı ikili versiyonu S-Şekli, transfer fonksiyonlarının algoritmaya ayrı ayrı entegre edilmesiyle geliştirildi ve İKOA-v1, İKOA-v2, İKOA-v3 ve İKOA-v4 olarak isimlendirildi.

İkili optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılan metasezgisel algoritmaların performansını değerlendirmek için “Gap Değeri” veya “Fitness Gap” şeklinde isimlendirilen bir ölçüt sıklıkla çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu ölçüt, algoritmanın elde ettiği çözümün gerçek en iyi çözüme olan yakınlığını değerlendirmek için kullanılır. GAP ölçütünün matematiksel fonksiyonu Denklem-(12)'de verilmiştir.

$$Gap(\%) = \frac{ortalama - optimum}{optimum} \times 100 \quad (12)$$

Stokastik çalışma karakteristiğindeki çözüm tekniklerinin istatistiksel bir anlamlılık içinde tutarlı çözüm ürettiklerini ispatlayabilmek amacıyla bu yöntemler tekrar tekrar çalıştırılarak test problemlerine uygulanmalı ve bağımsız çalışmalardan elde edilen sonuçların bazı istatistiksel değerlerine bakılmalıdır. Bu bağlamda, önerilen algoritmalar İKOA-v1, İKOA-v2, İKOA-v3 ve İKOA-v4 aynı kontrol parametre değerleri kullanılarak 20 bağımsız çalıştırma ile 15 test problemlerine uygulanmıştır. Maksimum iterasyon sayısı 1000 ve popülasyon boyutu 40 olarak ayarlanmıştır. Performans değerlendirmesi için en iyi, ortalama değer (Ort.), standart sapma (Std.) ve en kötü değerleri hesaplanarak deneysel sonuçların listelendiği Tablo 4, Tablo-5, Tablo-6 ve Tablo-7 verilmiştir. Tablo 8'de önerilen algoritmanın CPU çalışma süresi ve GAP istatistiksel sonuçları sunulmuştur.

Tablo 3. KTYP test problemlerine ait bilgiler.

Problem	Tipi	Boyutu	Optimum Değeri
Cap71	Küçük	16 x 50	9.3262E+05
Cap72	Küçük	16 x 50	9.7780E+05
Cap73	Küçük	16 x 50	1.0106E+06
Cap74	Küçük	16 x 50	1.0350E+06
Cap101	Orta	25 x 50	7.9665E+05
Cap102	Orta	25 x 50	8.5470E+05
Cap103	Orta	25 x 50	8.9378E+05
Cap104	Orta	25 x 50	9.2894E+05
Cap131	Büyük	50 x 50	7.9344E+05
Cap132	Büyük	50 x 50	8.5150E+05
Cap133	Büyük	50 x 50	8.9308E+05
Cap134	Büyük	50 x 50	9.2894E+05
CapA	Çok Büyük	100 x 1000	1.7156E+07
CapB	Çok Büyük	100 x 1000	1.2979E+07
CapC	Çok Büyük	100 x 1000	1.1506E+07

Tablo 4. Önerilen ikili KOA algoritmalarının küçük boyutlu KTYP'deki istatistiksel sonuçları.

Problem		İKOA-v1	İKOA-v2	İKOA-v3	İKOA-v4
Cap71	En İyi	9.3262E+05	9.3262E+05	9.3262E+05	9.3262E+05
	Ort.	9.3262E+05	9.3266E+05	9.3262E+05	9.3262E+05
	Std.	0	2.1313E+02	0	0
Cap72	En Küçük	9.3262E+05	9.3357E+05	9.3262E+05	9.3262E+05
	En İyi	9.7780E+05	9.7780E+05	9.7780E+05	9.7780E+05
	Ort.	9.7785E+05	9.7804E+05	9.7780E+05	9.7780E+05
Cap73	Std.	2.4080E+02	6.2285E+02	0	0
	En Küçük	9.7788E+05	9.8018E+05	9.7780E+05	9.7780E+05
	En İyi	1.0106E+06	1.0106E+06	1.0106E+06	1.0106E+06
Cap74	Ort.	1.0115E+06	1.0111E+06	1.0110E+06	1.0106E+06
	Std.	1.1419E+03	6.9665E+02	4.0767E+02	3.5832E-10
	En Küçük	1.0137E+06	1.0135E+06	1.0125E+06	1.0106E+06
Cap74	En İyi	1.0350E+06	1.0350E+06	1.0350E+06	1.0350E+06
	Ort.	1.0403E+06	1.0387E+06	1.0424E+06	1.0350E+06
	Std.	2.9719E+03	3.1682E+03	3.6480E+03	0
	En Küçük	1.0445E+06	1.0445E+06	1.0475E+06	1.0350E+06

Tablo 5. Önerilen ikili KOA algoritmalarının orta boyutlu KTYP'deki istatistiksel sonuçları.

Problem		İKOA-v1	İKOA-v2	İKOA-v3	İKOA-v4
Cap101	En İyi	7.9758E+05	7.9833E+05	7.9665E+05	7.9665E+05
	Ort.	8.0032E+05	8.0174E+05	7.9873E+05	7.9673E+05
	Std.	1.3752E+03	1.7614E+03	1.3727E+03	2.6479E+02
Cap102	En Küçük	8.0373E+05	8.0383E+05	8.0135E+05	7.9751E+05
	En İyi	8.5470E+05	8.5759E+05	8.5759E+05	8.5470E+05
	Ort.	8.6228E+05	8.6282E+05	8.6247E+05	8.5474E+05
Cap103	Std.	2.9598E+03	2.4322E+03	3.1937E+03	1.7053E+02
	En Küçük	8.6653E+05	8.6753E+05	8.6899E+05	8.5547E+05
	En İyi	9.0259E+05	9.0063E+05	9.0431E+05	8.9378E+05
Cap104	Ort.	9.0998E+05	9.0590E+05	9.1228E+05	8.9384E+05
	Std.	3.0482E+03	3.5904E+03	4.3342E+03	1.0041E+02
	En Küçük	9.1508E+05	9.1386E+05	9.1849E+05	8.9401E+05
Cap104	En İyi	9.5228E+05	9.3947E+05	9.4913E+05	9.2894E+05
	Ort.	9.6380E+05	9.5420E+05	9.6884E+05	9.2894E+05
	Std.	5.6935E+03	7.0879E+03	1.0345E+04	1.1944E-10
	En Küçük	9.7662E+05	9.6627E+05	9.8737E+05	9.2894E+05

Tablo 6. Önerilen ikili KOA algoritmalarının büyük boyutlu KTYP'deki istatistiksel sonuçları.

Problem		İKOA-v1	İKOA-v2	İKOA-v3	İKOA-v4
Cap131	En İyi	8.3229E+05	8.2912E+05	8.2757E+05	7.9344E+05
	Ort.	8.4271E+05	8.3679E+05	8.4590E+05	7.9605E+05
	Std.	3.7307E+03	5.0580E+03	7.4485E+03	1.8396E+03
Cap132	En Küçük	8.4931E+05	8.4536E+05	8.5622E+05	7.9946E+05
	En İyi	9.1571E+05	9.1257E+05	9.2632E+05	8.5215E+05
	Ort.	9.3668E+05	9.2346E+05	9.4383E+05	8.5482E+05
Cap133	Std.	7.9797E+03	6.8070E+03	7.8942E+05	2.2252E+03
	En Küçük	9.4805E+05	9.3435E+05	9.5765E+05	8.6037E+05
	En İyi	9.9049E+05	9.6389E+05	1.0061E+06	8.9325E+05
Cap134	Ort.	1.0157E+06	1.0012E+06	1.0280E+06	8.9463E+05
	Std.	1.1257E+04	1.2203E+04	1.2170E+04	1.0867E+03
	En Küçük	1.0339E+06	1.0134E+06	1.0477E+06	8.9771E+05
Cap134	En İyi	1.0699E+06	1.0706E+06	1.1070E+06	9.2894E+05
	Ort.	1.1278E+06	1.1080E+06	1.1506E+06	9.2933E+05
	Std.	2.8183E+04	1.4662E+04	1.9933E+04	1.2562E+03
	En Küçük	1.1646E+06	1.1295E+06	1.1833E+06	9.3459E+05

Tablo 7. Önerilen ikili KOA algoritmalarının çok büyük boyutlu KTYP'deki istatistiksel sonuçları.

Problem		İKOA-v1	İKOA-v2	İKOA-v3	İKOA-v4
CapA	En İyi	6.1323E+07	5.8143E+07	6.2198E+07	1.7156E+07
	Ort.	6.5924E+07	6.4204E+07	6.8615E+07	1.8247E+07
	Std.	2.5689E+06	2.3795E+06	3.2496E+06	4.6719E+05
CapB	En İyi	2.8478E+07	2.7979E+07	2.8090E+07	1.3207E+07
	Ort.	3.0395E+07	2.9452E+07	3.1229E+07	1.3589E+07
	Std.	1.0458E+06	8.30796E+05	1.2700E+06	1.8934E+05
CapC	En İyi	2.2122E+07	2.0699E+07	2.2032E+07	1.1771E+07
	Ort.	2.3544E+07	2.2463E+07	2.3587E+07	1.2052E+07
	Std.	6.4318E+05	8.0281E+05	6.6414E+05	1.4038E+05
	En Küçük	2.4467E+07	2.3519E+07	2.4447E+07	1.2270E+07

Farklı boyutlardaki problemlerin performansını değerlendirdiğimizde, İkili Koati Optimizasyon algoritması için geliştirilen ve transfer fonksiyonlarına göre 4 versiyon olarak sunulan algoritmaların etkileyici bir başarı sergilediği ve önemli sonuçlar sunduğu açıkça görülmektedir. Bu durumun daha net bir şekilde görülebilmesi için, deneysel çalışmaların istatistiksel değerlerinin verildiği sonuç tablolarında global optimuma ulaşabilmiş olan algoritmaların değerleri tabloda kalın yazı sitili ile vurgulanmıştır. Küçük boyutlu problemlerde İKOA'nın versiyonları İKOA-v1, İKOA-v2, İKOA-v3 ve İKOA-v4 ile global optimum sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, İKOA'nın güvenilir bir algoritma olduğunu ve küçük boyutlu problemlerde düşük iterasyonlarda bile başarılı sonuçlara ulaşabildiğini ortaya koymaktadır. Cap71, Cap72, Cap73 ve Cap74 problemlerinin tamamında uyarlanan ikili algoritmanın tüm versiyonları çoklu çalıştırmalarda en iyi değerde global optimumu bulmayı başarmıştır.

Orta boyutlu problemlere odaklandığımızda, İKOA-v1 ve İKOA-v2'nin Cap102 problemi üzerinde, İKOA-v4'ün ise Cap101, Cap103 ve Cap104 problemleri üzerinde en iyi sonuçları sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar,

İKOA'nın orta boyutlu problemleri de etkili bir şekilde çözebildiğini ve doğru ayarlanmış transfer fonksiyonlarının optimum sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

Büyük boyutlu problemlere geldiğimizde ise İKOA-v4'ün Cap131, Cap134 ve hatta çok büyük boyutlu CapA problemlerinde optimum sonuçlara ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, İKOA'nın büyük boyutlu ve karmaşık problemleri başarıyla ele alabildiğini ve doğru transfer fonksiyonu seçimiyle birlikte en iyi sonuçları elde etme potansiyeline sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

Genel olarak farklı boyutlardaki problemlerin çözümünde algoritmaların performansı değerlendirildiğinde, İKOA'nın başarıyla çalıştığı ve etkili sonuçlar sunduğu açıkça görülmektedir. Problemin karmaşıklığı arttıkça, İKOA gibi optimizasyon algoritmalarının daha fazla fonksiyon değerlendirmesine ihtiyaç duyması, stokastik çalışma perspektifinden bakıldığında doğal bir durumdur. Bu durum, İKOA'nın adaptif ve iteratif bir şekilde problemi çözmek için gerekli olan adımları daha sık gerçekleştirmesini gerektirir. Özellikle karmaşık problemlerde, problem alanının daha ayrıntılı bir şekilde taranması ve optimize edilen fonksiyonun daha hassas bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. İKOA'nın skabilitesi ve performansı, büyük boyutlu ve karmaşık problemleri çözmek için uygun bir seçenek olduğunu sonuçlar ortaya koymaktadır.

Tablo 8 İKOA'nın tüm versiyonları ve farklı boyutlardaki problemler için GAP ve CPU sürelerini sunmaktadır. Tablo 8'deki sonuçlara göre, İKOA'nın CPU süreleri ve etkinlik açısından İKOA-v1, İKOA-v2, İKOA-v3 ve İKOA-v4'te başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Tablo 8. Önerilen ikili KOA algoritmalarının CPU çalışma süresi ve GAP istatistiksel sonuçları.

Problem		İKOA-v1	İKOA-v2	İKOA-v3	İKOA-v4
Cap71	GAP	0	0.0051	0	0
	CPU Süresi	6.7091	6.7651	6.9665	6.6529
Cap72	GAP	0.0055	0.0243	0	0
	CPU Süresi	6.8492	6.7443	6.8243	6.7856
Cap73	GAP	0.0843	0.0467	0.0363	-3.4557E-14
	CPU Süresi	6.7272	6.8260	6.9424	6.7427
Cap74	GAP	0.5139	0.3568	0.7174	0
	CPU Süresi	6.8576	6.7865	6.7621	6.7233
Cap101	GAP	0.4607	0.6388	0.2613	0.0108
	CPU Süresi	7.0605	7.0642	7.1917	6.8998
Cap102	GAP	0.8862	0.9500	0.9087	0.0045
	CPU Süresi	7.0530	6.9404	6.9979	6.9481
Cap103	GAP	1.8121	1.3561	2.0693	0.0063
	CPU Süresi	7.0253	7.0772	7.0965	6.8406
Cap104	GAP	3.7529	2.7194	4.2945	2.5064E-14
	CPU Süresi	7.1501	6.9461	7.1168	6.8510
Cap131	GAP	6.2092	5.4040	6.6114	0.3285
	CPU Süresi	8.1351	8.0485	8.1291	7.8100
Cap132	GAP	10.0046	8.4510	10.8434	0.3902
	CPU Süresi	7.9836	7.8625	8.1369	7.6056
Cap133	GAP	13.7292	12.1042	15.1070	0.1742
	CPU Süresi	7.9247	8.0220	7.5850	7.1208
Cap134	GAP	21.4018	19.2751	23.8584	0.0419
	CPU Süresi	7.9458	7.6895	7.5435	7.0324
CapA	GAP	2.8425E+02	2.7423E+02	2.9994E+02	6.3542
	CPU Süresi	1.6819E+02	1.7007E+02	1.7097E+02	1.5130E+02
CapB	GAP	1.3419E+02	1.26916E+02	1.4061E+02	4.6963
	CPU Süresi	1.75103E+02	1.7271E+02	1.7569E+02	1.5550E+02
CapC	GAP	1.0463E+02	9.5236E+01	1.0500E+02	4.7447
	CPU Süresi	1.7419E+02	1.7375E+02	1.7558E+02	1.5645E+02

Sonuç olarak, İKOA-v1 algoritmasının küçük boyutlu problemlerde etkili olduğu; daha kısa çalışma sürelerinde çözüme ulaşabildiği görülmektedir. İKOA-v2 ise orta boyutlu problemler için daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu tür problemlerde İKOA-v1'e göre daha iyi CPU süreleri ve etkinlik sunmuştur. Orta boyutlu problemlerin optimize edilmesinde yüksek başarı oranı elde etmiştir. İKOA-v3, büyük boyutlu problemlerde en etkin sonuçlara ulaşabilmektedir. Problem boyutu ile bağlantılı olarak daha uzun çalışma süreleri gerektirebilir. Büyük boyutlu problemlerde daha etkili sonuçlar elde eder ve zorlu optimizasyon problemleri için güçlü bir çözüm aracı olarak kullanılabilir. İKOA-v4, çok büyük boyutlu problemler için daha başarılı sonuçlar elde edebilmektedir. Diğer versiyonlara göre daha uzun CPU sürelerinin yanı sıra ve daha efektif çözümler sunar. Karmaşık ve büyük boyutlu problemlerde yüksek doğruluk payı ve hızlı çözümler sağlamıştır.

İKOA algoritmasının farklı versiyonları, farklı boyutlardaki problemler için özelleştirilmiş çözümler sunarak geniş bir uygulama alanına sahip olabileceğini göstermiştir. Araştırmacılar problemin boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak uygun İKOA versiyonunu seçerek probleme özgü şekilde optimize edilmiş sonuçlar elde edebilirler. Bu sonuçlar, İKOA'nın genel performansını ve etkinliğini göstermekte ve optimizasyon alanında efektif bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

6. Sonuç

Sürüler halinde yaşayan Koati canlısının benzersiz davranışlarından esinlenerek geliştirilen Koati Optimizasyon Algoritması (KOA), sürekli optimizasyon problemlerinde önemli bir başarı elde etmiştir. Bu çalışmada KOA literatürde ilk kez ikili optimizasyon problemlerinin çözümü için uyarlanmıştır. Önerilen algoritmaya İkili Koati Optimizasyon Algoritması (İKOA) adı verilmiştir. İkili optimizasyona uyarlama sürecinde, aday çözüm üretme stratejisi olarak dört farklı S-şekilli transfer fonksiyonu kullanılmış ve çalışma kapsamında önerilen algoritmanın dört farklı versiyonu sunulmuştur.

Önerilen algoritmaların performansını değerlendirmek için karmaşık bir ikili optimizasyon problem seti olan Kapasitesiz Tesis Yerleştirme Problemleri kullanılmıştır. Önerilen algoritmalar aynı koşullar altında 20 kez çalıştırılarak istatistiksel sonuçları sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, önerilen İKOA'nın başarısını ve ikili optimizasyon problemlerine uygulanabilirliğini ispatlamaktadır.

Sonraki çalışmalarda, İKOA'nın daha geniş bir problem yelpazesinde ve farklı uygulama alanları üzerinde test edilmesi, daha fazla sayıda transfer fonksiyonu adapte edilerek geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca KOA algoritmasının benzerlik ölçüm fonksiyonları aracılığıyla ikili optimizasyon için uyarlaması yapılarak algoritmanın yeteneklerinin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi, daha başarılı versiyonlarının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, 20301027 numaralı BAP projesi ile gerçekleştirilen “Veri Yoğun ve Bilgisayarlı Görü Araştırma Laboratuvarı Altyapı Projesi” kapsamında sağlanan kurumsal destek için teşekkür etmektedir.

Kaynakça

Abualigah, L., Yousri, D., Abd Elaziz, M., Ewees, A. A., Al-qaness, M. A. A., & Gandomi, A. H. (2021). Aquila Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107250. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250>

Arora, S., & Singh, S. (2019). Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Computing*, 23(3), 715-734. doi:10.1007/s00500-018-3102-4

Baş, E. (2023). Binary Aquila Optimizer for 0–1 knapsack problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118: 105592, 2023.

Beheshti, Z., & Shamsuddin, S. M. (2015). Memetic binary particle swarm optimization for discrete optimization problems. *Information Sciences*, 299. doi:10.1016/j.ins.2014.12.016

Cinar, A. C. (2022). A Comprehensive Comparison of Binary Archimedes Optimization Algorithms on Uncapacitated Facility Location Problems. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1), 27-38.

Cinar, A. C. (2023). A comprehensive comparison of accuracy-based fitness functions of metaheuristics for feature selection. *Soft Computing*, 27(13), 8931-8958. doi:10.1007/s00500-023-08414-3

Deb, K. (2012). *Optimization for engineering design: Algorithms and examples*: PHI Learning Pvt. Ltd.

Dehghani, M., Montazeri, Z., Trojovska, E., & Trojovsky, P. (2023). Coati Optimization Algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving

optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 259, 110011. doi:10.1016/j.knosys.2022.110011

Duarte, A., Fernández, F., Sánchez, Á., & Sanz, A. (2004, 2004//). *A Hierarchical Social Metaheuristic for the Max-Cut Problem*. Paper presented at the Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Berlin, Heidelberg.

Hashim, F. A., & Hussien, A. G. (2022). Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 242, 108320. doi:https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108320

Hayyolalam, V., & Pourhaji Kazem, A. A. (2020). Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103249. doi:https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103249

Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, 97, 849-872. doi:https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028

Kallioras, N. A., Lagaros, N. D., & Avtzis, D. N. (2018). Pity beetle algorithm – A new metaheuristic inspired by the behavior of bark beetles. *Advances in Engineering Software*, 121, 147-166. doi:https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.04.007

Karakoyun, M., & Ozkis, A. (2021). Transfer Fonksiyonları Kullanarak İkili Güve-Alev Optimizasyonu Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Performanslarının Karşılaştırılması. 3, 1-10. doi:10.47112/neufmbd.2021.7

Kuehn, A. A., & Hamburger, M. J. (1976). A Heuristic Program for Locating Warehouses. In U. H. Funke (Ed.), *Mathematical Models in Marketing: A Collection of Abstracts* (pp. 406-407). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Lee, S., Soak, S., Oh, S., Pedrycz, W., & Jeon, M. (2008). Modified Binary Particle Swarm Optimization. *Progress in Natural Science - PROG NAT SCI*, 18, 1161-1166. doi:10.1016/j.pnsc.2008.03.018

Mirjalili, S., & Lewis, A. (2013). S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 9, 1-14. doi:10.1016/j.swevo.2012.09.002

Nezamabadi-pour, H., Rostami-Shahrbabaki, M., & Farsangi, M. (2008). Binary Particle Swarm Optimization: challenges and New Solutions. *The Journal*

of Computer Society of Iran (CSI) On Computer Science and Engineering (JCSE), 6, 21-32.

Sag, T. & Ihsan A. (2023). Particle Swarm Optimization with a new intensification strategy based on K-Means. *Pamukkale Univ Muh Bilim Dergisi*, 29(3): 264-273. doi: 10.5505/pajes.2022.37898

Sağ, T. (2023). Approaches Used In Adapting Metaheuristic Optimization Algorithms Developed For Continuous Problems to Discrete Problems. *Proceedings of The International Conference on Academic Research in Science, Technology and Engineering*, 1(1), 1-11. doi:10.33422/icarste.v1i1.12

Samareh Moosavi, S. H., & Khatibi Bardsiri, V. (2017). Satin bowerbird optimizer: A new optimization algorithm to optimize ANFIS for software development effort estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60, 1-15. doi:https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.006

Sun, C., Wang, H., & Jin, Y. (2021). *Data-Driven Evolutionary Optimization: Integrating Evolutionary Computation, Machine Learning and Data Science*: Springer.

Tzanetos, A., & Blondin, M. (2023). A qualitative systematic review of metaheuristics applied to tension/compression spring design problem: Current situation, recommendations, and research direction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118, 105521. doi:https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105521

Wu, Q., & Hao, J.-K. (2015). A review on algorithms for maximum clique problems. *European Journal of Operational Research*, 242(3), 693-709. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.064

Zhang, D., Yin, Y.-b., Luo, R., & Zou, S.-l. (2023). Hybrid IACO-A*-PSO optimization algorithm for solving multiobjective path planning problem of mobile robot in radioactive environment. *Progress in Nuclear Energy*, 159, 104651. doi:https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104651

BÖLÜM IV

UNLU MAMÜLLERİN ANTIOKSİDANLAR İLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİ

Fortification of Bakery Products with Antioxidants

**Dilek DÜLGER ALTINER¹ & Merve SABUNCU²
Yasemin ŞAHAN³**

¹(Doç. Dr.), Kocaeli Üniversitesi, Turizm Fakültesi,
Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Kartepe/Kocaeli, Türkiye,
e-mail: dilek.dulger@kocaeli.edu.tr ,
ORCID: 0000-0002-7043-2883

²(Doktora Öğrencisi), Bursa Uludağ Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye,
e-mail: merve-ates@outlook.com ,
ORCID: 0000-0001-8771-0643

³(Prof. Dr.), Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi,
Gıda Mühendisliği Bölümü, Görükle/Bursa, Türkiye,
e-mail: yasemins@uludag.edu.tr ,
ORCID: 0000-0003-3457-251X

1. Giriş

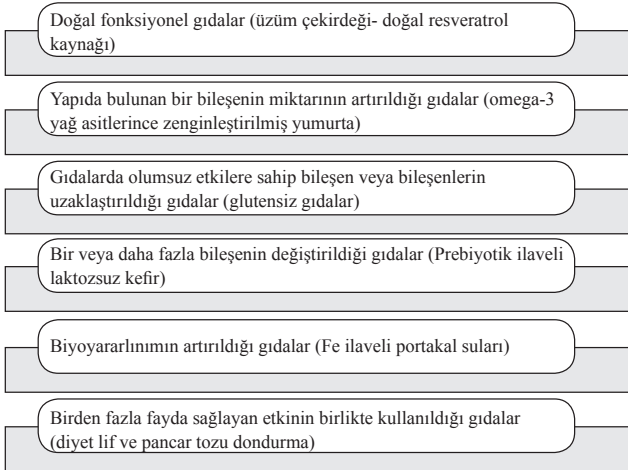
Günümüzde hızlı tüketimin artması ile birlikte gelişen bilinçsiz beslenme, hareketsiz yaşam, stres gibi faktörler bireyleri hastalıklara karşı daha savunmasız hale getirmiştir. Başta kanser, diyabet ve kalp-damar rahatsızlıkları olmak üzere birçok kronik hastalığın yaygınlaşması, bireylerin sağlıklı yaşama olan ilgilerinin artmasına sebep olmuştur (Onur ve Cömert, 2017). İnsanlar daha sağlıklı ve kaliteli yaşam için hastalıkların tedavi edilmesinden çok bu hastalıklardan korunmaya yönelik tedbirlerin alınması gerektiğinin farkına varmıştır. Bu tedbirlerden biri olarak “fonksiyonel gıdalar” bilinçli

bireyler tarafından tercih edilmeye başlanmıştır. Kişilerin yaşam standartlarını yükselmesi, sağlıklı beslenme konusunda bilinçlenmenin yaygınlaşması, sağlık maliyetlerinin artması, daha sağlıklı ve uzun bir yaşam sürme isteği gibi sebepler nedeniyle fonksiyonel gıdaları tüketmektedir (Bozdemir, Demirci ve Demirkılıç, 2017; Doğan ve Meral, 2009).

Bireylerin fonksiyonel gıdaları tercih etmelerinin başlıca nedenleri	Hastalıktan
	Sağlık harcamalarının artması
	Sağlık ve beslenme arasındaki bağlantının farkına varılması
	Sağlıklı ve uzun bir ömür isteği
	Fonksiyonel gıdaların etkilerinin kanıtlanması

Şekil 1. Fonksiyonel gıdaların başlıca tercih edilme nedenleri

Fonksiyonel gıda kavramı ilk olarak 1980'lerin yıllarda Japonya'da ortaya çıkmıştır. 1990'lı yılların başlarında Amerika'da yayılmaya başlayarak tüketicilerin ve bilim insanlarının dikkatini çekmiştir. 2000'li yıllarda ise Avrupa'dan ülkemize gelerek Türkiye'nin gıda pazarına giriş yapmıştır (Sevilmiş, 2013; Bayaz ve Mehenktaş, 2004). Fonksiyonel gıda; bireylerin temel besin ihtiyaçlarını sağlamanın yanında vücudun fizyolojik ve metabolik fonksiyonlarının daha iyi çalışmasını sağlayan gıdalar olarak tanımlanmaktadır. Günlük yaşantımızda da yer alan bu gıdaların vücudumuza olan olumlu etkilerinin bilinmesi ile daha bilinçli şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Fonksiyonel gıdalar Şekil 2'de verildiği gibi çeşitlendirilebilir (Türkmen ve Gürsoy, 2017; Kandıralı, 2014; Cingöz ve ark., 2013; Kaur ve Das, 2011; Henry, 2010).



Şekil 2. Fonksiyonel gıda örnekleri

Fonksiyonel gıda üretilirken gıdaların besin değerinin artırılması amacıyla kullanılan yöntemler başlıca 3 grup altında toplanmıştır. Bunlar; zenginleştirme, güçlendirme ve restorasyondur (Özer ve Güner, 2008). Zenginleştirme işlemi, fonksiyonel gıda üretim teknolojisinde en sık kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntem kullanılarak gıdalarda doğal olarak bulunan/bulunmayan bir besin maddesinin gıdaya dışarıdan eklenmesi olarak açıklanmaktadır. Zenginleştirme çalışmalarındaki asıl amaç; besleyici özellikler açısından gıdaların, biyoaktif bileşenler, antioksidanlar, vitamin, mineral, diyet lif vb. bileşenlerinin içeriğinin artırılması, gıda işleme sırasında oluşan kayıpların giderilmesi, ayrıca tekstürel ve duyuşal açıdan geliştirilmesidir (Sabuncu, Altınar ve Şahan, 2022). Bu amaçla literatürde birçok çalışmaya rastlanmaktadır. Çalışmalardaki ortak özellik günlük yaşantımızda sıklıkla tükettiğimiz gıdaların daha sağlıklı hale getirilmesi ve hastalık önleyici (antikansorejen, antidiyabetik, antiinflamatuvar vb.) etkilere sahip olmasını sağlamaktır.

Tahıl ve tahıl ürünleri insanlık tarihindeki en temel gıdaların başında gelmektedir. Tahıl terimi başlıca buğday, yulaf, mısır, darı ve arpa gibi tanelerin tamamına verilen ortak bir isimdir (Altan, 1986). Doyurucu ve ucuz olmasından dolayı tahıllar bireylerin günlük enerji ihtiyaçlarının yaklaşık %70 ini karşılamaktadırlar (Yavuz, 2019; Kalkan ve Özarık, 2017). Ayrıca tahıllar sağlıklı karbonhidrat kaynağı olmakla birlikte vitamin ve mineral açısından da oldukça zengindir. Diyet lif içeriği yüksek olan tahılların kalp damar hastalıkları, gastrointestinal rahatsızlıklar ve kansere karşı koruyucu etkilerinin olduğu bilinmektedir (Makki ve ark., 2018; Lattimer ve Haub 2010; Anderson ve ark., 2009).

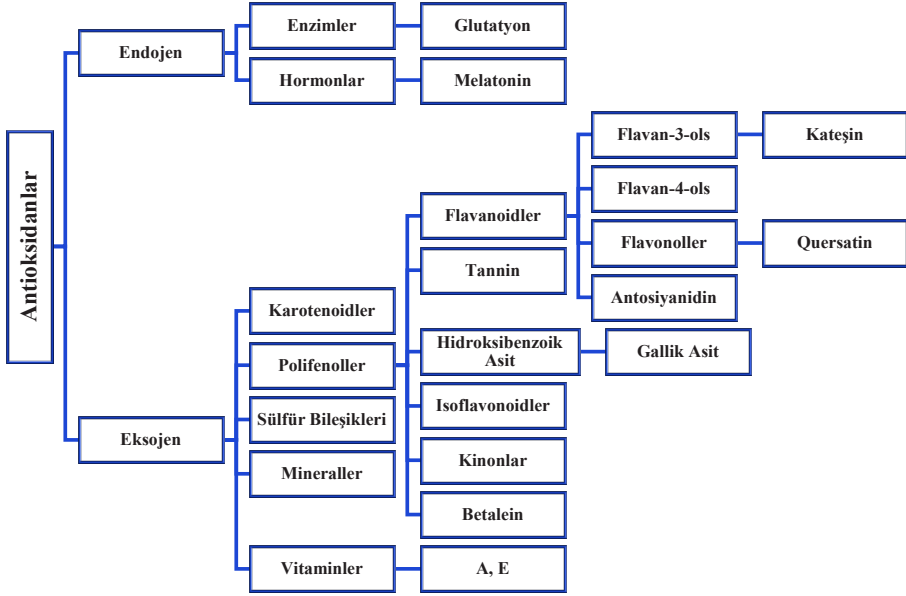
Ülkemizde üretilen ve tüketilen tahıllar içerisinde en çok kullanılanı buğday ve buğdaydan üretilen mamullerdir. Türkiye'deki gıda firmalarının %65'lik kısmı un ve unlu mamüllerden oluşmaktadır (Dülger Altınar, 2015). Un üretim tekniğine bağlı olarak buğdayın besleyici özelliklerinde azalma gerçekleşmektedir. Tüketicilerin yağ ve karbonhidrat miktarı yüksek fakat biyoaktif bileşenler açısından zayıf olan unlu mamülleri tüketmeleri başta obezite olmakla birlikte birçok hastalığa sebep olmaktadır. Bu sebeple günlük beslenmemizin temel besinlerinden olan unlu mamüllerin daha sağlıklı hale getirilmesi amacıyla birçok zenginleştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu gıdaların başında Türk halkının severek tükettiği ekmek (Erdoğan, 2022), kraker (Altınar, Sabuncu ve Şahan 2021), erişte (Özdemir ve ark., 2022), bisküvi (Aydos ve Ertaş, 2023), kek (Akter ve ark., 2023), kurabiye (Göçmen ve ark., 2019) yer almaktadır. Yapılan çalışmaların sonucunda unlu mamülleri vitamin, mineral, aminoasit, diyet lif gibi biyoaktif bileşenlerce zenginleştirmenin bu ürünlere

birçok besleyici ve fonksiyonel özellik kazandırdığı görülmüştür (Maurya ve ark., 2020).

2. Antioksidanlar

Serbest radikaller, son orbitalinde bir veya birden fazla eşlenmemiş elektron bulunduran, daha kısa ömürlü olan reaktif atom veya moleküllerdir. Bu moleküller kararlı durumdaki bileşiklerden elektron kopararak onları da serbest haldeki radikallere dönüştürebilmektedirler (Choi ve ark., 2004). Böylece düzensiz ve sürekli molekül alabilir veya molekül verebilirler hale gelen moleküller hücre yıkımına yol açarak canlıya zarar verebilme potansiyeline sahip olmaktadır (Pellegrini ve ark., 2009). Serbest radikaller, solunum, enzim reaksiyonları, otooksidasyon reaksiyonları gibi içsel kaynaklı ya da hava kirliliği, sigara dumanı, UV ışınları ve radyasyon gibi çeşitli çevresel kaynakların etkisiyle oluşabilmektedir. Serbest radikaller tüm hücrelere zarar verebilmekle beraber öncelikli olarak; DNA (nükleik asitler), lipitler ve proteinler üzerinde etkili olmaktadır (Mohammed ve ark., 2015; Cemeli ve ark., 2009). Serbest radikallerin kontrolsüz elektron alışverişi hücrede “oksidatif strese” (oksidatif hasar) sebep olmaktadır. Oksidatif stres, başta DNA üzerinde bulunan nükleik asitlere zarar vererek organizmanın pro-oksidan ve antioksidan dengesinin bozulmasına ve bunu sonucu olarak kanser, diyabet gibi birçok kronik hastalığın oluşumunda ve hücre yaşlanmasında etkili olmaktadır (Sabuncu, 2019; Karabulut ve Gülay, 2016).

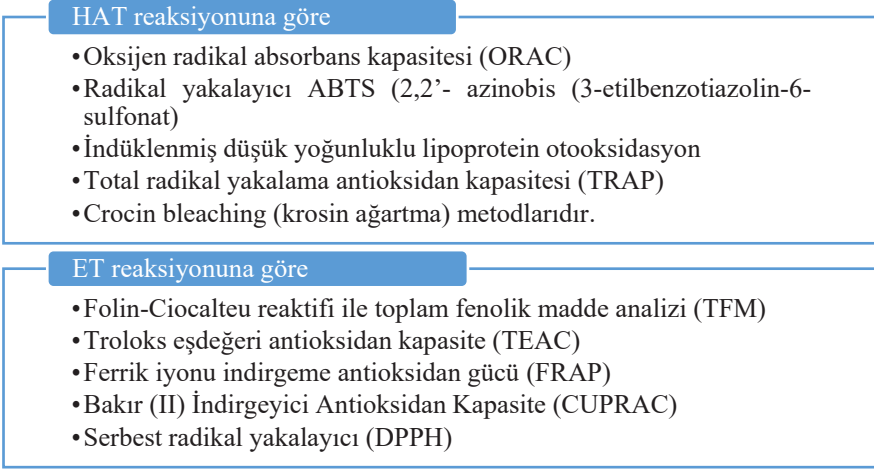
Serbest radikallerin/reaktif oksijen ve nitrojen türlerinin oluşumunu ve meydana getirdikleri hücresel hasarları önleyen ve detoksifikasyonunu sağlayan bileşiklere “*antioksidanlar*” adı verilmektedir (Şener ve Berrak, 2009). Bu bileşikler hücreye zarar vermeden düşük miktarlarda bile ortamda bulunan serbest radikallerle reaksiyona girerek istenmeyen otooksidasyon tepkimelerinin oluşumunu veya oluşan tepkimelerin ilerlemesini engelleyebilmektedir (Yadav ve ark., 2016). Antioksidanlar vücudumuzda sentezlenebildiği (endojen kaynaklı antioksidanlar) gibi dışarıdan (ekzojen kaynaklı antioksidanlar) da alınabilmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Antioksidanların sınıflandırılması
(Wotton-Beard ve Ryan, 2011; Akagün, 2009)

Gıdalarda bulunan antioksidan kapasitenin tespiti amacıyla literatürde standart bir metod yer almamaktadır. Yapılan araştırmalara bakıldığında aktif olarak kullanılan 20’den fazla antioksidan kapasite belirleme yöntemi olduğu bilinmektedir. Bunun sebebi antioksidan kapasiteyi oluşturan bileşenlerin çok çeşitli olması, serbest radikal bağlayıcı ile indirgeyici ajanların tek başına veya birlikte mekanizmaya katılmalarıdır (Güleşçi ve Aygül, 2016). Her yöntemin belirli bir ajana hedef alan mekanizması nedeniyle antioksidan kapasite yöntemleri de farklılık göstermektedir. Antioksidan kapasite tespit metodu seçilirken, çok farklı yapıdaki antioksidatif etkiye sahip bileşiklere karşılık verebilen (hidrofilik, lipofilik), seçiciliği yüksek, duyarlı, uygulanması kolay, ucuz ve tekrar edilebilir bir metod tercih edilmelidir. Ayrıca gıdalarda tek bir yöntemin kullanılması eksik ve/veya hatalı bir sonuç verebileceğinden çalışmalarda gıdanın içeriğine uygun en az iki farklı yöntemin tercih edilmesi ve buna göre yorumlama yapılması önerilmektedir (Büyüktuncel ve ark., 2014). Antioksidan kapasite tespit metodları temel olarak 2 başlık altında toplanmaktadır (Şekil 4). Bunlar; Hidrojen atomu transferi reaksiyonu (HAT) ve Tek elektron transfer reaksiyonuna (ET) göre belirlenen yöntemlerdir. HAT reaksiyonunu temel alan metodların çoğu *-azo bileşiklerinin* parçalanması ve

sonucunda termal şekilde meydana gelen peroksil radikallerinin antioksidan-substrat tarafından yarışmalı reaksiyonla ortadan kaldırılması prensibine dayanmaktadır (Sabuncu, 2019; Apak ve ark., 2007). ET temelli metodlarda ise, antioksidan bileşiğin indirgenmesinde renk değişimi gösteren oksidan maddeyi indirgeme kapasitesinin ölçümü prensibine dayanmaktadır. Çözeltide meydana gelen farklı renk yoğunlukları, örnekteki antioksidan konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 4. Antioksidan kapasite tayin metodları

3. Gıdaların Zenginleştirilmesi

Gıda zenginleştirme, özel risk grubunu oluşturan bireylerde ve/veya toplumun tamamında görülen bir veya birden fazla besin öğesinin yetersizliğinin engellenmesi veya yetersizliğin onarılması amacıyla, gıdaya dışarıdan fonksiyonel özelliğe sahip bileşik(ler) eklenerek gıdanın fonksiyonel özellik kazanması ve/veya gıdanın var olan fonksiyonel özelliğinin artırılmasıdır (Allen ve ark., 2006). Zenginleştirme işlemi gıdadan gıdaya farklılık göstermekle birlikte üretim süreci ve hedeflenen etkinin raf ömrü süresince korunması için son derece zor birtakım işlemleri gerektirmektedir. Bu kapsamda zenginleştirme işlemi yapılmadan önce birçok parametreye dikkat edilmelidir. Gıda zenginleştirmede işleminde **özellikle risk altındaki bireylerin tüketebileceği gıdaların tercih edilmelidir** (FAO, 1994).

Gıda zenginleştirme işleminin başarılı olabilmesi için öncelikle eksikliği ön görülen sorunun iyi tanımlanması ve hedef kitlenin doğru belirlenmesi gerekmektedir. Zenginleştirilmesi planlanan gıdaya tüketici tarafından ilgi

gösteriliyor ve katılım sağlanıyor olmalıdır. Ayrıca üretim sürecinden önce iyi bir piyasa etüdünün yapılması ve buna göre üretim süreçlerinin planlanması son derece önemlidir. Bunun yanı sıra zenginleştirilecek gıda üretilirken doğru proseslerin uygulanması, paketlenme ve dağıtımın sistemli bir şekilde olması gerekmektedir. Aksi takdirde istenilen amaçlara uygun bir ürün elde edilebilmesi mümkün olmamaktadır (Olson ve ark., 2021; Osendarp ve ark., 2018).

Gıdalarda zenginleştirme yapılırken toplum tarafından sıklıkla tüketilen gıdalar tercih edilmektedir. Bunlardan başlıcaları; süt/süt ürünleri, et/et ürünleri ve unlu mamüller (fırıncılık ve pastacılık ürünleri)'dir. Literatürde bu amaçla yapılmış birçok zenginleştirme çalışması yer almaktadır. Ayrıca bu ürünlerin etkilerinin belirlenmesi amacıyla üretilen gıdalara birçok fiziksel, fiziko-kimyasal, besleyici özellik, tekno-fonksiyonel özellikler ile birlikte biyoalınabilirlik analizleri yapıldığı görülmektedir.

4. Unlu Mamüllerin Zenginleştirilmesi

Unlu mamüller; ekmek, makarna, kek, bisküvi, kraker, erişte gibi buğday ve/veya farklı unlarla üretilen fırıncılık ürünlerine verilen genel bir addır. Dengeli beslenmemizin önemli bir parçası olan unlu mamüller Türk halkının en sık tükettiği gıda grubu arasında yer almaktadır. Fakat yapılan çalışmalar göstermektedir ki buğday unu iyi bir enerji kaynağı olmasına rağmen esansiyel aminoasitler (lisin ve treonin) ve protein miktarının düşük olmasından dolayı besin değeri açısından fakir kabul edilmektedir (Aksoylu, 2012; Dhidra ve Jood, 2001). Buğday ununa uygulanan un prosesi sonucu rüşeymi alınan buğday ununun besleyici özelliği azalırken, buğdayın kepek kısmının çeşitli fraksiyonlarda ayrılması sonucu elde edilen unun diyet lif miktarı da oldukça düşüktür. Bunlara ek olarak yapısında fitik asit gibi absorpsiyon inhibitörlerinin bulunması nedeniyle yapısında bulunan kalsiyum ve demir v.b minerallerin biyoyararlılığının düşük olduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır (Agrahar-Murugkar, 2020; Lazerte ve ark., 2015). Bu nedenle, unlu mamüller üretilirken, bazı doğal veya sentetik bileşenler kullanılarak, unlu mamüllerde görülen eksikliklerin giderilmesi, bu mamülleri tüketen bireylerde sağlık üzerine olumlu etkiler görülmesi amaçlanmaktadır.

Zenginleştirme amacıyla kullanılan başlıca bileşenler; diyet lif, meyve ve sebze tozları (polifenol ve antioksidan kaynağı), A-B-C-D vitaminleri ile iyot, demir, kalsiyum, fosfor, magnezyum vb. gibi minerallerdir (Field ve ark., 2020; Yavuz, 2019; Osendarp ve ark., 2018; Barkley ve ark., 2015). Zenginleştirme

amacıyla kullanılan diyet lif gıdaya; yağ tutma kapasitesi, su bağlama kapasitesi, şişme (kabarma) özelliği, emülsifikasyon/jel oluşturma ve lipit oksidasyonunu azaltma gibi etkileriyle gıdaya ekstra fonksiyonel özellikler katmaktadır (Xie ve ark., 2016; Quiros-Sauceda ve ark., 2014; Rahaie ve ark., 2012). Bu amaçla; gıdalara elma, portakal, hurma, armut, kavun, pancar vb. lif kaynağı olarak eklenen fonksiyonel özellik kazandırılmaktadır (Aydın, 2020).

Unlu mamüllerde oksidatif bozulmayı engelleyerek raf ömürlerinin uzatılması amacıyla doğal ve sentetik antioksidanlar katkı maddesi amacıyla kullanılmaktadır. Kullanılan sentetik antioksidanların oluşturabilecekleri olumsuzlukları engellemek amacıyla doğal antioksidan kaynaklarının kullanımına yönelik talep gün geçtikçe artmaktadır (Lu ve ark., 2010). Böylece, besin ögesi bakımından yetersiz olan unlu mamüllerin antioksidatif etkiye sahip doğal bileşenlerce zenginleştirilerek daha besleyici bir hale getirilmesi bunun yanında ürünün raf ömrünün uzatılması da hedeflenmiştir (Dizlek, 2021; Su ve ark., 2019).

4.1. Ekmek

Unlu mamüller denilince ilk akla gelen ekmeğe, en fazla tüketilen gıdaların başında gelmektedir. Tüketim sıklığı ve zenginleştirmeye uygunluğu nedeniyle literatürde çok sayıda ekmeğe zenginleştirme çalışması bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Ekmek zenginleştirme çalışmaları*

Fonksiyonel Bileşen	Kullanım Miktarı (%)	Kaynak
Üzüm posası tozu	2, 5, 10	Hayta ve ark., 2012
Karadut	1, 3	Meral ve Doğan 2012
Potakal posası unu	0, 2, 4, 8	O'Shea ve ark., 2015
Muz kabuğu tozu	5,10	Eshak, 2016
Yabani meyveler	5	Borczak ve ark., 2016
Enginar sapı tozu	2.5-5-7.5-10	Boubaker ve ark., 2016
Yeşil mercimek ve keçiyoynuzu unu	5, 6, 10, 12, 24	Turfani ve ark., 2017
Kuşburnu çekirdeği unu	5, 7.5,10	Gül ve Şen 2017
Chia tohumu	2,4,6,8	Romankiewicz ve ark., 2017
Balkabağı tozu	2.5, 5, 7.5,10	Minarovičová ve ark., 2018
Karabuğday unu	10, 20, 30	Verardo, 2018
Kuersatin tozu	0, 0.20	Lin ve Zhou 2018
Mor havuç tozu	0, 7.5	Pekmez ve Yılmaz 2018
Keten tohumu ve acı bakla tozu	2,10	Wandersleben ve ark., 2018
Kinoa unu	5,10,15	Xu ve ark., 2019
Mantar (<i>Agaricus bisporus</i>) tozu	2,4,6,8	Zhang ve ark., 2019
Beyaz dut ve yaprağı tozu	10, 3	İnce ve Çağındı, 2020
Arpa unu	40,50,60,100	Roblez-Ramirez ve ark., 2020
Kabak unu	5,10,20	Wahyono ve ark., 2020
Tarçın ve nar kabuğu tozu	0.25, 0.5, 1.0	Issaoui ve ark., 2020
Siyah mercimek unu	2,6,10	Demiray, 2021
Karadut, böğürtlen, çilek, mor havuç tozu	5	Erdoğan, 2022
Zencefil tozu	0.5, 1, 1.5	Özcan, 2022

*TFM: Toplam Fenolik Madde, Antioksidan kapasite belirleme yöntemi; ABTS, CUPRAC, DPPH, FRAP

Boubaker ve ark. (2016) beyaz ekme formülasyonuna %2.5, 5, 7.5 ve 10 oranında enginar sapı tozu ilave ettikleri çalışmada ekmeğin kalite özellikleri ile TFM miktarı belirlenmiştir. Sonuçlara göre zenginleştirilen ekmeğin TFM miktarının ilave oranı arttıkça arttığı fakat %2.5' den fazla enginar sapı tozu ilavesinin, ekmeğin tekno-fonksiyonel özelliklerinin bozulmasına sebep olduğu ayrıca 2.5'den fazla ilavenin ekmeğin duysal özelliğini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Zenginleştirme yapılırken üretici ve tüketici için kabul edilebilir limitlerinin belirlenmesi ve optimum değerin sağlanması oldukça önem arz etmektedir.

Lin ve Zhou (2018) fonksiyonel ekme üretimi yaptıkları çalışmada, beyaz ekme formülasyonlarına kuersetin tozunu %0-0.20 oranında eklenmiştir. TFM değeri kontrol grubu ekmeelerde 63.9 iken %0.20 ilaveli ekmeekte 233.4 mg GAE/100g dw olarak belirlenmiştir. Antioksidan kapasite değerleri ise kontrol grubunda 2.9-8.4 TE/100g dw iken %0.20 kuersetin tozunu ilaveli ekmeelerde ABTS ve DPPH yöntemine göre sırasıyla 285.8 ve 298.5 mg TE/100g dw olduğu tespit edilmiştir. İlave miktarına bağlı olarak kuarsetin gibi fonksiyonel özelliklere sahip etken maddelerin eklenmesinin ekmeğin antioksidan kapasitesini 4 ila 10 kat arasında arttırdığı görülmüştür.

Demiray (2021) siyah mercimek ununu zenginleştirme amacıyla %2, 6 ve 10 oranında buğday ununa ikame olacak şekilde ekme formülasyonunda kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda %6 ve %10 oranında zenginleştirme yapılan ekmeelerde kontrol ekmeğine kıyasla istatistiksel olarak önemli artışın olduğu bildirilmiştir. TFM değerinin yaklaşık 9.69 mg/100g'dan 13.22 mg/100g'a, DDPH değerinin 10.34 µmol/ 100 g'dan 13.22 µmol/ 100 g'a ve FRAP değerinin 41.26 µmol/ 100 g'dan 54.12 µmol/ 100 g'a arttığını belirlemiştir. Ayrıca diyet lif miktarının %56 oranında artış gösterdiği bildirilmiştir. Ancak hamurun reolojik özelliklerindeki değişime bağlı olarak ekmeğe siyah mercimek unu ilavesinin maksimum %10 ile sınırlandırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Erdoğan (2022) karadut, böğürtlen, çilek ve mor havuç tozu katkılı fonksiyonel ekme üretiminin yapıldığı çalışmada, zenginleştirilen ekmeğin TFM ve ABTS değerinin %5 karadut ilaveli ekmeekte en yüksek değerleri verdiği ve yaklaşık 3 kat artış sağladığı tespit edilmiştir. Zenginleştirilen ekmeğin antosiyanin profillerinde de belirgin olarak yükseldiği ayrıca kontrol ekmeğinde yer almayan kateşin, 4-hidroksibenzoik asit, p-kumarik asit, mirisetin, kuersetin ve rutin fenoliklerinin zenginleştirilen ekmeelerde olduğu tespit edilmiştir. Duysal analiz sonuçlarında ise en beğenilen ekmeğin %5 karadut tozu ile

zenginleştirilen ekmeğın olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer bir çalışmada %1-3 oranında kullanılan karadut tozu ilavesinin ekmekte TFM miktarının 0.4 ile 0.8mg GAE/ 100 g olarak belirlendiği ve antioksidan aktivitesinin (DPPH) ise %3 karadut tozu içeren ekmeklerde en yüksek değerleri verdiği görülmüştür (Meral ve Doğan, 2012).

Bu çalışmalar ile hammadde ve proses kaynaklı kusurları gidermek, ekmeğin tekno-fonksiyonel özelliklerini iyileştirmek, besin değerini arttırmak, bozulmasını geciktirmek, daha sağlıklı ürünler üretmek ve piyasadaki ürün çeşitliliğine katkıda bulunmak mümkün olabilmektedir.

4.2. Makarna ve Erişte

Makarna, besleyici, düşük maliyetli, kısa sürede/kolay pişirilen ve tüketici tarafından sevilerek tüketilen bir unlu mamul grubudur ve popülerliği gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle makarna ve erişte, zenginleştirmeye uygun bir gıda olarak değerlendirilmiştir (Köten ve Ünsal, 2022). Diyet lif, mineral ve vitaminler gibi önemli bileşenleri bakımından zayıf olan buğday unu ile üretilen erištenin, besinsel değerinin yanında tekstürel ve duyusal özelliklerini de geliştirmesi amacıyla çok sayıda çalışma yer almaktadır (Koca ve ark., 2018; Yaver ve Bilgiçli, 2020). Bu çalışmalardan bazıları, Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Erişte ve makarna zenginleştirme çalışmaları*

Örnek	Fonksiyonel Bileşen	Miktar (%)	Kaynak
Erişte	Pirinç kepeği	10,20,30	Yılmaz Tuncel ve ark., 2017
	Siyez unu	20,40,60,80,100	Levent, 2019
	Kavun çekirdeği	10,20,30,40	Pozan, 2019
	Menengiç	10,20,30	Köten ve Ünsal, 2020
	Buğday ruşeymi	5,10,20	Demir, 2021
	Keçiboynuzu unu	10,20,30,40	Dülger Altınar, 2021
	Yeşil fasulye, domates ve bamyaya tohumu tozu	4,8,12	Cumhur, 2021
	Çimlendirilmiş buğday	15,30,45,60	Kömürcü, 2021
	Çimlendirilmiş nohut	10,20,30	Polat, 2021
	Yer fıstığı, kestane ve fındık kabuğu	1	Geçer, 2022
	Mercanköşk	2.5,5,10	Özdemir ve ark., 2022
	Mor buğday unu	100	Ficco ve ark., 2015
	Isırgan	2.5	Marchetti ve ark., 2018
	Moringa filizi unu	5,10,15,20,30	Coello ve ark. 2021
Makarna	Hindiba kahvesi	1,2,3,4,5	Biernacka ve ark., 2021
	Güvercin bezelye ve patates unu	6,12,18	Sharma ve ark., 2022
	Brokoli yan ürünleri	5,10,15	Bokić ve ark. 2022
	Tatlı patates unu	20,30,40	Malhotra ve ark., 2022
	Ananas unu ve soya proteini	3,5	Devi ve ark., 2023

*TFM: Toplam Fenolik Madde, TF: Toplam Flavanoid; Antioksidan kapasite belirleme yöntemi: ABTS, CUPRAC, DPPH, FRAP

Demir ve ark., (2021), zenginleştirilmiş erişte üretimi için buğday ununu %5,10,20 oranlarında buğday ruşeymi ile ikame etmişlerdir. Ruşeym oranı ile orantılı olarak, eriştenin protein, toplam fenol, diyet lif ve fitik asit içeriğini arttığı görülmüştür. Zenginleştirilen eriştelerde kalsiyum, çinko gibi mineral madde ve tokoferol miktarlarında da anlamlı düzeyde artış gözlenmiştir ($p<0.05$). Fakat ruşeym ikame miktarı arttıkça eriştenin pişirme kalitesi ve tekstürel özelliklerinin bozulduğu bildirilmiştir.

Coello ve ark. (2021), biyoaktif bileşenlerce zenginleştirilmiş besleyici makarna üretmek amacıyla, makarna formülasyonuna moringa filizi eklemiştir. Moringa filizinin ilave oranı arttıkça, üretilen eriştelerin kimyasal özelliklerinde, lif ve mineral madde içeriğinde ilave miktarına bağlı orantılı bir artış gözlenmiştir. Bunun yanında makarnanın riboflavin, γ -aminobütirik asit, tiamin, glukozinolat ve antioksidan kapasite miktarında artış görüldüğü bildirilmiştir. Ancak, %10'dan fazla moringa filizi formülasyona ilave edildiğinde tekstürel özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği bildirilmiştir.

Dülger Altınar (2021), geleneksel yöntemle üretilen Türk eriştelerin fonksiyonel özelliklerini iyileştirmek amacıyla keçiyoynuzu ununu %10-40 oranlarında buğday ununa ikame ederek kullanmıştır. Doğal bir antioksidan ve fenolik bileşen kaynağı olduğu bilinen keçiyoynuzu unu ilavesinin, eriştelerde antioksidan kapasite, TFM ve % biyoalınabilirlik değerlerini arttırdığı bildirilmiştir. %10-20 keçiyoynuzu ilaveli zenginleştirilmiş eriştelerin duyusal açıdan en iyi puanları aldığı görülmüştür.

4.3. Atıştırmalıklar (Bisküvi, Kraker, Kek)

Atıştırmalıkların gıda sanayiinde üretimi 1800'lü yıllara kadar dayanmaktadır. "Atıştırmalık" (snack) ve "atıştırmalık gıda" (snack food) tanımlarını genelleyecek olursak, kısa sürede; hızlıca tüketilebilen, anlık tokluk hissi veren, içeriğinde sağlıklı bileşenler bulunduran ve/veya bulundurmeyen gıda ürünleridir (Hess ve ark., 2016).

Bisküvi

Bisküviler, dünya çapında en yaygın tüketilen unlu mamüllerin başında gelmektedir. Çoğunlukla çocuklar tarafından tüketilen bisküvi, yüksek doymuş yağ girdisi, rafine edilmiş şekerler nedeniyle yüksek miktarlarda tüketildiğinde obeziteye sebebiyet verebilmektedir. Bu ürünlerdeki buğday ununun daha yüksek besin kalitesine sahip unlarla veya fonksiyonel özelliklerdeki bileşenlerle kısmi ikamesi, özellikle küçük çocuklarda aşırı kilo ve obezite problemlerini azaltabilmektedir (Diaz ve ark., 2019). Bu anlamda, besleyici değeri artırılmış ve yeterli renk, doku ve kabul edilebilirlik özelliklerine sahip bisküvilerin üretilmesi amacıyla yapılan zenginleştirme çalışmaları günümüzde oldukça önemlidir (Tablo 3).

Kahve, dünya genelinde sudan sonra en çok tüketilen içecek konumundadır. Bu çaptaki bir tüketimden dolayı oluşan kahve yan ürünleri ve atıklarının

alternatif kullanımları ile ilgili çalışmaların son dönemde artmasına sebep olmuştur (Cantel ve ark., 2022). Göçmen ve ark. (2019) kahve çekirdeği zarı ile %2.5, 5 ve 7.5 oranlarında zenginleştirdikleri bisküvilerde, kontrol grubu bisküviye kıyasla antioksidan kapasitenin ortalama 2 kat oranında arttığını rapor etmişlerdir. Kontrol grubunda %55.74 olan %biyoalınımın kahve çekirdeği zarı ilavesi ile doğru orantılı şekilde arttığı ve %7.5 oranında zenginleştirilen bisküvilerde %88.46'ya yükseldiği bildirilmiştir. Böylece kahve çekirdeği zarı zenginleştirmeye ek olarak biyoalınımı daha yüksek bisküvi üretilmesini de sağlamıştır.

Doğal olarak fonksiyonel bir kaynak olan polen literatürde “süper besinler” arasında yer almaktadır ve bu sebeple zenginleştirme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bisküvilerin polen ile zenginleştirildiği çalışmalarda, polenin antioksidan kapasiteyi önemli bir düzeyde arttırdığı, ayrıca mineral ve fenolik içeriği zenginleştirdiği görülmektedir (Végh ve ark., 2023; Dündar, 2022; Sokmen, 2022). Ayrıca yapılan duyusal analiz sonuçlarında polen ilavesi oranı arttıkça tüketici beğenisinin de arttığı bildirilmiştir.

Mitrevski ve ark. (2022) kırmızı pancar tozu ilavesi ile ürettikleri fonksiyonel bisküvilerin depolama boyunca besleyici değerlerindeki değişimi incelemişlerdir. Çalışmada %15-20 ve 25 oranlarında yapılan zenginleştirme ile flavanoid, TFM ve antioksidan kapasite değerlerinin tamamı kontrol örneğine kıyasla ilave oranıyla doğru orantılı olarak daha yüksek değerler vermiştir. %25 kırmızı pancar tozu ilaveli bisküvilerin 6. ay sonunda polifenol içeriğinin 320.93'dan 206.852 mg/100g'a düştüğü ve toplam fenol miktarında %14, DPPH değerinde ise %15 kayıp meydana geldiği bildirilmiştir.

Tablo 3. Bisküvi zenginleştirme çalışmaları*

Fonksiyonel Bileşen	Miktar (%)	Kaynak
Balkabağı unu	10,20,30	Aydın, 2014
Portakal kabuğu tozu	1,3,5,7	Can, 2015
Karniyarik otu	3,4,5,6,7,8,9	Fradinho ve ark., 2015
Mandalina kabuğu tozu	3,6,9	Ojha, 2017
İncir çekirdeği unu	10,20,30	Ulutürk, 2018
Kahve çekirdeği zarı	2.5, 5, 7.5 2,4,6	Göçmen ve ark., 2019 Cantele ve ark., 2022
Hünnap unu	5,10,15,20	Koyuncu, Demir ve Olcay 2019
Siyah havuç tozu	10,20,30	Baltacıoğlu ve ark., 2019
Kavun kabuğu ve çekirdeği unu	2.5, 5 1.25, 2.5	Ertaş ve Aslan, 2020
Kumkuat tozu	10,20,30	Olcay ve Demir, 2020
Spirulina ve Duneliella mikroalg	1,2 2,6 1,2 0.5, 1.5, 3	Egea ve ark., 2014 Batista, 2017 Şahin, 2020 Dündar ve ark., 2023
Polen	5,10,15 5,10,15 2,5,10	Sokmen, 2022; Dündar, 2022; Végh ve ark., 2023
Mor patates kabuğu tozu	3,5,7,10,30,50 2,5,10	Tlay ve ark., 2022 Bakar ve ark., 2022
Bergamot kabuğu tozu	2.5, 5, 10, 15	Laganà ve ark., 2022
Kırmızı pancar tozu	15,20,25	Mitrevski ve ark., 2022
Devedikeni	5,10,15,20	Krystyan ve ark., 2022
Hurma çekirdeği tozu	2.5, 5, 7.5	Najjar ve ark., 2022
Arpacık soğan tozu	5,10,15,20	Adeyemo ve ark., 2022
Muşmula tozu	3,6,9	Aydos ve Ertaş, 2023
Ginseng tozu	4	Mofor ve ark., 2023
Kakao çekirdeği kabuğu tozu	10,20,30,40	Soares, 2023
Zeytin yaprağı ekstraktı	5,10,20	Paciulli ve ark., 2023
Mangosten meyvesi kabuğu	1,3,5,7	Indiarto, 2023

*TFM: Toplam Fenolik Madde, TF: Toplam flavanoid; Antioksidan kapasite belirleme yöntemi; ABTS, CUPRAC, DPPH, FRAP

Kraker

Diyetimizin ayrılmaz bir parçası olan atıştırmalıklar, günümüzde bireylerin daha sağlıklı alternatifler tercih etmeye başlamasından dolayı en sık fonksiyonelleştirilen ürün gruplarından (Mir et al., 2017). Krakerin zenginleştirilmede tercih edilmesinde tüketici tarafından sevilerek tüketilmesinin yanında ulaşılabilir ve raf ömrü ömrünün uzun olması gibi sebepler de etkili olmaktadır (Lekjing ve Venkatachalam, 2019). Fonksiyonel krakerlerin besinsel ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla alternatif tahıllar (amarant, kinoa vb), yağlı tohumlar ve meyve-sebze unları tercih edilmiştir. Literatürde kraker çalışmalarına ait örnekler Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. Kraker zenginleştirme çalışmaları*

Fonksiyonel Bileşen	Miktar (%)	Kaynak
Kenevir Tohumu	10,20,30,40	Radočaj ve ark., 2014
Hibisküs Tozu	1.25, 2.5, 3.75, 5	Ahmed ve Abozed, 2015
Şevketi Bostan Unu	5,10,20,30,40	Dülger Altner, 2015
Domates Çekirdeği Tozu	4,8,12	Işık ve Topkaya, 2016
Maş fasulyesi unu	20,40,60,80	Venkatachalam ve Nagarajan 2017
Narenciye çekirdeği	2.9	Yılmaz ve Karaman, 2017
Sarı Haşhaş ezmesi	10,20,30	Yalçın, 2018
Bezelye unu	20,30	Olagunju ve ark., 2018
Brokoli yan ürünleri	12.5, 15	Lafarga ve ark., 2019
Mikro Alg <i>Spirulina</i>	2,6 2.5, 4	Batista ve ark., 2019 Gün, 2019
Mor Buğday Unu	50	Gamel ve ark., 2019
Kabak Çekirdeği Unu	20,35	Tomic et al., 2022 Dülger Altner, 2019
Çay Polifenoller	1	Ünal, 2022
Yeşil mercimek Özütü	5,10,15	Polat ve ark., 2020
Enginar yaprağı tozu	10,20,30	Savlak ve ark. 2020
Karyota Palmiyesi Unu	25,50,75	Ranaweera ve Gunathilake 2022
Yeşil mercimek unu ve keçiyoynuzu unu	3,6,9,12	Yaver, 2022
Nohut ve kabak çekirdeği unu	20,35	Tomić ve ark., 2022
Kırmızı Soğan Kabuğu Tozu	1,3	Stoica ve ark., 2022
İğde unu	5,10,15	İncedayı ve Erol, 2023

*TFM: Toplam Fenolik Madde, TF: Toplam flavanoid; Antioksidan kapasite belirleme yöntemi; ABTS, CUPRAC, DPPH, FRAP

Lafarga ve ark. (2019), brokolinin sap ve yaprak kısımlarından elde ettikleri sebze ununu %12,5 ve %15 oranında kraker formülasyonuna eklemiştir. Çalışmada %15 ilaveli krakerlerde kontrol grubuna göre TFM 7 kat, FRAP 5 kat, DPPH 5 kat oranda artmıştır. Depolama süresince TFM değerinin 7. Günde %20 kadar bir kayıba uğradığı ancak 14. günde bu değer anlamlı düzeyde azalmadığı ($p<0.05$) bildirilmiştir. DPPH ve FRAP sonuçları da depolama süresince TFM ile benzer sonuçlar vermiştir. Ayrıca yapılan zenginleştirmenin krakerlerde %biyoaktivitesinin artmasını sağladığı bildirilmiştir.

Gamel ve ark. (2019) mor buğday genotipi ile bar, kraker, ekmek, pankek, yulaf lapası atıştırmalıklarını zengileştirmiştir. Fenolik asit, diyet lif, mineral madde bakımından zengin olan bu atıştırmalıkların insan sağlığına olumlu katkılar sağlayacağı ayrıca mor rengin tüketici tarafından daha fazla beğeni puanı aldığı bildirilmiştir. Aynı şekilde mor soğan kabuğu ile yapılan çalışma sonuçları da benzer şekilde sonuçlar vermiştir (Stoica ve ark., 2022). Yapılan çalışmaların sonucunda antosiyanin bakımından zengin olduğu bilinen mor rengi sebze unlarının iyi bir antioksidan kaynağı olduğu bildirilmiştir. Antioksidatif etkisi olan bu mor renkli atıştırmalıkların tüketiminin bazı oksidatif kaynaklı hastalıkların oluşumunu engelleyebileceği ve sağlıklı birer alternatif oldukları için tüketilmesi tavsiye edilmektedir.

Kek

Kek, atıştırmalık gıdalardan biri olup, toplumun birçok kesimi tarafından sevilerek tüketilen gıda maddesidir. Yağ ve şeker içeriğinin yüksek olmasından dolayı kalorisi yüksek bir atıştırmalıktır. Fonksiyonel özellikler kazandırmak ve besin değerini yükseltmek amacıyla üretiminde alternatif unlar tercih edilmektedir (Tablo 5).

Baltacıoğlu ve ark. (2020) Trabzon hurması tozu ilavesi ile hazırlanan keklerin şeker miktarını %20 azaltmıştır. Üretilen keklerde TFM (%261) ve antioksidan aktivite değeri ($DPPH_{EC50}$ %98) önemli düzeyde artış göstermiştir. Yapılan duyu analizi sonuçlarına göre en yüksek puan alan kek %30 trabzon hurma tozu ile zenginleştirilen kek olmuştur. Bu çalışma ile şeker içeriğini azaltarak kalorisi düşürülmüş, sağlığa yararlı etkisi artırılmış kek üretilmiş ve tüketiciler tarafından kabul edilebilir bulunmuştur.

Propolis, son yıllarda sağlık üzerine olan faydalarından dolayı zenginleştirme çalışmalarında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Acun ve Gül (2021) top kek üretiminde mikroenkapsüle çam propolisi kullanımı ile %15 ilaveli kekin kontrol kekine kıyasla TFM miktarının 5 kat oranında (253.99-

1341.55 mg GAE/100g), antioksidan aktivitenin ise %1.62 den %93.32'ye yükseldiğini belirlemiştir. Ancak propolisin keskin tat ve kokuya sahip olması sebebiyle en düşük puanı %15 ilaveli top kekler almış olup %6 ilaveli kekin üretime daha uygun olduğu bildirilmiştir.

Tablo 5. Kek zenginleştirme çalışmaları*

Fonksiyonel Bileşen	Miktar (%)	Kaynak
Keçiboynuzu unu	20,40,60,80	Gerçekaslan ve Hüseyin, 2018
Bal tozu	25,50,75,100	Demir ve Kılınc., 2019
Hindiba özütü ve Trabzon hurması tozu	10,20,30	Baltacıoğlu ve ark., 2020
Leblebi tozu	10,20,30	Ataman ve Gül, 2020
Pirinç kepeği	20,30,40	Mendes ve ark., 2021
Nar çekirdeği tozu	2.5, 5., 7.5, 10	Ayoubi ve ark., 2021
Mısır unu	10,20,30,40,50	Köten ve Ünsal, 2021
Çam propolisi	6,9,15	Acun ve Gül, 2021
Safran	0.5, 1	Bhat ve ark., 2022
Kabak unu	5,10,20,40	Şımarmaz, 2022
Chia tohumu	3,5,7	Aljobair, 2022
Hibisküs	5,10,15	Yıldız, 2022
Balkabağı tozu	5,10,15,20	Kılıç, 2022
Domates kabuğu	4,6,8	Akter ve ark., 2023
Kinoa ve bamya unu	15-20 + 0.8, 0.16	Shobeiri ve ark., 2023

*TFM: Toplam Fenolik Madde, TF: Toplam flavanoid; Antioksidan kapasite belirleme yöntemi; ABTS, CUPRAC, DPPH, FRAP

5. Sonuç

Sağlıklı beslenme konusunda artan bilinç düzeyi ile tüketiciler daha doğal ve zengin içeriğe sahip gıda ürünlerine yönelmeye başlamıştır. Bu çalışmada, farklı unlu mamullerin zenginleştirilmesinde kullanılan fonksiyonel bileşenlerin antioksidatif etkileri yönünden karşılaştırılması yapılmıştır. Tokoferoller, askorbik asit, karotenoidler ve fenolik bileşikler gibi gıdaların yapısında bulunan antioksidan bileşenler serbest radikallere karşı koruyucu etki göstermekte ve sağlığı koruyucu özellikleri ile bilinmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde doğal antioksidan kaynağı bakımından zengin meyve, sebze, bitki, kurubaklagil, bazı yağlı tohumlar ve baharatların gıdaların antioksidan kapasite, fenol içeriği ve biyoelenebilirliklerini arttırmak amaçlı kullanıldığı

tespit edilmiştir. Gıdalarda bulunan antioksidan bileşenlerin fizyolojik etkilerinin ölçüm yöntemi olarak pek çok antioksidan kapasite tayin yöntemi bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda kullanılan gıdanın tipi, analiz aşamaları, kullanılan kimyasallar, çözgen seçimi, ayrıca katkı maddesi olarak kullanılan fonksiyonel bileşiğin türü, yetiştirilme şartları, işleme şartları, saklama koşulları vb. değişkenlere bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Kullanılan antioksidan kapasite yöntemlerinin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Literatür incelendiğinde tek bir yöntem yerine en az iki yöntemin karşılaştırılması tavsiye edilmiştir.

Sonuç olarak, zenginleştirme çalışmaları için unlu mamüllerin oldukça uygun gıdalar olduğu ancak, zenginleştirilmesi planlanan çeşide, üretim şekline, zenginleştirme amacıyla kullanılacak materyale, üründen beklenen kalite ve duyu özelliklerine ve zenginleştirme sonucunda beklenen faydaya bağlı olarak çalışmaların yapılması ve elde edilen ürünlerin yasal koşullara da uygun olarak planlanması önerilmektedir. Ayrıca, biyoaktif bileşenlerce zengin fonksiyonel bileşenlerin, doğru gıda üretim proseslerinde değerlendirilerek ürün geliştirmede kullanılması ve insan sağlığına daha yararlı ürünler üretilmesi ve zenginleştirme çalışmalarının yaygınlaştırılması tavsiye edilmektedir.

Kaynaklar

Acun S., & Gül H, 2021. Mikroenkapsüle çam propolisinin top kek üretiminde kullanılması. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 1205-1217.

Agrahar, MD. (2020). Food to food fortification of breads and biscuits with herbs, spices, millets and oil seeds on bio-accessibility of calcium, iron and zinc and impact of proteins, fat and phenolics. *LWT – Food Science Technology*, 130, 109703.

Aksoylu, Z., Çağındı, Ö., & Köse, E., (2012). Bisküvinin fonksiyonel bileşenlerce zenginleştirilmesi. *Akademik Gıda*, 10(3),70-78, 2012.

Akter, M., Anjum, N., Roy, F., Yasmin, S., Sohany, M., & Mahomud, M. S. (2023). Effect of drying methods on physicochemical, antioxidant and functional properties of potato peel flour and quality evaluation of potato peel composite cake. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100508.

Aljobair, M. O. (2022). Effect of chia seed as egg replacer on quality, nutritional value, and sensory acceptability of sponge cake. *Journal of Food Quality*,1-11.

Allen, L., De Benoist, B., Dary, O., & Hurrell, R. (2006). *Guidelines on food fortification with micronutrients*. WHO/FAO.

Altan, A., (1986). Tahıl işleme teknolojisi”, *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Notları*, 13, 50-75.

Anderson, J. W., Baird, P., Davis Jr, R. H., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., ... & Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutrition Reviews*, 67(4), 188-205.

Adeyemo, A. E., Omoba, O. S., Olagunju, A. I., & Josiah, S. S. (2022). Chemical composition, in vitro antioxidant properties, and phenolic profile of shallot (*Allium ascalonicum* L.)-enriched plantain biscuit. *Bulletin of the National Research Centre*, 46(1), 1-16.

Ayoubi, A., Balvardi, M., Akhavan, H. R., & Hajimohammadi-Farimani, R. (2021). Fortified cake with pomegranate seed powder as a functional product. *Journal of Food Science and Technology*, 1-9.

Ataman, Ç., & Hülya, G. (2020). Leblebi üretiminde yan ürün olarak açığa çıkan kırık leblebi ununun mufin kalitesi üzerine etkisi. *Black Sea Journal of Agriculture*, 3(4), 308-316.

Aydos, M., & Ertaş, N. (2023). Fonksiyonel bisküvi üretiminde farklı yöntemlerle kurutulmuş muşmula (*Mespilus germanica*) meyve tozu kullanımı. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 27(01), 113-124.

Bakar, M. F. A., Ranneh, Y., & Kamil, N. F. M. (2022). Development of high fiber rich antioxidant biscuits from purple and orange sweet potato peels. *Food Research*, 6(1), 12-19.

Baltacıoğlu, C., Temzisoy, B., Kanbur, M., Doğan, M., & İbili, S. (2020). Hindiba (*Cichorium Intybus* L.) kökü ekstraktı ve trabzon hurması (*Diospyros kaki* L.) tozunun kek üretiminde kullanılması ve kalite parametreleri üzerine etkisinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 297-307.

Baltacıoğlu, H., Baltacıoğlu, C., & Tangüler, H. (2019). Effect of waste fermented carrot powder addition on quality of biscuits. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(9), 1237-1244.

Baltacıoğlu, C., & Uyar, M. (2017). Kabak (*Cucubita pepo* L.) tozunun kek üretiminde potansiyel kullanımı ve kek kalite parametrelerine etkisi. *Akademik Gıda*, 15(3), 274-280.

Barkley, J.S., Wheeler, K.S., & Pachon, H. (2015). Anaemia prevalence may be reduced among countries that fortify flour. *British Journal of Nutrition*, 114, 265–273.

Batista, A. P., Niccolai, A., Fradinho, P., Fragoso, S., Bursic, I., Rodolfi, L., Biondi, N., Tredici, M. R., Sousa, I., & Raymundo, A. (2017). Microalgae biomass as an alternative ingredient in cookies: Sensory, physical and chemical properties, antioxidant activity and in vitro digestibility. *Algal Research*, 26, 161-171.

Bayaz M. & Mehenktaş C. (2004). Fonksiyonel gıdalar: önemi ve üretiminde kullanılan teknikler. *Gıda*, 29(5), 367-371.

Bhat, N. A., Wani, I. A., Hamdani, A. M., & Gani, A. (2022). Development of functional cakes rich in bioactive compounds extracted from saffron and tomatoes. *Journal of Food Science and Technology*, 1-13.

Biernacka, B., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., & Różyło, R. (2021). Common wheat pasta enriched with cereal coffee: Quality and physical and functional properties. *LWT – Food Science Technology*, 139, 110516.

Bokić, J., Škrobot, D., Tomić, J., Šeregelj, V., Abellán-Victorio, Á., Moreno, D. A., & Ilić, N. (2022). Broccoli sprouts as a novel food ingredient: Nutritional, functional and sensory aspects of sprouts enriched pasta. *LWT – Food Science Technology*, 172, 114203.

Borczak, B., Sikora, E., Sikora, M., Kapusta-Duch, J., Kutyla-Kupidura, E. M., & Fołta, M. (2016). Nutritional properties of wholemeal wheat-flour bread with an addition of selected wild grown fruits. *Starch-Stärke*, 68(7-8), 675-682.

Boubaker, M., Omri, A. E., Blecker, C., & Bouzouita, N. (2016). Fibre concentrate from artichoke (*Cynara scolymus* L.) stem by-products: Characterization and application as a bakery product ingredient. *Food Science and Technology International*, 22(8), 759-768.

Bozdemir M., Demirci Orel F., & Demirkılıç N. (2017). Tüketim değerleri, satın alma niyeti ve satın alma davranışı arasındaki ilişkilerin incelenmesi: fonksiyonel gıdalar üzerine bir çalışma. **Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, 26(3), 241-256.

Cantele, C., Tedesco, M., Ghirardello, D., Zeppa, G., & Bertolino, M. (2022). Coffee silverskin as a functional ingredient in vegan biscuits: Physicochemical and sensory properties and in vitro bioaccessibility of bioactive compounds. *Foods*, 11(5), 717.

Cemeli E, Baumgartner A., & Anderson D. (2009). Antioxidants and the Comet assay. *Mutation Research*, 681, 51-67.

Cingöz A., Dayısoyly K.S., & Gezginç Y. (2013). 'Fonksiyonel gıda mı, fonksiyonel bileşen mi? gıdalarda fonksiyonellik'. *Gıda*, 39 (1), 57-62.

da Rocha Lemos Mendes, G., Souto Rodrigues, P., de las Mercedes Salas-Mellado, M., Fernandes de Medeiros Burkert, J., & Badiale-Furlong, E. (2021). Defatted rice bran as a potential raw material to improve the nutritional and functional quality of cakes. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76, 46-52.

Cumhur, A. M. (2021). Sebze tozu eklenmiş hazır çabuk erişte üretimi (*Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi).

Demiray, M. (2021). Siyah mercimek unu ile zenginleştirilmiş ekmek üretimi (*Yüksek Lisans Tezi*, Gümüşhane Üniversitesi).

Devi, Y. B., Dhar, P., Kumari, T., & Deka, S. C. (2023). Development of functional pasta from pineapple pomace with soyflour protein. *Food Chemistry Advances*, 2, 100198.

Dhingra, S., & Jood, S. (2001). Organoleptic and nutritional evaluation of wheat breads supplemented with soybean and barley flour. *Journal of Food Chemistry*, 77, 479-488.

Dizlek, H., Altan, A., (2021). The impacts of batter and baking temperatures and baking time on sponge cake characteristics. *Electronic Letters on Science and Engineering*, 17(2), 89-95.

Doğan İ.S. & Meral R. (2009). Fonksiyonel öneme sahip doğal bileşenlerin unlu mamullerin üretiminde kullanımı. *Gıda*, 34(3), 193-198.

Dündar, A. N., Şahin, O. I., & Sarıcaoğlu, F. T. (2023). Low-fat cookies with *Chlorella vulgaris*: effects on dough rheology, physical, textural and sensory properties of cookies. *Gıda*, 48(3), 526-544.

Egea, B., Campos, A., De Carvalho-Eliane, J., & Danesi, D. (2014). Antioxidant and nutritional potential of cookies enriched with *Spirulina platensis* and sources of fibre. *Journal of Food and Nutrition Research*, 53(2), 171-179.

Erdoğan, S. S. (2010). Elma posası tozunun antioksidan aktivitesi ile fenolik bileşenlerinin belirlenerek ekmek yapımında kullanım olanaklarının araştırılması (*Yüksek Lisans Tezi*, Namık Kemal Üniversitesi).

Ertaş, N., & Aslan, M. (2020). A study on the potential of using melon wastes in biscuit production. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 23(5), 1216-1224.

Eshak, N. S. (2016). Sensory evaluation and nutritional value of balady flat bread supplemented with banana peels as a natural source of dietary fiber. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 229-235.

Field, M.S., Mithra, P., Estevez, D., & Peña-Rosas, J.P. (2020). Wheat flour fortification with iron for reducing anaemia and improving iron status in populations. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (7).

Fradinho, P., Nunes, M. C., & Raymundo, A. (2015). Developing consumer acceptable biscuits enriched with *Psyllium fibre*. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4830-4840

Furkan Erdoğan, H. (2022). Antioksidanca zengin meyve ve sebze tozları ile fonksiyonel ekmek üretimi (*Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi).

Gamel, T. H., Wright, A. J., Pickard, M., & Abdel-Aal, E. S. M. (2020). Characterization of anthocyanin-containing purple wheat prototype products as functional foods with potential health benefits. *Cereal Chemistry*, 97(1), 34-38.

Gerçekaslan, K. E., & Hüseyin, B. O. Z. (2018). Keçiboynuzu unu ilavesinin kakaolu kekin fiziksel, duyuusal ve tekstürel özelliklerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(1), 95-101.

Gül, H., & Şen, H. (2017). Effects of rosehip seed flour on the rheological properties of bread dough. *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, 11, 330-335.

Hajas, L., Sipos, L., Csobod, É. C., Bálint, M. V., Juhász, R., & Benedek, C. (2022). Lentil (*Lens culinaris* Medik.) flour varieties as promising new ingredients for gluten-free cookies. *Foods*, 11(14), 2028

Hayta, M. Özüğür, G., Etgü, H., & Şeker, İ. T. (2012). Effect of grape (*Vitis vinifera* L.) pomace on the quality, total phenolic content and anti-radical activity of bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3), 980-986.

Henry, C. J. (2010). Functional foods. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64(7), 657-659.

Indiarto, R., Reni, R., Utama, G. L., Subroto, E., Pangawikan, A. D., & Djali, M. (2023). The physicochemical, antioxidant, and sensory properties of chocolate biscuits incorporated with encapsulated mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) peel extract. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 122-138.

İnce C. & Çağındı, Ö. (2020). Beyaz ve tam buğday unlu ekmek çeşitlerine eklenen beyaz dut (*Morus alba*) yaprak ve posasının antioksidan ve antidiyabetik aktivite üzerine etkisi. *Gıda*, 45(5), 977-988.

Isik, F., & Topkaya, C. (2016). Effects of tomato pomace supplementation on chemical and nutritional properties of crackers. *Italian Journal of Food Science*, 28(3), 525.

Issaoui, M., Nesrine, M., Flamini, G., & Delgado, A. (2021). Enrichment of white flour with spices positively impacts safety and consumer acceptance of bread. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(7), 3166-3178.

Kalkan, İ., & Özarık, B. (2017). Tam buğday ekmeği ve sağlık üzerine etkisi. *Aydın Gastronomy*, 1(1), 37-46.

Kandıralı, Ş. (2014). Özel bir sağlıklı beslenme ve diyet danışmanlığına başvuran danışanların fonksiyonel besinlere yönelik farkındalığı, bilgi düzeyleri ve tüketim sıklıklarının araştırılması. (*Yüksek Lisans Tezi*, Başkent Üniversitesi)

Kaur, S., & Das, M. (2011). Functional foods: an overview. *Food Science and Biotechnology*, 20(4), 861.

Kılıç, F. (2022). Köpük ve konvektif kurutma yöntemleri ile elde edilen balkabağı (*Cucurbita moschata*) tozlarının bisküvi ve kek üretiminde kullanım olanaklarının araştırılması (*Yüksek Lisans Tezi*, Necmettin Erbakan Üniversitesi).

Koyuncu, B., Demir, M. K., & Olcay, N. (2021). Farklı kurutma metotları ile elde edilen hünnap (*Zizyphus jujuba*) meyve tozlarının bisküvi üretiminde kullanım olanakları. *Gıda*, 46(5), 1158-1170.

Köten, M., & Ünsal, A. S. (2021). Mısır unu ilavesinin pandispanya tipi keklerin morfojeometrik, fonksiyonel ve tekstürel özelliklerine etkisi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 25(2), 172-184.

Krystyan, M., Gumul, D., & Adamczyk, G. (2022). The effect of milk thistle (*Silybum marianum* L.) fortification, rich in dietary fibre and antioxidants, on structure and physicochemical properties of biscuits. *Applied Sciences*, 12(23), 12501.

Lafarga, T., Gallagher, E., Bademunt, A., Bobo, G., Echeverria, G., Viñas, I., & Aguiló-Aguayo, I. (2019). Physicochemical and nutritional characteristics, bioaccessibility and sensory acceptance of baked crackers containing broccoli co-products. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(3), 634-640.

Lattimer, J. M., & Haub, M. D. (2010). Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients*, 2(12), 1266-1289.

Lazarte, C. E., Carlsson, N. G., Almgren, A., Sandberg, A. S., & Granfeldt, Y. (2015). Phytate, zinc, iron and calcium content of common Bolivian food, and implications for mineral bioavailability. *Journal of Food Composition and Analysis*, 39, 111-119.

Lekjing S., & Venkatachalam K. (2019). Influences of storage time and temperature on sensory and measured quality of green gram savory crackers, *LWT – Food Science and Technology*, 113, 108310.

Lin, J., & Zhou, W. (2018). Role of quercetin in the physicochemical properties, antioxidant and antiglycation activities of bread. *Journal of Functional Foods*, 40, 299-306.

Lu, T. M., Lee, C. C., Mau, J. L., & Lin, S. D. (2010). Quality and antioxidant property of green tea sponge cake. *Food Chemistry*, 119(3), 1090-1095.

Makki, K., Deehan, E. C., Walter, J., & Bäckhed, F. (2018). The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease. *Cell host & microbe*, 23(6), 705-715.

Malhotra, N., Sharma, S., Sahni, P., Singh, B., & Sharma, S. P. (2022). Nutritional composition, techno-functionality, in-vitro starch digestibility, structural characteristics and storage stability of sweet potato flour and mash supplemented specialty pasta. *LWT – Food Science and Technology*, 168, 113886.

Marchetti, N., Bonetti, G., Brandolini, V., Cavazzini, A., Maietti, A., Meca, G., & Mañes, J. (2018). Stinging nettle (*Urtica dioica* L.) as a functional food additive in egg pasta: enrichment and bioaccessibility of lutein and **β -carotene**. *Journal of Functional Foods*, 47, 547-553.

Meral, R. & Doğan, İ. S. (2012). Karadut (*Morus nigra*) katkılı ekmeğin antioksidan aktivitesi ve fenolik kompozisyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2(4), 43-48.

Meral, R., & Doğan, İ. S. (2009). Fonksiyonel öneme sahip doğal bileşenlerin unlu mamullerin üretiminde kullanımı, *Gıda*, 34 (3), 193-194.

Minarovičová, L., Lauková, M., Karovičová, J., & Kohajdová, Z. (2018). Utilization of pumpkin powder in baked rolls. *Potravinárstvo*, 12(1), 195-201.

Mir S. A., Bosco S.J.D., Shah M.A., Santhalakshmy S., & Mir M.M. (2017). Effect of apple pomace on quality characteristics of brown rice based cracker. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16 (1), **25-32**.

Mofor, A. J., Ejoh, A. R., & Noumo-Ngangmou, T. (2023). Effects of ginseng powder on chemical composition, antioxidant and sensory properties of biscuits. *Food Health*, 5(1), 1.

Najjar, Z., Kizhakkayil, J., Shakoor, H., Platat, C., Stathopoulos, C., & Ranasinghe, M. (2022). Antioxidant potential of cookies formulated with date seed powder. *Foods*, 11(3), 448.

Ojha, P., & Thapa, S. (2017). Quality evaluation of biscuit incorporated with mandarin peel powder. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 18(1), 19.

Olcay, N., & Demir, M. K. (2020). The usage possibilities of kumquat fruit dried by different techniques in the production of biscuits. *Electronic Letters on Science and Engineering*, 16(2), 108-120.

O'shea, N., Ktenioudaki, A., Smyth, T. P., McLoughlin, P., Doran, L., Auty, M. A. E., ... & Gallagher, E. (2015). Physicochemical assessment of two fruit by-products as functional ingredients: Apple and orange pomace. *Journal of Food Engineering*, 153, 89-95.

Olson, R., Gavin-Smith, B., Ferraboschi, C., & Kraemer, K. (2021). Food fortification: The advantages, disadvantages and lessons from sight and life programs. *Nutrients*, 13(4), 1118.

Onur, M. & Cömert, M. (2017). Mutfak akademilerinde eğitim alanların fonksiyonel gıdalar hakkındaki bilgi düzeyleri. *Journal of Recreation and Tourism Research*, 4 (1), 121-135.

Osendarp, S.J.M., Martínez, H., Garrett, G.S., Neufeld, L., de Regil, L., Vossenaar, M., & Darnton-Hill, I. (2018). Large-scale food fortification and biofortification in low- and middle-income countries: a review of programs, trends, challenges, and evidence gaps. *Food and Nutrition Bulletin*, 39, 315–331.

Özcan, M. M. (2022). The effect of ginger (*Zingiber officinale*) powders at different concentrations on bioactive compounds, antioxidant activity, phenolic constituents, nutrients and sensory characteristics of wheat bread. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100532.

Paciulli, M., Grimaldi, M., Rinaldi, M., Cavazza, A., Flamminii, F., Di Mattia, C., ... & Chiavaro, E. (2023). Microencapsulated olive leaf extract enhances physicochemical stability of biscuits. *Future Foods*, 7, 100209.

Pekmez, H., & Yılmaz, B. B. (2018). Quality and antioxidant properties of black carrot (*Daucus carota* ssp. *sativus* var. *atrorubens* Alef.) fiber fortified flat bread (Gaziantep Pita). *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 8, 522-529.

Pellegrini N, Miglio C, & Del Rio D. (2009). Effect of domestic cooking methods on the total antioxidant capacity of vegetables. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 60 (2), 12–22.

Quiros-Sauceda, A.E., Palafox-Carlos, H., Syago-Ayerdi, S.G., Ayala-Zavala, J.F., Bello-Perez, L.A., Lvarez-Parrilla, E., de la Rosa L.A., González-Córdova A.F., & González-Aguilar G.A. (2014). Dietary fiber and phenolic compounds as functional ingredients: Interaction and possible effect after ingestion. *Food & Function*, 5(6), 1063-1072.

Rahaie, S., Gharibzahedi, S.M.T., Razavi, S.H., & Jafari, S.M. (2012). Recent developments on new formulations based on nutrient-dense ingredients

for the production of healthy-functional bread: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11), 2896-2906.

Ranaweera, R. K. S., & Gunathilake, K. P. P. (2022). Physicochemical characteristics and functional properties of *Caryota urens* flour and formulated gluten-free crackers. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(7), 16715.

Robles-Ramirez, M.D.C., Ortega-Robles, E., Monterrubio-López, R., Mora-Escobedo, R., & Beltran-Orozco, M. (2020). Barley bread with improved sensory and antioxidant properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 22, 100279.

Radočaj, O., Dimić, E., & Tsao, R. (2014). Effects of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil press-cake and decaffeinated green tea leaves (*Camellia sinensis*) on functional characteristics of gluten-free crackers. *Journal of Food Science*, 79(3), 318-325.

Romankiewicz, D., Hassoon, W. H., Cacak-Pietrzak, G., Sobczyk, M., Wirkowska-Wojdyła, M., Ceglińska, A., & Dziki, D. (2017). The effect of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) addition on quality and nutritional value of wheat bread. *Journal of Food Quality*, 1-7.

Sabuncu, M. (2019). Farklı turp (*Raphanus sativus* l.) tiplerinin antioksidan kapasite ve biyoalınabilirliklerini belirlenmesi. (*Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ University).

Savlak, N., Taşkın, B., Çelik, B., Kumru, F., & Kiyak, S. (2020). A new look at waste utilization; use of artichoke (*Cynara scolymus* L.) leaves in the production of functional crackers. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(2), 358-364.

Sevilmiş, G. (2013). Yükselen Trend: Fonksiyonel Gıdalar. *Ar&Ge Bülten 2013 Haziran – Sektörel, İzmir Ticaret Odası*, 39-46.

Sharma, R., Dar, B. N., Sharma, S., & Singh, B. (2021). In vitro digestibility, cooking quality, bio-functional composition, and sensory properties of pasta incorporated with potato and pigeonpea flour. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 23, 100300.

Shobeiri, M., Elhami Rad, A. H., Sheikholeslami, Z., Zenzian, M. S., & Saeedi Asl, M. R. (2023). The effects of quinoa and okra incorporation on the quality of diet cake. *Food Science and Technology International*, 29(4), 417-427.

Soares, I. D., Cirilo, M. E. M., Junqueira, I. G., Vanin, F. M., & Rodrigues, C. E. D. C. (2023). Production of cookies enriched with bioactive compounds

through the partial replacement of wheat flour by cocoa bean shells. *Foods*, 12(3), 436.

Sokmen, O., Ozdemir, S., Dundar, A. N., & Cinar, A. (2022). Quality properties and bioactive compounds of reduced-fat cookies with bee pollen. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 29, 100557

Su, X., F. Wu, Y. Zhang, N. Yang, F. Chen, Z. Jin and X. Xu. (2019). Effect of organic acids on bread quality improvement. *Food Chemistry*, 278, 267-275.

Şahin, O. I. (2020). Functional and sensorial properties of cookies enriched with Spirulina and Dunaliella biomass. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 3639-3646.

Tomić, J., Škrobot, D., Popović, L., Dapčević-Hadnađev, T., Čakarević, J., Maravić, N., & Hadnađev, M. (2022). Gluten-free crackers based on chickpea and pumpkin seed press cake flour: Nutritional, functional and sensory properties. *Food Technology and Biotechnology*, 60(4), 488-498.

Turfani, V., Narducci, V., Durazzo, A., Galli, V., & Carcea, M. (2017). Technological, nutritional and functional properties of wheat bread enriched with lentil or carob flours. *LWT – Food Science and Technology*, 78, 361-366.

Türkmen, N., & Gürsoy, A. (2017). Fonksiyonel Dondurma. *Academic Food Journal/Akademik Gıda*, 15(4), 386-395.

Ulutürk, Ş. (2018). İncir çekirdeği unu kullanarak glutenli ve glutensiz bisküvi üretimi. (*Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi)

Venkatachalam, K., & Nagarajan, M. (2017). Physicochemical and sensory properties of savory crackers incorporating green gram flour to partially or wholly replace wheat flour. *Italian Journal of Food Science*, 29(4).

Verardo, V., Glicerina, V., Cocci, E., Frenich, A. G., Romani, S., & Caboni, M. F. (2018). Determination of free and bound phenolic compounds and their antioxidant activity in buckwheat bread loaf, crust and crumb. *LWT – Food Science and Technology*, 87, 217-224.

Wahyono, A., Dewi, A.C., Oktavia, S., Jamilah, S., & Kang, W.W. (2020). Antioxidant activity and total phenolic contents of bread enriched with pumpkin flour. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411,1, 1-8.

Wandersleben, T., Morales, E., Burgos-Díaz, C., Barahona, T., Labra, E., Rubilar, M., & Salvo-Garrido, H. (2018). Enhancement of functional and nutritional properties of bread using a mix of natural ingredients from novel varieties of flaxseed and lupine. *LWT – Food Science and Technology*, 91, 48-54.

Xie, F., Wang, Y., Wu, J., & Wang, Z. (2016). Functional properties and morphological characters of soluble dietary fibers in different edible parts of *Angelica keiskei*. *Journal of Food Science*, 81(9), 2189-2198.

Xu, X., Luo, Z., Yang, Q., Xiao, Z., ve Lu, X. (2019). Effect of Quinoa Flour on Baking Performance, Antioxidant Properties and Digestibility of wheat Bread. *Food Chemistry*, 294, 87-95.

Yıldız, E. (2022). *Hibiskus sabdariffa* L. ile zenginleştirilmiş pandispanya kekinin fizikokimyasal ve duyuusal özelliklerinin incelenmesi (*Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Gelişim Üniversitesi).

Yılmaz Tuncel, N., Kaya, E., & Karaman, M. (2017). Rice bran substituted Turkish noodles (erişte): textural, sensorial, and nutritional properties. *Cereal Chemistry*, 94(5), 903-908.

Yılmaz, E., & Karaman, E. (2017). Functional crackers: incorporation of the dietary fibers extracted from citrus seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 3208-3217.

Zhang, Y., Ruan, C., Cheng, Z., Zhou, Y., & Liang, J. (2019). Mixolab Behavior, Quality Attributes and Antioxidant Capacity of Breads Incorporated with *Agaricus bisporus*. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3921-3929.

BÖLÜM V

METAL MATRİSE SAHİP KOMPOZİTLERDE İNFİLTRASYON YÖNTEMİ

Infiltration Method of Metal Matrix Composites

İsmail KAYABAŞI

(Öğr. Gör. Dr.), Kastamonu Üniversitesi,

Küre Meslek Yüksekokulu,

Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü,

Küre, Kastamonu, Türkiye,

e-mail: ikayabasi@kastamonu.edu.tr,

ORCID: 0000-0001-8615-7807

1. Giriş

A lışıl gelmiş metal ve alaşımların birçok özelliği mühendislik alanında meydana gelen ilerlemeler sonucunda ortaya çıkan gereksinimleri karşılayamamaktadır. Bu gereksinimlerin karşılanması amacıyla eşsiz özelliklere sahip kompozit malzemeler imal edilmiş ve bu malzemelerde süratli bir ilerleme yaşanmıştır. Kompozit malzemelerin geçmişi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Arkeologlar Mısır’da yaptıkları çalışmada laminasyon yapılmış tahta çubukları ortaya çıkarmışlar ve M.Ö. 2800 yıllarına ait olduğunu tespit etmişlerdir. Orta Doğu’da ok yaylarından daha yüksek eğilme dayanımı sağlamak için farklı lif yönlerini bir araya getirerek malzemeler üst üste yerleştirilmiştir. Orta Çağ Avrupa’sında farklı tabakalı malzemelerin bir araya getirilmesiyle ok başı yapılmıştır. Kompozit malzemelerle alışıl gelmiş malzemeler kıyaslandığında en belirleyici husus sağlamlık ve hafifliktir. Kompozit malzemeler genel olarak otomotiv, inşaat, havacılık, makine, uzay ve denizcilik alanlarında kullanılmaktadır (Ateş & Kızılok, 2011; Şimşek, Yıldırım, Özyürek, & Şimşek, 2019).

Kompozit malzemeler takviye elemanını dış etkilerden koruyan, ona uygulanan kuvveti takviye elemanına aktaran matris fazından ve kendine aktarılan

kuvveti taşıyan takviye elemanı fazından meydana gelir. Kompozit malzemeler için çeşitli biçimlerde sınıflandırma işlemi yapılır. Matris malzemesine göre kompozitler; seramik matrise sahip kompozitler, polimer matrise sahip kompozitler ve metal matrise sahip kompozitler olarak sınıflandırılabilir. Talep edilen ihtiyaçları kendi kendine karşılayamayan metal malzemelere takviye elemanı ilave edilerek elde edilen kompozitlere metal matrise sahip kompozitler denir(Gündoğan & Özsarı, 2019; Salur et al., 2020).Yüksek mukavemet, yüksek tokluk, yüksek sıcaklık ve termal şoklar karşısında düşük duyarlılık, şekillendirilebilme, aşınmaya karşı dayanım gibi özellikleri sayesinde metal matrise sahip kompozitler çok çeşitli uygulamalarda tercih edilmektedir(Salur et al., 2020; Uygur & Saruhan, 2004). Metal matrise sahip kompozit malzemelerde Al, Mg, Ti, Cu, Co, Fe, Ni gibi metaller ve onların alaşımları başlıca kullanılan matris malzemeleridir. Metal matrise sahip kompozitlerde yaygın olarak kullanılan başlıca takviye elemanları ise B_4C , SiC , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO ve TiB_2 refrakter ve seramik malzemelerdir (Pul, Çalın, Çıtak, & Seker, 2009).

Metal matrise sahip kompozitler için çok çeşitli üretim yöntemleri vardır. Bunlardan öncelikli olarak kullanılan üretim yöntemleri döküm, toz metalürjisi ve infiltrasyondur. Son şekle yakın parça imal edilmesi, imal edilen parçanın yüksek yüzey kalitesine sahip olması ve verimli bir yöntem olması infiltrasyon metodunun önemli üstünlüklerindedir. Belirli bir şekle sahip olan takviye elemanının bir kalıbın içine yerleştirilerek sıvı metalin emdirilmesi işlemine infiltrasyon denilmektedir. İnfiltrasyon metodu vakumlu, basınçlı ve basınçsız olmak üzere üçe ayrılmaktadır(Duran, 2019; Gündoğan & Özsarı, 2019; Özsarı, 2018; Pul, 2010).

2. Kompozit Malzemeler

Son yıllarda mühendislik alanında tasarım yaparken hafiflik, tokluk, düşük maliyet gibi ölçütler kullanılacak malzeme için önem arz etmektedir. Geleneksel malzemeler bu talepleri karşılamakta yetersiz olduğundan dolayı üstün niteliklere sahip olan kompozit malzemelerde araştırma ve geliştirme süreci hızlanmıştır(Kerti, 2019). Kompozit malzemelerin kesin kabul edilmiş bir tanımlaması olmamasına rağmen kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirinden farklı en az iki malzemenin istenen özellikleri elde etmek için veya belirli özelliklerini geliştirmek için makro düzeyde bir araya getirilmesi olarak tanımlanabilir(Kayabaşı, 2022; Sur, 2008). Kompozit malzemelerin imal edilmesiyle hedeflenen rijitlik, çekme dayanımı, çarpma dayanımı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yorulma dayanımı, ağırlık, mekanik dayanım,

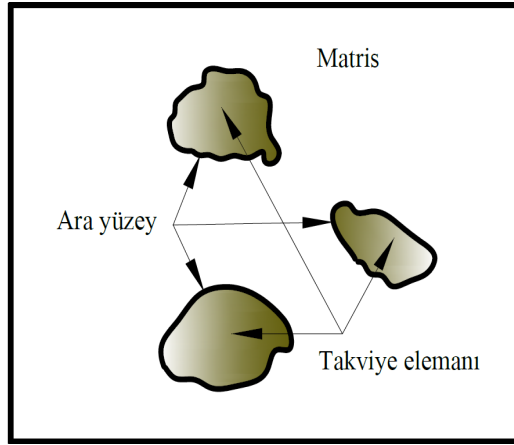
korozyona karşı direnç, aşınmaya karşı direnç, yüksek sıcaklığa karşı direnç, görünüm, akustik iletkenlik, ısı iletkenliği ve ses yutuculuğu gibi niteliklerinden bazılarının uygulamada geliştirilmesidir (Ateş, 2011).

Kompozit malzeme temelde üç unsurdan meydana gelir. Bunlar matris, takviye elemanı ve ara yüzey bağıdır. Parçacık takviyeli kompozite ait yapılar Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu unsurların kompozit malzemede üstlendikleri görevler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kayabaşı, 2022; Sur, 2008).

- Matrisin görevleri ara yüzey bağı sayesinde üzerine uygulanan herhangi bir yükü deformasyona uğramadan takviye elemanına aktararak dağıtmak, arzu edilen malzeme şeklini korumak ve takviye elemanını dış etkilere muhafaza ederek bir arada kalmasını sağlamaktır.

- Takviye elemanın görevleri matrisin kendisine aktardığı yükü bölüşmek ve bu yüke karşı direnmek, matrisin tane büyüklüğünü üretim sırasında denetlemek ve tane sınırında meydana gelen hareket oluşumuna mani olmaktır.

- Ara yüzey bağının görevleri ise matris ile takviye elemanının birleşmesini sağlamak, matrisin üzerine etki eden yükü takviye elemanına herhangi bir hasar ve kırılmaya meydan vermeden iletmektir.

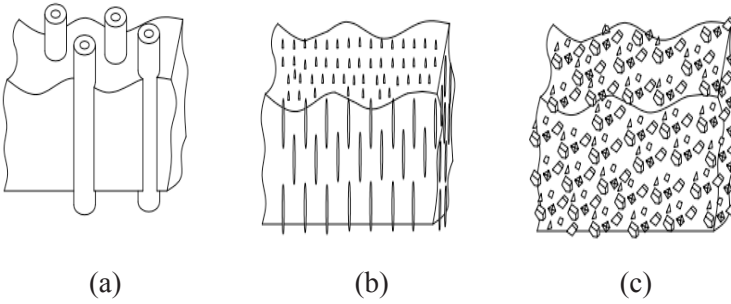


Şekil 1: Parçacık takviyeli kompozitin yapısı (Kayabaşı, 2016)

Kompozit malzemeler takviye elemanı şekline göre ve matris malzemesinin türüne göre gruplara ayrılabilir. Takviye elemanının şekline göre kompozit malzemeler aşağıda belirtilen maddeler halinde sınıflandırılabilir (Farid Ahmadinia, 2019; Kayabaşı, 2022).

- Parçacık takviye elemana sahip kompozitler
- Kılcal kristal takviye elemana sahip kompozitler
- Plaka takviye elemana sahip kompozitler
- Elyaf (fiber) takviye elemana sahip kompozitler
- Karma takviye elemana sahip kompozitler

Şekil 2’de takviye elemanı şekline göre kompozitlerin şematik gösterimi yapılmıştır.



Şekil 2: Takviye elemanı şekline göre kompozitlerin şematik gösterimi

a) Elyaf takviye elemana sahip kompozitler b) Kılcal kristal takviye elemana sahip kompozitler c) Parçacık takviye elemana sahip kompozitler (Sur, 2008)

Matris malzemesinin türüne göre kompozit malzemeler aşağıda belirtilen maddeler halinde sınıflandırılabilir (Farid Ahmadinia, 2019; Kayabaşı, 2022).

- Seramik matrise sahip kompozitler
- Polimer matrise sahip kompozitler
- Cam matrise sahip kompozitler
- İntermetalik matrise sahip kompozitler
- Karbon matrise sahip kompozitler
- Metal matrise sahip kompozitler

2.1. Metal Matrise Sahip Kompozitler

Metal matrise sahip kompozitler pistonlar, rotorlar, frenler, rotlar gibi otomotiv parçalarında, elektronik aletlerde, nükleer kaplarda, robotik ve taşıma alanlarında, havacılık alanında ve uçak parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Önal, 2010). Kompoziti oluşturan ana faz malzemesi metal matrisli ise buna metal matrise sahip kompozit denir (Şap, 2022).

Metal matrise sahip kompozitleri meydana getiren ana faz metal, takviye elemanı ise organik veya seramiktir (Şenel, 2015). Tok ve sünek özelliğe sahip metal matris malzemenin ve mükemmel mukavemet özellikleri gösteren seramik takviye elemanının birleştirilmesi ile metal matrise sahip kompozitler elde edilir. Metal matrise sahip kompozitlerin aşınmaya karşı direncinin yüksek olması ve düşük yoğunluğa sahip olması önemli özellikleri arasındadır. Metal matrise sahip kompozitlerde genellikle tercih edilen matris malzemeleri alüminyum, magnezyum nikel, titanyum, bakır ve süper alaşımlar (Ni ve Fe esaslı) gibi metal malzemelerdir (Şap, 2022; Uygur & Saruhan, 2004).

Metal matrise sahip kompozitlerin takviye elemanı şekli kılcal kristal, fiber ve partikül gibi çok çeşitli olabilir. Genel olarak endüstriyel alanda partikül şekline sahip takviye elemanı tercih edilir. Bu durumun en önemli sebebi uzun fiber takviye elemanlarına göre partikül takviye elemanlarının daha kolay imal edilmesi ve imal edilen kompozit malzemenin yapı özelliklerinin yöne bağımlı olmamasıdır (Kalemtaş, 2014).

Kompozit malzemelerde arzu edilen özelliklere göre fiber kılcal kristal ve partikül gibi çeşitli formlarda bor karbür (B_4C), molibden (Mo), silisyum karbür (SiC), titanyum nitrür (TiN), alüminyum nitrür (AlN), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum nitrür (Si_3N_4), wolfram (W), titanyum diborür (TiB_2), bor (B) ve grafit gibi çeşitli takviye elemanları kullanılmaktadır (Kalemtaş, 2014).

Metal Matrisli kompozitlerin takviye elemanı içermeyen metal malzemelere göre üstün yanları vardır. Metal matrisli kompozitlerin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Kayabaşı, 2016; Şap, 2022).

- Metal matrise sahip kompozit malzemeler başka metalik yapıya sahip malzemelerle kıyaslanırsa daha yüksek dayanım ve esnekliğe sahiptir.
- Metal matrise sahip kompozit malzemeler yüksek kırılma tokluğuna sahip olmalarını yüksek sünekliğe borçludur. Bu sebeple yüksek çapma kırılma enerjisini sönmüleyebilirler.
- Metal matrise sahip kompozit malzemelerin ısı iletkenliği genel olarak başka kompozitlere göre daha yüksektir.
- Kısa elyaf ve partikül şekline sahip takviye elemanları ile takviye edilen metal matrisli kompozit malzemelerin içinde plastik deformasyon görülürse bu malzemeler daha da güçlendirilmiş olur.
- Metal matrise sahip kompozitlerin elektrik iletkenliği iyidir.
- Yumuşak matrise sahip metal matrisli kompozitler yüksek sertliğe sahip seramik partiküllerle takviye olursa iyi aşınma direnci gösterirler.
- Metal matrise sahip kompozitlerin ısı iletkenliği düşüktür.

Metal matrise sahip kompozit malzemelerin avantajları yanı sıra çok azda olsa çeşitli olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Bu olumsuz özellikler aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Kalemtaş, 2014).

- Metal matrise sahip kompozitlerin diğer kompozitlere göre üretim maliyetleri yüksektir. Çünkü üretim için kullanılan teçhizat ve sistemlerin maliyeti fazladır.
- Metal matrise sahip kompozitlerin metal malzemelere göre sünekliği daha azdır.
- Metal matrise sahip kompozitler yeni gelişim gösteren malzeme grubunda yer almasından dolayı imalatçı ve firmaların bilgi birikimi metal malzemelere göre daha azdır.
- Sürekli fiber takviye elemanına sahip metal matrisli kompozitlerin üretim süreçleri karmaşık ve zordur.

Metal matrise sahip kompozit malzemelerin imalatı için çok çeşitli üretim metodlarından faydalanılmaktadır. Bu faydalanılan üretim metodları katı, katı-sıvı ve sıvı hal olmak üzere üç ana sınıfta isimlendirilmektedir. Her bir üretim metodunun bir başkasına göre sağladığı avantaj ve dezavantaj vardır. Sıvı hal üretim metodunu diğer üretim metodlarından ayıran en önemli yanları hammadde ve ilk yatırım maliyetlerinin az olması, birim kompozit üretim maliyetinin az olmasıdır. Metal matrise sahip kompozitlerin sıvı hal üretim yöntemlerinden biriside infiltrasyon (iç sızma) yöntemidir (Sur & Kayabaşı, 2019).

2.1.1. İnfiltrasyon (iç sızma) Yöntemi

Mühendislik alanında ve tabiatta infiltrasyon yöntemi kendini çok çeşitli yöntemlerle göstermektedir. Gözenekli kayaç içinden petrol çıkarılması, süngerin yağmur damlalarıyla ıslanıp suyla dolması infiltrasyonun sonuçlarındandır (Okur, 2016).

Metal matrise sahip kompozitlerin imal edilmesinde yaygın olarak faydalanılan sıvı hal üretim metodlarından birisi de infiltrasyon (iç sızma) metodudur. İnfiltrasyon yöntemi üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir ve aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Molina-Jorda, Schneider, & Mortensen, 2022; Pul, 2010).

- Vakumlu infiltrasyon
- Basıncılı infiltrasyon
- Basıncısız infiltrasyon

İnfiltrasyon hazırlama işlemi önceden yapılmış ve bir kalıbının içine yerleştirilen belirli formdaki takviye elemanına sıvı metalin emdirilmesiyle gerçekleştirilen işlemidir. Sıvı metalin gözenekli takviye elemanına emdirilmesi vakum veya basınç altında meydana gelebilir. Dahası dışarıdan hiçbir müdahaleye gerek kalmaksızın sıvı metal damlacıkları katı takviye elemanını ıslattığı an gözenekli yapı içinde kendiliğinden infiltrasyon gerçekleşebilir. Genellikle infiltrasyon yönteminde kullanılan takviye elemanı seramik esastır (Özsarı, 2018; Pul, 2010).

Gözenekli yapıya sahip takviye elemanı içine sıvı metal matrisin emdirilmesi yüzeye sızma prensibine ve kılcallık etkisiyle ilişkilidir. Genel olarak metal oksitlerin metallerle temas açısı 90° 'nin üstündedir. Bu nedenle katı takviye elemanı pürüzlü yüzeylerini ve takviye elemanları arasındaki kılcal boşlukları sıvı metalle ıslatabilmek için dış basınç uygulanması gereklidir (Karademir, 2013).

$$\Delta P = \frac{-2D_f}{r} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de;

$$D_f = \gamma_{sb} \cos \theta^A$$

r = Kılcallık yarıçapıdır.

Eşitlik 2'de Liplike eşitliğinden faydalanılarak infiltrasyon için zaruri basınç verilmiştir.

$$\Delta P = \frac{2\gamma_{sb} \cos \theta}{r} \quad (2)$$

Eşitlik 3'te takviye elemanı tozlarının belirli hacim oranlarında sıkıştırılarak elde edilen kütlenin içine sıvı metalin emdirilmesi için gerekli matematiksel ifade verilmiştir (Karademir, 2013).

$$\Delta P = \frac{6\lambda\gamma_{sb} \cos \theta(1-w)}{d.w} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te;

ΔP = İnfiltrasyonun meydana gelebilmesi için zaruri eşik basınç

λ = Geometri faktörü

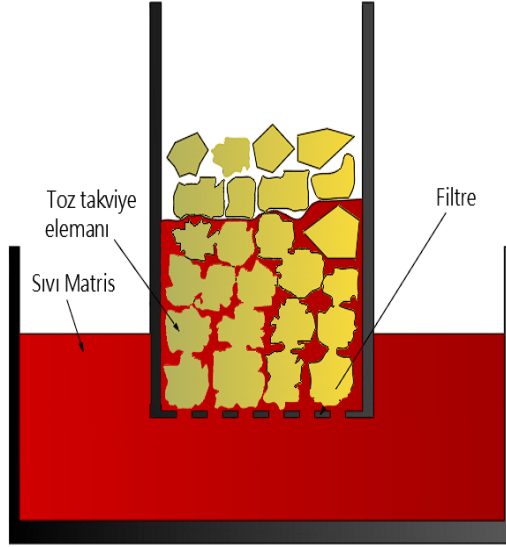
w = Takviye elemanındaki gözenek oranı

d = Parçacığın ortalama çapı

γ_{sb} = Sıvı-buhar yüzey gerilimi

θ = Takviye elemanı ile sıvı matris arasında meydana gelen temas açısı

Sıvı matrisin parçacık şekline sahip ve gözenekli yapı oluşturan takviye elemanlarının kılcal boşluklardaki hareketi Şekil 3'te gösterilmiştir(Özsarı, 2018).



Şekil 3: Sıvı matrisin parçacık şekline sahip ve gözenekli yapı oluşturan takviye elemanlarının kılcal boşluklardaki hareketi(Özsarı, 2018)

İnfiltrasyon yönteminin sağladığı olumlu özellikler vardır ve bunlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır(Duran, 2019).

- İnfiltrasyon yöntemi ile imal edilen malzemelerin yüzey kalitesi yüksektir.
- İnfiltrasyon yöntemi ile imal edilen parçalar son şekline yakındır.
- İnfiltrasyon yöntemi verimlidir.

İnfiltrasyon yönteminin sağladığı olumlu özelliklerin yanı sıra bazı olumsuz özellikler de vardır ve bunlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Duran, 2019).

- İnfiltrasyon yönteminde fiber takviye elemanının sıvı matris içinde homojen olarak dağılımı istenen ölçüde olamaz.
- İnfiltrasyon yönteminde sıvı matris takviye elemanı içindeki çok ufak olan boşluklara istenen ölçüde nüfuz edemez.

2.1.1.1.1 Vakumlu İnfiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon metodunda motor bloğu, silindir gömlekleri, ve piston gibi otomobillerde kullanılan kompleks şekilli parça preformlarının yüksek basınca tabi tutulması nedeni ile deformasyon meydana gelmektedir. Bunun önüne geçebilmek amacıyla vakumlu infiltrasyon metodu geliştirilmiştir. Vakumlu infiltrasyon yüksek mukavemete ve kaliteye sahip parçaların yarı otonom şekilde üretimi ile birlikte üretim maliyetlerinin azaltılmasını mümkün kılar (Okur, 2016).

Vakumlu infiltrasyon metodunda gözenekli yapıya sahip takviye elemanına sıvı matrisin infiltre edilebilmesi için negatif basınç kullanılır. Negatif basınç takviye elemanının sıvı matrisle iyi ıslatılabilmesi için bir itki kuvveti meydana getirmektedir. Bu sayede preformun içindeki gözeneklere vakumla birlikte sıvı metal infiltrasyonu gerçekleşebilmektedir. İnfiltrasyonun iyi bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için ıslatılabilirlik önemlidir. Eğer ıslatılabilirliği mükemmel hale getirmek istiyorsak temas açısının 0° olması sağlanmalıdır (Birsen, 2022).

Şekil 4'te vakumlu infiltrasyonun şematik görünümü verilmiştir. Vakumlu infiltrasyon yönteminde aşağıda belirtilen adımlar izlenir (Pul et al., 2009).

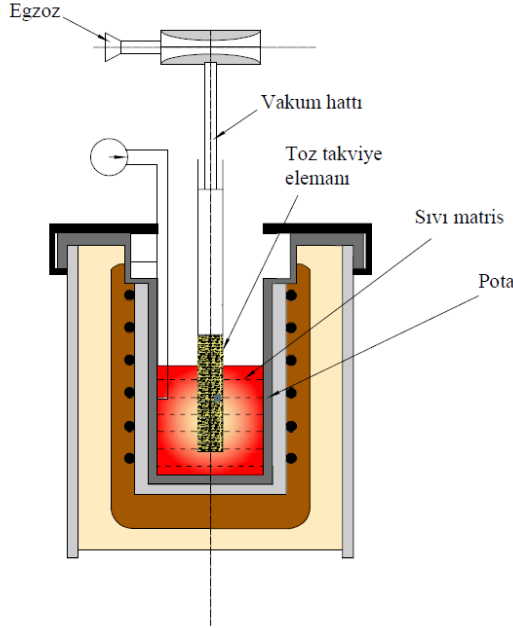
- Paslanmaz borunun içine gözenekli takviye elemanı preformu konur. Toz takviye elemanının paslanmaz borunun içinden dökülmesine engel olmak amacıyla paslanmaz borunun altına filtre elemanı yerleştirilir. Toz takviye elemanının vakum esnasında yukarı çıkmasını engellemek için üst tarafına da filtre elemanı yerleştirilir.

- Ergitilen sıvı matris vakum etkisinden faydalanılarak gözeneğe sahip takviye elemanı preformuna emdirme işlemi gerçekleştirilir.

- Gözeneğe sahip takviye elemanı sıvı matrisi bütünüyle infiltre edince katılaşması beklenir.

- Katılaştıran kompozit malzeme çelik borudan dışarı çıkartılır.

Vakumlu infiltrasyon metodu son derece ekonomik ve de kolaydır (Ateş, 2011).



Şekil 4: Vakumlu infiltrasyonun şematik görünümü (Pul, 2010)

2.1.1.2. Basınçlı İnfiltrasyon

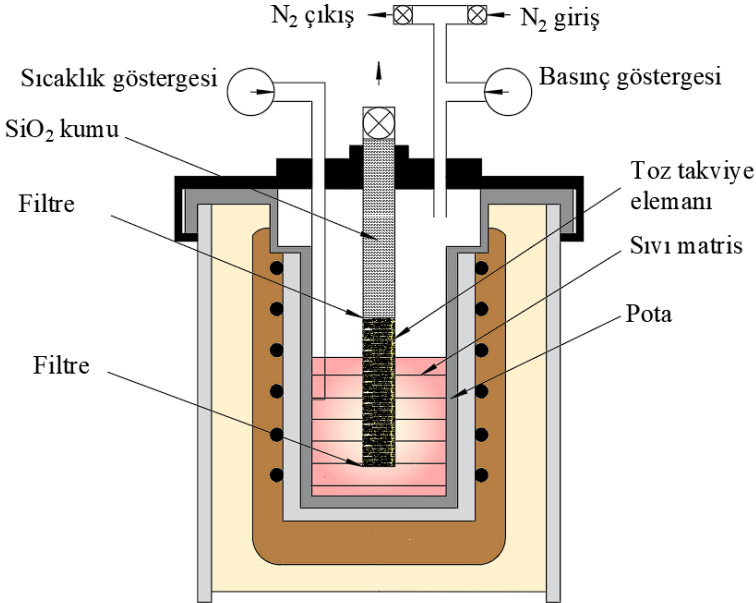
Basınsız infiltrasyon metodunun basınçlı infiltrasyon metoduna göre bir sürü olumlu yönü bulunmaktadır. Ancak seramik takviye elemanı partiküllerinin sıvı matris tarafından ıslatılabilme sorunları vardır. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla basınçlı infiltrasyon metodundan faydalanılır (Çevik, 2015).

İnert gaz basıncından faydalanılarak takviye elemanını barındıran gözenekli preformun içine sıvı matrisin emdirilmesi işlemine basınçlı infiltrasyon metodu denilir. Basınçlı infiltrasyon metodunda basınçlı inert gaz ile sıvı matris önceden şekil verilmiş blok halindeki parça veya yatağa gönderilerek kompozit malzemeler elde edilir (Ateş, 2011). Basınçlı infiltrasyon metodunun şematik görünümü Şekil 5'te verilmiştir.

Basınçlı infiltrasyon metodu ile basınç ve sıcaklık parametreleri denetim altına alınabilir. Basınçlı infiltrasyon metodunun farklı kompozit üretim metodlarına göre alet ve takım giderleri daha azdır. Toz metalürjisi metodunda tozların karıştırılması, kalıbın içine yerleştirilmesi ve sinterleme gibi işlemler vakit kaybettirici ve maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajları vardır. Sıkıştırılmalı döküm metodunda ise imalat esnasında yüksek basınç kullanılmasından kaynaklı alet ve takım yıpranması söz konusudur. Bu durum

maliyetleri artırıcı etki yapar. Basınçlı infiltrasyon metodu bu iki yönetime göre avantajlıdır (Özsarı, 2018). Basınçlı infiltrasyon metodunun avantajları aşağıda sıralanmıştır (Çevik, 2015).

- Basınçlı infiltrasyon metodu ile hızlı üretim yapılabilir.
- Basınçlı infiltrasyon metodu ile son şekle yakın üretim yapılabilir.
- Basınçlı infiltrasyon metodu katı faz imalat metodları ile kıyaslandığında düşük maliyete sahiptir.
- Takviye oranı yüksek kompozit malzeme üretiminde ortaya çıkan toplanma ve gözenek gibi sorunları basınçlı infiltrasyon metodu minimize eder.
- Basınç sayesinde infiltrasyon süratli gerçekleşmekte ve imalat zamanı kısalmaktadır. Böylece takviye elemanı ile sıvı matris arasında kimyasal reaksiyon riski azalmaktadır.
- Basınçlı infiltrasyon metodunda sıvı matrisin takviye elemanı preformuna infiltrasyonu daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Böylece takviye elemanı ile sıvı matris arasında kimyasal reaksiyon riski azalmaktadır.



Şekil 5: Basınçlı infiltrasyon metodunun şematik görünümü (Acılar & Gül, 2013)

Basınçlı infiltrasyon metodunda takviye elemanı ile sıvı matrisin birbirleriyle özdeşleştirilebilmesi için zorunlu olan basınç sıvı matrisin akmaya karşı gösterdiği direncin bir fonksiyonudur. Sıvı matrisin takviye elemanını

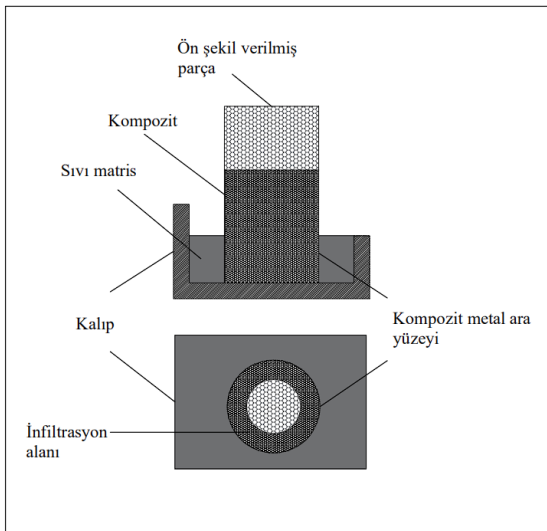
ıslatabilmesi aşağıda maddeler halinde verilen parametrelere bağlıdır(Karademir, 2013).

- Eriyik haline gelen sıvı matrise ait kimyasal bileşim
- Preform haline getirilmiş seramik malzeme
- Atmosfer basıncı
- Geçen zaman
- Yüzey şekli
- Seramik yüzeydeki işlemler
- Ara yüzeyde meydana gelen reaksiyonlar

2.1.1.3. Basınçsız İnfiltrasyon

Basınçsız infiltrasyon metodunun basınçlı infiltrasyon metodundan esas farkı takviye elemanına sıvı matrisin emdirilmesi için basınç kullanılmamasıdır. Basınçsız infiltrasyon metodunda kullanılan takviye elemanının iyi ıslatılabilirlik özelliğine sahip olması istenir(Birsen, 2022). İnfiltrasyonu azot atmosferinde gerçekleştirmek ve sıvı matris içine Mg ilavesi basınçsız infiltrasyon metodunu kolaylaştıran etmenlerdir. Sıvı alüminyum matris içine Mg ilavesi ile seramik takviye elemanı parçacıklarının ıslatılabilirliği iyileşir(Pul, 2010).

Basınçsız infiltrasyon metodunun şematik görünümü Şekil 6' da verilmiştir. Basınçsız infiltrasyon metodu azot atmosferinde sıvı metalin içine yerleştirilen ön şekil verilmiş blok parçaya sıvı metalin infiltre edilmesiyle gerçekleşmektedir (Çalın, 2006).



Şekil 6: Basınçsız infiltrasyon metodunun şematik görünümü (Çalın, 2006)

Basıncsız infiltrasyon metodunda imal edilecek parça son ölçüye yakın şekilde imal edilir. Basıncsız infiltrasyon metoduna etki eden değişkenler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Duran, 2019).

- Takviye elemanı hacim oranı
- Parçacık boyutları
- Sıcaklık
- Zaman
- Seramik takviye elemanının kaplanması
- Magnezyum içeriği

2.1.1.4. İnfiltasyonu Etkileyen Faktörler

2.1.1.4.1 Takviye Elemanı Tane Boyutu

İnfiltasyon metodunda kompozit malzemenin özelliklerine etki eden parametrelerden birisi de takviye elemanı tane boyutudur. İnfiltasyon metodunda kullanılacak toz takviye elemanı tane boyutu büyüdükçe takviye elemanları boşlukları arasına sıvı metal matrisin daha kolay infiltre edilmesi mümkün olmaktadır. Toz tanesinin büyümesi ile birlikte infiltasyon kalitesinde ve hızında artış görülür. İnfiltasyon metodunda toz tane büyümesi olumlu sonuç verir (Farid Ahmadinia, 2019).Metal matrise sahip kompozit malzemelerde yapılan çalışmalarda toz tane büyümesinin işlenebilirlik ve yüzey kalitesinde olumsuz etki gösterdiğini tespit etmişlerdir (Pul, 2010).

2.1.1.4.2 İnfiltasyon süresi

Talep edilen özelliklere sahip kompozit malzemenin üretilmesi, infiltasyonun bütünüyle yapılabilmesi ve ön şekil verilmiş blok halindeki takviye elemanının sıvı matris tarafından yeterince ısıtılabilmesi için kuluçka süresine ihtiyaç vardır. Takviye elemanı preformu ve sıvı matris kuluçka süresince belirli sıcaklıkta olmaları gerekmektedir. İnfiltasyon metodunda kuluçka süresi sıcaklığın değerine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca infiltasyon süresi infiltasyon metodunu etkileyen diğer parametrelere göre daha az önem taşımaktadır(Ateş, 2011; Farid Ahmadinia, 2019).

2.1.1.4.3 İnfiltasyon Sıcaklığı

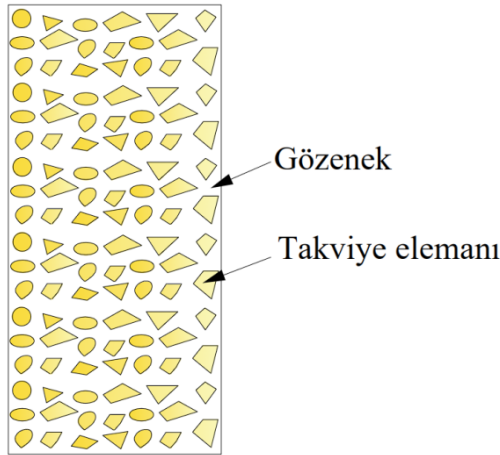
İnfiltasyon metodunda sıcaklık malzeme imalatını etkileyen en önemli parametreler arasında yer alır. İnfiltasyon işleminde sıcaklığın artması ile birlikte sıvı matrisin akıcılığı artacak ve sıvı matris kolayca takviye elemanı

taneleri arasında bulunan gözeneklere infiltre olacaktır (Taşcı, 2012). İnfiltrasyon metodunda infiltrasyon sıcaklığı; infiltrasyon mesafesini, infiltrasyon süresini ve sıvı matrisin takviye elemanını ıslatması gibi parametreleri önemli ölçüde etkiler. İnfiltrasyon metodunda sıcaklık önemli bir değişkendir. Bu sebeple infiltrasyon metodunda ergime sıcaklığı görece düşük olan Al, Mg gibi metal matris malzemeleri tercih edilebilir(Pul, 2010).

2.1.1.4.4 Takviye Hacim Oranı

Takviye elemanı ve matris malzemesinin makro düzeyde bir araya gelmesi ile kompozit malzeme oluşur. Takviye elemanının hacimce miktarının kompozitin hacimce miktarına oranı takviye hacim oranı olarak isimlendirilir. Takviye hacim oranı, imalatı gerçekleştirilecek kompozit malzemenin çekme dayanımı, sertlik, gözeneklilik, aşınma gibi özelliklerinin belirlenmesinde ve infiltrasyonun tutumu konusunda söz sahibi olan parametredir (Çakır, 2017).

İçine toz takviye elemanı yerleştirilmiş cam kabın hacmi Şekil 7’de gösterilmiştir. Eşitlik 4’te toz takviye elemanı hacminin gözenek hacmi toplamı ile cam kabın hacmi hesaplanır (Duran, 2019).



Şekil 7: İçine toz takviye elemanı yerleştirilmiş cam kabın hacmi(Duran, 2019)

$$V_{Cam} = V_{Takviye} + V_{gözenek} \quad (4)$$

Eşitlik 5’te takviye elemanı kütesinin takviye elemanı yoğunluğuna bölünmesi ile takviye elemanı hacmi hesaplanır(Duran, 2019).

$$V_{Takviye} = \frac{m_{takviye}}{d_{takviye}} \quad (5)$$

Eşitlik 6’da takviye elemanını oluşturan hacmin kompozit malzemeyi oluşturan hacme bölünmesi ile takviye hacim oranı hesaplanır(Duran, 2019).

$$\text{Takviye hacim oranı} = \frac{V_{takviye}}{V_{Kompozit}} \quad (6)$$

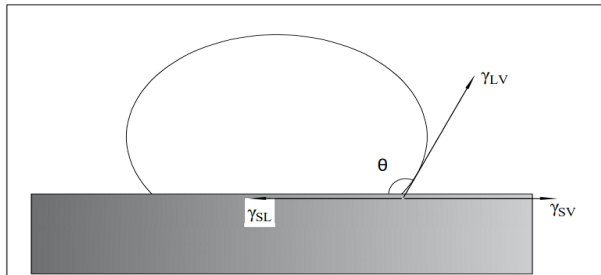
2.1.1.4.5. İnfiltrasyon Basıncı

İnfiltrasyon metodunda uygulanan basıncın değeri sıvı matrisin takviye elemanından oluşan blok parçadaki kılcal boşluklarda hareket etmesini ve buradaki boşlukları doldurmasını büyük oranda etkiler. Sıvı matrisin takviye elemanı arasındaki boşluklarda kılcal basınç aracılığıyla ilerlemesi neticesinde infiltrasyon işlemi gerçekleşmektedir. İnfiltrasyon işleminin gerçekleşmesi hem matris ile takviye elemanı uyumuna, hem de gözenek boyutuna bağlıdır. Eğer bu belirtilen parametrelerde bir uygunluk söz konusu değil ise infiltrasyonun meydana gelmesini engelleyen kuvvetlerin üstesinden gelmek amacıyla dış basınç uygulanması gerekebilir (Karademir, 2013).

2.1.1.4.6 Islatılabilirlik

Birbirinden farklı iki yüzey arasındaki uzaklık yeteri kadar küçülüp temas ederse bu iki farklı yüzeyin uyumluluk derecesi ıslatılabilirlik kavramı ile açıklanabilir. Islatılabilirlik kavramını nicel olarak ifade etmek için “temas açısı” teriminden faydalanılır (Farid Ahmadinia, 2019).

Pürüzsüz bir katı yüzey ile sıvı damlası temas ederse kendine has kararlı bir şekle dönüşür. Katı ile sıvı arasında bulunan uyumluluk derecesine göre bu şekil farklılaşmaktadır. Temas açısı (θ) katı yüzey ile sıvı yüzeyden geçen teğetin oluşturduğu açıdır ve Şekil 8’de gösterilmiştir (Farid Ahmadinia, 2019).



Şekil 8: Sıvı damlasının katı ile teması neticesinde meydana gelen yüzey enerjileri ve temas açısı(Farid Ahmadinia, 2019)

Sistemin serbest enerjisi düştükçe sıvının katı üzerinde yayılması artar.

Islatma için temas açısı $\theta \leq 90^\circ$ olması gerekir. Eğer temas açısı $\theta > 90^\circ$ ise ıslatma meydana gelmez. Islatabilirliğin katı-sıvı ara yüzey enerjisi (γ_{SL}), sıvı-buhar ara yüzey enerjisi (γ_{LV}) ve katı-buhar ara yüzey enerjisi (γ_{SV}) olmak üzere kendine özgü üç ara yüzey enerjisi vardır. Eşitlik 7’de ara yüzey enerjilerinin birbirleri ile ilişkileri verilmiştir ve bu eşitliğe young eşitliği denir (Çakır, 2017).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (7)$$

2.1.1.4.7 Alaşım

Kompozitlerin özelliklerine etki eden önemli parametrelerden biride takviye malzemesi ile matris arasındaki uyumdur. İnfiltrasyon metodunda takviye elemanın sıvı matris tarafından ıslatabilme yeteneği önemli oranda infiltrasyon mesafesini etkiler. İnfiltrasyon metodunda matris malzemesi olarak alüminyum kullanılan metal matrise sahip kompozitlerde Mg ilavesi ile sıvı matrisin ıslatabilme kabiliyeti iyileştirilir (Duran, 2019).

3. Sonuç

Metal matrise sahip kompozitler otomotiv parçalarında, elektronik aletlerde, nükleer kaplarda, robotik ve havacılık alanında ve uçak parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Önal, 2010). Metal matrise sahip kompozitler yüksek mukavemet, yüksek tokluk, yüksek sıcaklık ve termal şoklar karşısında düşük duyarlılık, şekillendirilebilme, aşınmaya karşı dayanım gibi üstün özelliklere sahiptir. (Salur et al., 2020; Uygur & Saruhan, 2004). Toz metalürjisi, döküm ve infiltrasyon gibi metal matrise sahip kompozitlerin üretiminde birçok yöntem vardır (Gündoğan & Özsarı, 2019). İnfiltrasyon yöntemi son şekle yakın parça imal edilmesi, imal edilen parçanın yüksek yüzey kalitesine sahip olması ve verimli bir yöntem olması nedeniyle tercih sebebidir (Duran, 2019). İnfiltrasyon metoduna takviye elemanı tane boyutu, infiltrasyon süresi, infiltrasyon sıcaklığı, takviye hacim oranı, infiltrasyon basıncı, ıslatılabilirlik ve alaşım parametreleri etki etmektedir.

Kaynakça

Acılar, M., & Gül, F. (2013). Basıncılı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilen Al-SiCp Kompozitlerde Partikül Boyutunun Abrasiv Aşınma Davranışına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), 323–327. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6672/88380>

Ateş, S. (2011). *Sic Takviyeli Etial 21 Esaslı Kompozit Malzemelerin Basınçlı İnfiltasyon Yöntemi İle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ateş, S., & Kızılok, E. (2011). Basınçlı İnfiltasyon İle Üretilen SiC/Al2014 Kompozitlerin Özelliklerine İnfiltasyon Sıcaklığının Etkisinin Tek Yönlü Varyans Analizi İle İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 3(1), 50–54. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/umagd/issue/31721/345734>

Birsen, D. (2022). *Vakum İnfiltasyon Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozit Üretimi*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çakır, A. (2017). *Ni Kaplanmış Mgo Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Vakum İnfiltasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çalın, R. (2006). *Magnezya Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitin Vakum İnfiltasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çevik, E. (2015). *B4C takviye elemanı ile üretilen farklı Mg içerikli Al ve Al-Si matrisli kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Duran, O. (2019). *Vakum İnfiltasyon Yöntemiyle Üretilen Pirinç Çeltiği Külü Ve Alümina Takviyeli Aa 7075 Hibrit Kompozitlerin Mikroyapısal Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Farid Ahmadinia, O. (2019). *B4c Takviyeli Al2014 Matrisli Kompozitlerin Vakumlu İnfiltasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve Elektro Erozyon İşleme Yöntemi İle İşlenebilirliğinin Deneysel Araştırılması*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gündoğan, K., & Özsarı, A. R. B. (2019). Basınçlı İnfiltasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B4C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 657–669. <https://doi.org/10.29137/UMAGD.540610>

Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech Composites*, 8(December), 18–30. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/269624843_Metal_Matrisli_Kompozitlere_Genel_Bir_Bakis

Karademir, İ. (2013). *Sio2 Takviyeli Etial 21 Esaslı Kompozit Malzemelerin Basınçlı İnfiltasyon Yöntemi İle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kayabaşı, İ. (2016). *Metal matrisli kompozit malzeme üretim sistemi imalatı ve performansının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Kayabaşı, İ. (2022). *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu*. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Kerti, I. (2019). B4C Takviyeli Magnezyum (AZ91) Matrisli Kompozitlerin Mikroyapısal Karakterizasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi International Journal of Engineering Research and Development UMAGD*, 11(1), 18–24. <https://doi.org/10.29137/umagd.388600>

Molina-Jorda, J. M., Schneider, G., & Mortensen, A. (2022). Surface energy contributions to the work of infiltration in metal matrix composite processing. *Scripta Materialia*, 206. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2021.114223>

Okur, O. (2016). *Partikül Takviyeli Aa2014 Metal Matrisli Kompozit Malzemenin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretimi Ve Özelliklerinin Karakterizasyonu*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Önal, M. (2010). *Al2O3 Ve Tic İçeren Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özsarı, A. R. B. (2018). *Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilen Aa2024 Ve Aa6061 Matrisli, B4c Ve Sic Takviyeli Kompozitlerin Üretimi İyapı, Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*. Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pul, M. (2010). *Al Matrisli Mgo Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretilmesi Ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pul, M., Çalın, R., Çıtak, R., & Seker, U. (2009). Düşük Takviyeli MgO-Al Kompozitlerin Vakumlu İnfiltrasyonunda Takviye Oranının İnfiltrasyon Davranışına Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 12(3), 173–177. <https://doi.org/10.2339/2009.12.3>

Salur, E., Aslan, A., Kuntoğlu, M., Güneş, A., Sinan Şahin, Ö., & Üniversitesi, S. (2020). Kompozit Malzemelerin Tornalanması Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Optimizasyonu. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(3), 423–431. <https://doi.org/10.21541/APJES.631260>

Şap, S. (2022). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Ti-B-Sic Takviyeli Cu Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Şenel, M. C. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36–47. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/muhendismakina/issue/54339/736188>

Şimşek, İ., Yildirim, M., Özyürek, D., & Şimşek, D. (2019). Basıncısız İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen SiO₂ Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22(1), 81–85. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.389637>

Sur, G. (2008). *Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler Ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi* (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.

Sur, G., & Kayabaşı, İ. (2019). Hafif Metal Ana Fazlı Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat Ve Performansının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), 63–79. <https://doi.org/10.29109/GUJSC.414933>

Taşcı, U. (2012). *Aa2014-B4c Metal Matrisli Kompozitinin Toz Metalurjisi Ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilebilirliği, Karakterizasyonu Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Uygur, İ., & Saruhan, H. (2004). Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 167–174. <https://doi.org/10.16984/SAUFBED.22156>

BÖLÜM VI

SÜRDÜRÜLEBİLİR KOMPOZE ÇİMENTO HARÇLARININ FİZİKSEL VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ

Physical and Microstructure Properties of Sustainable Composed Cement Mortars

Levent BOSTANCI

*(Doç.Dr.), Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu,
İnşaat Teknolojisi Programı, İstanbul, Türkiye
e-posta: leventbostanci@beykent.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4686-9102*

1. Giriş

Avrupa Komisyonunun 2011 yılında ilan ettiği sürdürülebilir ekosistem odaklı politikalarına ilişkin olarak 1990 yılındaki salınım seviyeleri baz alınarak mevcut CO₂ emisyonlarında 2030 yılına kadar %40 oranında 2050 yılına kadar ise %80-95 düzeylerinde salınım azaltılması amaçlanmaktadır (Galusnyak vd., 2022). Öte yandan, endüstriyel kalkınmanın ve arkasındaki insan aktivitesinin günümüzde iklim değişikliklerine ve ilintili olarak küresel ısınmaya artan bir hızla sebep olduğu net olarak bilinmektedir. Yıllık olarak ortalama 30 Gt düzeyinde küresel CO₂ salınımı gerçekleşmekte ve bunun sadece 1.5 Gt'lik kısmı çimento üretimi esnasında açığa çıkmaktadır (Juangsa vd., 2022). Çimento üretimi aynı zamanda küresel endüstriyel enerji stoğunun %5 kadarını tek başına tüketmekte ve tüketilen enerji de üretim maliyetinin tek başına %30-40 'ını oluşturmaktadır (Ma vd., 2022). Yüksek düzeydeki olumsuz katkı düzeyi göz önüne alındığında diğer endüstrilere kıyasla çimento üretim endüstrisi, küresel insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının yaklaşık %7'sini oluşturan, enerji ve doğal kaynak tüketimi odaklı bir endüstri olarak tarif edilebilmektedir (Liang vd., 2023).

Geleneksel Portland çimentosu yüksek işlenebilirliği, sahadaki üretim faaliyetleri açısından uygun priz süresi aralığı, hızlı dayanım kazanma süreci, gelişmiş mekanik özellikleri ve çevresel etkilere karşı yüksek direnci gibi olumlu özellikleri ile iki yüzyılı aşkın süredir ana bağlayıcı malzeme olarak inşaat sektöründe tercih edilmektedir (Her vd., 2022). Günümüzde global düzeyde yaklaşık 4 milyar ton geleneksel Portland çimentosu üretildiği tahmin edilmektedir (Poudyal ve Adhikari, 2021). Bununla birlikte üretilen her 1 ton çimentoya karşılık olarak da 630 kg düzeyinde CO₂ salınımı gerçekleştiği bilinmektedir (Santos vd., 2022). Esasen çimento üretimi esnasında meydana gelen sera gazı salınımı, üretim esnasında kullanılan ham maddelerin geçirdiği bir takım kimyasal reaksiyonlardan ve bu kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği fırınlarda kullanılan yakıt türlerinden kaynaklanmaktadır. Kabaca toplam salınım, çoğunlukla direkt ve kısmen indirekt bileşenlerin katkısı ile oluşmaktadır. Detaylandırmak gerekirse meydana gelen sera gazı salınımı; hammadde konumundaki kireçtaşının çimentonun esas yapı taşı olarak kabul edilen klinkere dönüşümü esnasındaki salınımdan (%50 düzeyinde), bu reaksiyonun gerçekleşmesi için harcanan yakıtın yol açtığı salınımdan (%40 düzeyinde) ve diğer hammaddelerin satın alınması, hammaddelerin taşınması, hammadde işleme için kullanılan elektrik tüketimi gibi diğer indirekt etkenlerden kaynaklanmaktadır (%10 düzeyinde) (Ige vd., 2021). 1850 yılındaki atmosferik CO₂ konsantrasyonunun 285 ppm'den 2019 yılında 410 ppm'e yükseldiği ve 1850-1900 yılları arasındaki döneme kıyasla 2010 – 2019 döneminde global küresel ortalama sıcaklığın 1.07 K° arttığı durumu göz önüne alındığında olumsuz tabloya yüksek düzeyde katkı sunan çimento üretimi faaliyetinin ekosistemin geleceği açısından sürdürülebilir olmadığı aşıkardır (Nie vd., 2022). Bu noktada çimento üretim faaliyeti yerine aynı amaca katkı sunabilecek sürdürülebilir üretim faaliyetlerin arayışı büyük bir hızla devam etmektedir.

Doğal kaynakların tüketiminin sınırlandırılması, düşük enerji ile üretim, minimum düzeyde gaz salınımı, azaltılmış çevre kirliliği gibi temel sürdürülebilirlik odaklı politikalar gereğince inşaat sektörünün gelecek dönem üretim stratejileri de her geçen gün artan çevresel hassasiyet içeriğiyle güncellenmektedir (Pires vd., 2022). Yüksek fırın cürufu, seramik kökenli karo atığı, atık cam tozu, bor türevi atıklar, pirinç kabuğu külü, uçucu kül, palmiye külü, fil otu külü ve aktif karbon madenciliği atıkları gibi endüstriyel yan ürünler çimento esaslı malzeme üretiminde sahip oldukları bir takım puzolanik özellikler sebebiyle kısmi düzeylerde de olsa üretimi ekosistem açısından oldukça zararlı olan geleneksel çimento yerine ikame edilebilmektedir (Eugenio vd., 2023)

2. Malzeme ve Yöntem

Sürdürülebilir harç üretimi için harç kompozisyonlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının bağlayıcı malzeme olarak ikame edildikleri ve çimento ile ağırlıkça yarı yarıya sabit oranda yer değiştirildikleri kompoze harç karışımları oluşturulmuştur. İzlenecek tüm özelliklerin sadece değişen atık türü bağlayıcı türü kontrolü altında olması hedeflendiğinden karışımlardaki su/bağlayıcı oranları, ağırlıkça kum miktarı, kür koşulları vb. tüm diğer parametreler tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. Tablo 1 oluşturulan harç karışım içeriklerini göstermektedir.

Tablo 1: Karışım Oranları.

Numune	Bağlayıcı içerik				Su (ml)	Kum (g)
	Çimento (%)	Cüruf (%)	Uçucu Kül (%)	Silis dumanı (%)		
SC	100	-	-	-	225	1350
SSL	50	50	-	-		
SFA	50	-	50	-		
SSF	50	-	-	50		

Numune içerikleri incelendiğinde SC numunesinin salt çimentolu kontrol numunesi olarak tasarlandığı görülmektedir. Yüksek fırın cürufu içerikli SSL numunesi, uçucu kül içerikli SFA numunesi ve silis dumanı içerikli SSF numunesi ağırlıkça %50 oranında çimento içermekte ve bağlayıcı malzemenin kalan %50 'lik diğer kısmı numuneye özgü atık türü bağlayıcıdan oluşmaktadır. Tüm karışımlarda ağırlıkça eşit oranda kullanılan karma suyu şebeke suyu olup yine ağırlıkça eşit miktardaki kum da sabit granülometrik tane dağılımına sahip paketlenmiş haldeki Rilem kumudur.

Oluşturulan harç karışımlarından 40 x 40 x 160 mm'lik çelik kalıplar vasıtasıyla prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlayan numuneler üzerinden gerçekleştirilen porozimetre ve SEM testleri aracılığı ile numunelerin yoğunluk ve mikroyapı özellikleri araştırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Yoğunluk

Kalsiyum – silikat esaslı malzemeler, çimento türü bağlayıcı malzeme ile agrega türü bileşenlerin bir araya gelerek oluşturduğu tanecik yapılı sistemler olup malzeme yoğunluğu malzemenin başta mekanik özellikleri olmak üzere

diğer önemli özelliklerini yansıtan önemli bir parametredir (Li vd., 2019). Numunelerin kür süresinin devam ettiği periyotta ilerleyen zamanla birlikte artan hidrasyon ürün oluşumu ve azalan boşluk yapısı özellikleri ile yoğunluk değerinin artması beklenir (Aocharoen ve Choticka, 2021). Malzemenin yoğunluğu çeşitli nem durumları ve kabuller altında hesaplanabilmektedir. Yığın yoğunluğu, malzeme biliminde belirli bir nem içeriğindeki numunenin özgül kütlesi ve hacmi arasındaki ilişkiyi gösteren önemli bir parametredir (Marini vd., 2022). Çok eski zamanlardan bu yana malzemelerin yığınsal yoğunluğu Arşimed yöntemi ile kolayca belirlenebilmektedir. Bu yöntemde kuru ağırlığı M_0 olan numune 24 saatlik bir süre boyunca deiyonize konumdaki suda bekletilmekte ve ardından malzemenin sudaki kütlesi (M_1) ile suya doygun haldeki kütlesi (M_2) belirlenmektedir. Elde edilen farklı nem koşullarındaki ölçümler neticesinde kuru ağırlığın (M_1), ıslak durumdaki ağırlık farkını gösteren (M_2-M_1) değerine olan oranı malzemenin yığınsal yoğunluğunu göstermektedir (Ge vd., 2022).

Cıva porozimetresi testi ile harç numunelerine ait ölçülen yoğunluk değerleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2: Harç numunelerinin yoğunluk değerleri.

	SC	SSL	SFA	SSF
Yığınsal yoğunluk (g/ml)	1.81	2.09	2.01	1.96
Görünür yoğunluk (g/ml)	2.08	2.47	2.48	2.35

Harç numunelerine ait yoğunluk değerleri incelendiğinde en düşük yığınsal yoğunluk değeri 1.81 g/ml ile salt çimentolu SC numunesinde gözlenmektedir. Bağlayıcı malzeme içeriğinde sabit çimento dozajı altında gerçekleştirilen %50 düzeyindeki silis dumanı, uçucu kül ve cüruf yer değişimleri numunelerin yığınsal yoğunluk değerlerinde sırasıyla %8.2, %%11.0 ve %15.46 düzeylerinde yığınsal yoğunluk artışına yol açmaktadır. Benzer şekilde görünür yoğunluk değerleri de sırasıyla %12.98 - %19.23 düzeylerinde artmaktadır. Bu durum, karışımlarda çimento ile yer değiştiren mineral kökenli puzolanik özellik gösteren yan ürünlerin mikroyapı özelliklerini etkileyen matristeki dolgu fonksiyonu ile alakalıdır. Bu noktada kullanılan yan ürünlerin mineral dolgu fonksiyonunun mikroyapı özellikleri üzerindeki etkisinin anlaşılması oldukça önemlidir.

3.2. Mikroyapı Özellikleri

3.2.1. Uçucu Kül İçeren Harç Numunelerinin Mikroyapı Özellikleri

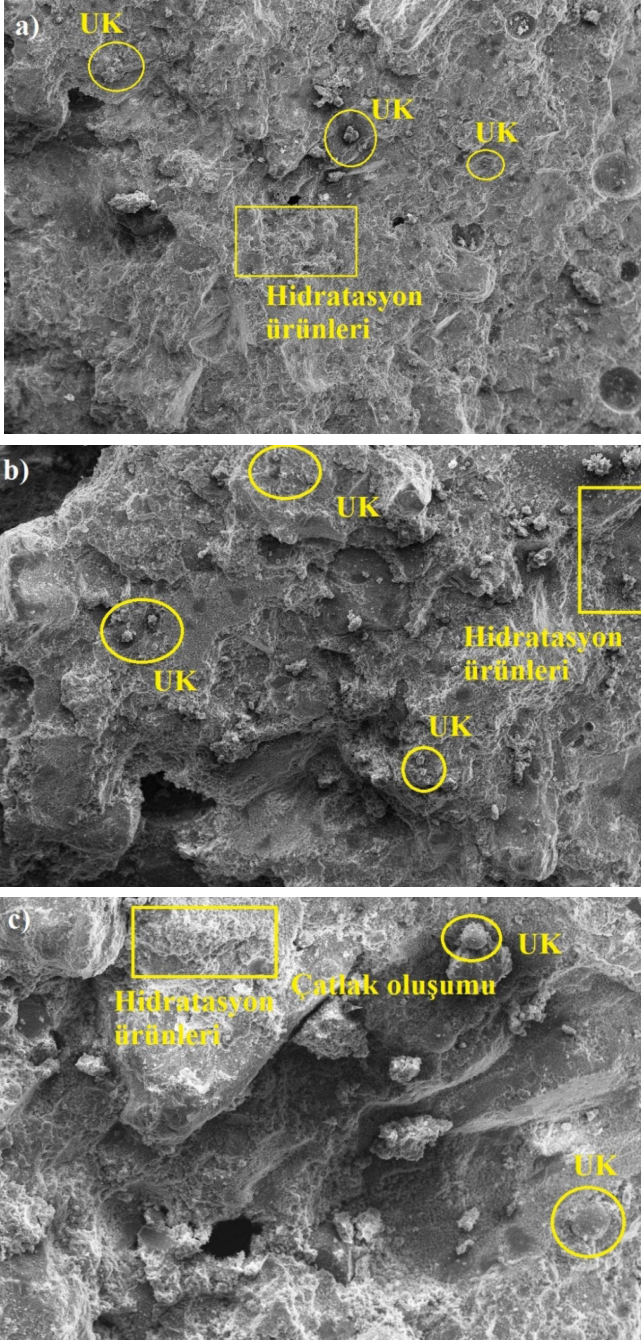
Uçucu kül; kompozisyonundaki yüksek alüminyum – silika içeriği ile kalsiyum silikat esaslı malzemelerin hidrasyonunda önemli bir rol oynayabilen,

malzeme boşluk yapısını üstlendiği inceltme fonksiyonu ile modifiye edebilen, bir tür volkanik kül etkisi gösteren önemli bir endüstriyel bağlayıcıdır (Qu vd., 2023). Hollanda, Danimarka ve İtalya gibi atık yönetiminin gelişmiş olduğu ülkelerde uçucu kül %100 oranında yeniden kullanım döngüsüne sahipken global seviyede bu durum maalesef %25 düzeyi ile sınırlıdır (Shi vd., 2023). Kömürle çalışan santrallerden yan ürün olarak sıfır maliyetle elde edilen uçucu külün kimyasal kompozisyonu ve bu uçucu külün bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığı ürünlerin yapısal özellikleri uçucu külün elde edildiği koşullara ve kökenindeki ham madde kömürün tipine bağlı olarak oldukça değişkenlik göstermektedir. Genel olarak Al_2O_3 ve SiO_2 uçucu külü oluşturan ana bileşenler olarak bilinmekte ancak CaO , MgO , Fe_2O ve Na_2O gibi metal oksitlerde düşük miktarlarda da olsa uçucu küllerin kimyasal kompozisyonlarında yer alabilmektedir (Huang vd., 2023).

Uçucu kül partiküllerinin morfolojik özellikleri, kalsiyum- silikat esaslı karışımların işlenebilirlik özelliklerini geliştirebilme potansiyeline sahip olmakla birlikte yüksek yüzey alanı özellikleri düşük su/katı kompozisyonunda yüksek su emme kapasitesinin oluşumuna neden olabilmektedir (Guan vd., 2023). Buna karşın karışımlarda artan uçucu kül içeriğinin yoğun bir matris yapısı ile çatlak genişliğini sınırladığı ve bu sayede durabilite özelliklerini geliştirdiği de bilinmektedir (Shen vd., 2022). Uçucu kül karışımlara ilave edildiğinde dayanım üzerinde olumlu etkisi olan jel oluşum miktarı kimyasal etkileşim neticesinde artmakta ve aynı zamanda kimyasal reaksiyona katılmamış uçucu kül partikülleri de çimento matrisinde boşlukları dolduran mikro agregalar olarak davranabilmektedir (Wang vd., 2012). Hidratasyonun ilerleyen sürecinde artan puzolanik etkisi ve yapısal uygulamalardaki çevre dostu karakteristiği nedeniyle uzun yıllardır popüler olan uçucu kül ile salt çimentolu duruma kıyasla %15-18 düzeyinde daha yüksek mekanik özellikler de saptanabilmektedir (Du vd., 2022).

Uçucu kül partikülleri katı partiküller, içi boşluklu partiküller, gözenekli partiküller ve düzensiz partiküller olarak çeşitlenebilmektedir. Tüm bu çeşitliliğe rağmen genel olarak uçucu kül partiküllerinin küresel formda ve yüksek poroziteli olduğu bilinmektedir. Bu küresel formdaki tanecik morfolojisi ve beraberinde getirdiği puzolanik aktivite sayesinde uçucu kül çimento alternatifi olarak karışımlarda kullanılabilir (Duan vd., 2015). Katı partiküller olarak sınıflanan uçucu kül partikülleri boyut olarak $10 \mu m$ 'den daha küçük partiküller olmakla birlikte iç boşluklu ve gözenekli partiküller katı partiküllere boyutça benzemesine rağmen mikroyapıları katı partiküllere kıyasla oldukça farklıdır. İlâveten düzensiz olarak adlandırılan partiküllerin mikroyapısı da boşluklu ve yoğun partiküllerin kompozisyonunu andırmaktadır (Fan ve Juang, 2016).

Bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 oranında uçucu kül içeren harç numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile hibrit uçucu kül harçlarının mikroyapı görüntülemeleri.

Numunelere ait SEM görüntüleri incelediğinde genel olarak küresel formda olarak tanımlanan uçucu kül partiküllerinin partikül morfolojisinin tüm büyütme oranları için matriste belirtilen formda görüntülenebildiği görülmektedir. Heterojen yapıda dağılan ve kısmen kimyasal reaksiyona girmeyen uçucu kül tanelerinin bölgesel olarak mikro boyutta agrega olarak harç gözenek yapısında gözenek doldurucu rol üstelendiği görülmektedir. Hidrate olmayan uçucu kül partiküllerinin dağılım göstermediği bölgelerde ise boşluklu yapı oluşumları dikkat çekicidir. Bu durum mineral dolgu fonksiyonuna sahip uçucu kül partiküllerinin bu bölgelerde dolgu işlevini yerine getirememesinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

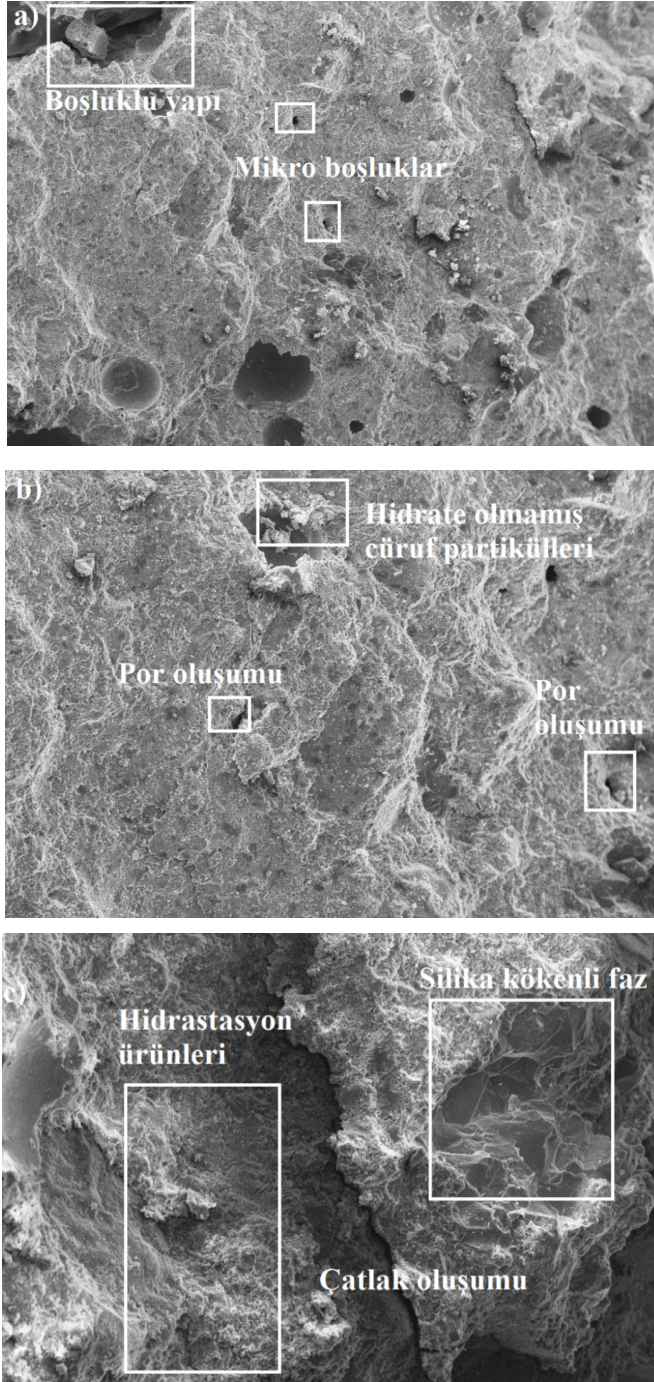
3.2.2. Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harç Numunelerinin Mikroyapı Özellikleri

Enerjinin korunumu, CO₂ emisyonlarının azaltılması ve çeşitli endüstrilerde atık olarak ortaya çıkan malzemelerin yeniden değerlendirilmesi fikri gelişmiş ülkelerde sürdürülebilir gelişme ve döngüsel ekonomi anlayışıyla her geçen gün artan bir istekle hayata geçirilmeye çalışılmaktadır (Wang vd., 2022). Metal üretim endüstrisinden bir yan ürün olarak elde edilen cürufun günümüzde düşük hidrolik aktivitesi, kararlı kimyasal kompozisyonu, klasik Portland çimentosuna kıyasla yüksek çevresel kazanımları ve teknik avantajları özellikleri cürufun çimento alternatifi olarak kullanılabilme potansiyelini işaret etmektedir (Ma vd., 2022). Dünyada global düzeyde 190-290 milyon ton aralığında çelik kökenli cürufun endüstriyel yan ürün olarak oluştuğu bilinmekte ancak yüksek üretim kapasitesinin aksine cürufun endüstriyel seviyede değerlendirilerek yeniden kullanımı kabul edilebilir seviyenin oldukça altındadır (Shi vd., 2022). Çelik kökenli cürufların kimyasal kompozisyonunda yer alan trikalsiyum silikat, dikalsiyum silikat ve kalsiyum alüminoferrit, çelik kökenli cürufların çimento esaslı malzemelerde alternatif bağlayıcı olarak kullanımına olanak sağlayabilmektedir (Ho vd., 2022). Son yıllarda global düzeyde yıllık 30 milyar ton beton üretimi gerçekleştiği göz önüne alındığında cüruf malzemenin beton teknolojisinde değerlendirilebilmesi önem arz etmektedir (Liu vd., 2022).

Yüksek düzeydeki camsı faz içerikleri ile hidrolik aktivite gösterebilen cüruflar, metal üretim sahasına bağlı olarak sadece çelik kökenli cüruf olarak sınırlanmamakta ve metalik olarak çeşitlenebilmektedir (Ban vd., 2022). Çelik kökenli cürufun çimento esaslı malzemelerde kullanımı yalnızca ekonomik olarak fayda sağlamamakta aynı zamanda azalan çimento kullanımının beraberinde getirdiği azaltmış CO₂ salınımı ile çevre dostu malzeme kullanımı

politikalarına katkı sunmaktadır. Klasik Portland çimentosuna kıyasla içeriğinde yer alan yüksek miktardaki inaktif bileşenler ve düşük seviyedeki trikalsiyum silikat miktarına bağlı olarak ortaya çıkan daha düşük hidrolik aktivite cüruf kökenli karışımlarda daha düşük mekanik dayanımlara yol açsa da mekanik, termal ve kimyasal aktivasyon destekleri ile söz konusu sakıncalar hafifletilebilmektedir (Li vd., 2022). Ferrokrom kökenli cüruflar, ferrokrom sanayinde üretim esnasında hızlı soğuma sonucunda açığa çıkan ince taneli partikül yapısında olup SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO kontrolünde forsterite ve spinel mineralojik faz yapısındadır ve genellikle tuğla, bitüm ve beton karışımlarında agrega olarak değerlendirilmeye elverişlidir (Shoukry vd., 2022). Nikel cürufu, nikel – demir alaşım sanayinden elde edilen bir yan ürün olup her 1 ton nikel elde edilğinde yaklaşık 14 ton da nikel cürufu yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. İçerisindeki yüksek silika içeriği ve camsız faz, nikel cürufunu alkali aktive edilmiş karışımlarda önemli bir potansiyel haline getirmektedir (Ma vd., 2022). Fayalit kökenli cüruf, bakır ve nikel üretim endüstrilerinden yan ürün olarak ortaya çıkan, artan bakır ve nikel üretim talebiyle açığa çıkma miktarı da her geçen gün artan, demir açısından oldukça zengin içeriğe sahip olmakla birlikte geri dönüşüm oranı oldukça düşük düzeylerde olan cüruf türlerinden biridir. Kimyasal kompozisyonunda genel olarak düşük seviyede Al_2O_3 ve CaO içermekle birlikte yüksek düzeyde Fe_2O_3 ve SiO_2 içerdiği de bilinmektedir (Adediran vd., 2022).

Bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile hibrit çürüf harçlarının mikroyapı görüntülemeleri.

Numunelere ait SEM görüntüleri incelediğinde cürufun kimyasal kompozisyonunda yer alan yüksek düzeydeki silika içeriği sayesinde harç matrisinde camsı faz bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum esasen yüksek fırın cürufunun hidrolik aktivitesinin bir etkisi olarak düşünülebilir. SEM görüntülemelerinde dikkat çeken bir husus da uçucu kül partiküllerine kıyasla küresel formda olmayan cüruf partiküllerinin adhezyon etkisi ile mekanik özelliklere sunabileceği olası olumlu katkıdır. Çimento esaslı karışımlarda karışımlara ilave edilen cüruf partikülleri sahip oldukları kaba yüzey dokuları ve yüksek silika içerikleri ile mikroyapıda adhezyonu arttırarak dayanım artışını destekleyebilmektedir (Keertan vd., 2023).

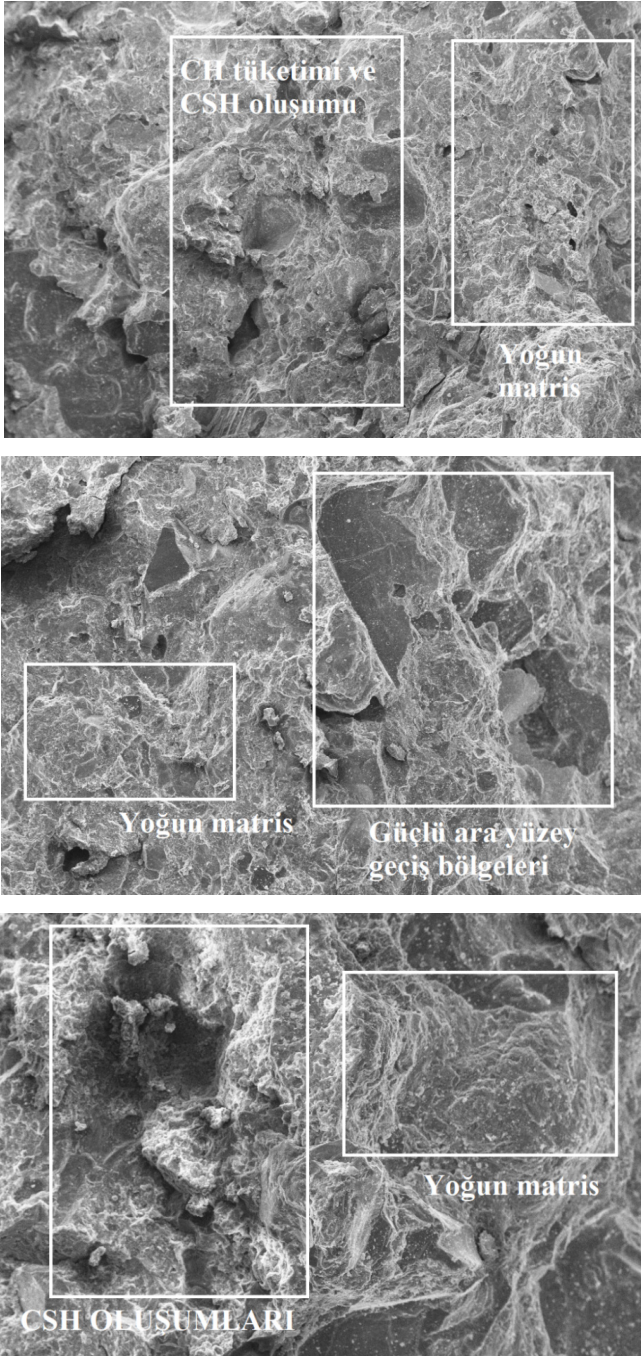
3.2.3. Silis Dumanı İçeren Harç Numunelerinin Mikroyapı Özellikleri

Silis dumanı, silikon ve ferrosilikon endüstrisinden elde edilen genellikle gri veya beyaz renkli partiküllerden oluşmakta olup %95 düzeyine kadar kristalize olmamış silika içerebilen bir yan üründür (Kansal ve Goyal, 2021). Ortalama partikül boyutu 0.15 μm olan, amorf silika açısından oldukça zengin ve yüksek spesifik yüzey alanına sahip olan silis dumanı, çimento partiküllerine kıyasla 100 kat daha küçük olan tane boyutları ile çimento esaslı karışımlarda boşluk doldurucu rol üstlenebilmektedir. İlaveten küresel morfolojideki tane yapısı ile dahil oldukları karışımların işlenebilirlik özelliklerini geliştirmekte ve bünyesindeki amorf silikanın çimento hidrasyonu esnasındaki portlandit ile etkileşiminden kaynaklanan dayanama katkı sunabilme özelliğine sahip C-S-H bağ sayısını arttırabilmektedir (Tuan vd., 2022). Bu sebeple silis dumanı dahil edilmiş çimento karışımlarında genellikle daha yoğun bir matris yapısı ve gelişmiş mekanik özellikler tespit edilebilmektedir (Seo vd., 2020).

Kimyasal kompozisyonunda genellikle %85 düzeyinin üzerinde amorf silika içeren silis dumanının yüksek puzolanik karakteristik özelliğinin etkisi ile dahil olduğu çimento esaslı malzemelerin gözenek çapları ve matraste bağlayıcı malzeme pastası – agrega ara yüzey geçiş bölgeleri üzerindeki baskın etkisi sayesinde mikroyapı özelliklerini derinden etkilediği bilinmektedir (Zhang vd., 2016). Esasen çimento esaslı malzemelerde ara yüzey geçiş bölgesi çimento pastası ve agrega taneleri etkileşim bölgesinde oldukça kalın bir tabaka formundadır ve bu bölge yüksek geçirgenlik özelliği ile kalsiyum-silikat esaslı malzemenin en zayıf matris alanlarından biridir (Chen vd., 2021). Ara yüzey geçiş bölgesi çimento esaslı malzemelerde aşırı yüklenme durumunda ilk çatlağın agrega çevresinde gerçekleşeceği bölge olarak nitelendirilmekte

bu da bu bölgeyi mekanik zorlamalar altında en zayıf hat haline getirmektedir (Nežerka, vd., 2019). Silis dumanının varlığında bağlayıcı malzeme ile agrega arasındaki bu bölgede oldukça ince olan silis dumanı partikülleri sayesinde kohezyon özellikleri gelişebilmekte ve bu da mekanik özelliklerin gelişimini destekleyebilmektedir (Cheah vd., 2019). Mekanik özelliklerin gelişiminde puzolanik özellik kavramı öne çıkmaktadır. Silis dumanının puzolanik özelliği hidrasyon esnasında kimyasal kompozisyonunda yer alan silika içeriğinin portlandit ile etkileşiminden kaynaklanmakta olup bu esnada oluşan C-S-H bağları da ilaveten mikroyapı modifikasyonu ile arzu edilen mekanik ve durabilite özelliklerinin gelişimine katkı sunabilmektedir (Fang vd., 2021). Bu noktada gerçekleşen CH – CSH dönüşümü bu mekanizmanın ortaya çıkışını sağlamaktadır (Gruszczyński ve Lenart, 2020).

Bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 oranında yüksek fırın cürufu içeren harç numunelerine ait SEM görüntüleri Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile hibrit silis dumanı içerikli harçların mikroyapı görüntülemeleri.

Numunelere ait SEM görüntüleri incelediğinde silis dumanı içerikli harç numunelerinde diğer uçucu kül ve cüruf içerikli numunelere kıyasla oldukça yoğun ve homojen bir matris yapısının oluşumu dikkat çekmektedir. Bu yoğun matris yapısı aynı zamanda daha düşük gözenek oluşumları ile de kendini ayrıca belli etmektedir. Bu daha önce bahsedildiği üzere silis dumanı partiküllerinin çimento partiküllerine kıyasla 100 kat daha küçük olan tane boyutları ile alakalıdır. Bu partikül yapısı sayesinde silis dumanı matriste boşluk doldurucu özellik göstermektedir. Mikroyapı görüntülemelerinde dikkat çeken bir diğer husus da ara yüzey geçiş bölgelerindeki matris özellikleridir. Silis dumanı sayesinde gerçekleşen CH – CSH transformasyonu ara yüzey geçiş bölgelerinde geçirimsizliği azaltarak durabilite ve mukavemet özelliklerini iyileştirmesi olası bir mekanizmaya olanak sağlamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme içeriğinde sabit çimento dozajında çimento ikamesi olarak yarı yarıya uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içeren sürdürülebilir kompoze harç numunelerinin fiziksel ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışmadan aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- Sürdürülebilir harç karışımlarına sabit çimento dozajında ağırlıkça yarı yarıya ilave edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı içerikleri sahip oldukları mineral dolgu özellikleri ile numunelerin yoğunluk değerlerini ve mikroyapı özelliklerini derinden etkilemektedir.
- Uçucu kül partikülleri, genel olarak küresel formatta olup özgün morfolojik görüntüleri sayesinde hidrate olmamış partiküller çimento matrisinde kolayca ayırt edilebilmektedir. Hidratasyona katılmayan uçucu kül partiküllerinin de mikro agrega olarak matriste kısmi düzeyde boşluk doldurabilme özellikleri oldukça değerlidir.
- Küresel formdaki uçucu kül partiküllerine kıyasla daha kaba yüzey dokusuna sahip olan cüruf partikülleri mikroyapıda artan adhezyon etkisi ile dayanım artışına mekanik etki vasıtasıyla katkı sunabilme potansiyeline sahiptir.
- Silis dumanının bağlayıcı malzeme içeriğine dahil edilmesi hidratasyon esnasında CH içeriğinin matrisin ara yüzey geçiş bölgelerindeki miktarını azaltmakta ve bunun bir sonucu olarak CH-CSH dönüşümü ile daha yoğun bir matris oluşumuna katkıda bulunarak silis dumanı içerikli numunelerin mekanik ve durabilite özelliklerinin gelişimini destekleyebilmektedir.

Kaynakça

Adediran, A., Yliniemi, J., Carvelli, V., Adesanya, E., Illikainen, M. Durability of alkali-activated Fe-rich fayalite slag-based mortars subjected to different environmental conditions, *Cement and Concrete Research*, 162, (2022), Article 106984.

Aocharoen, Y., Choticka, P. Compressive mechanical properties of cement mortar containin recycled high-density polyethylene aggregates: Stress–strain relationship, *Case Studies in Construction Materials*, 15, (2021), Article e00752.

Ban, C.C., Ee, T.L., Ramli, M., Akil, H.B.M., Mo, K.H. Properties and microstructure of lime kiln dust activated slag-fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 347, (2022), Article 128518.

Cheah, C.B., Tan, L.E., Ramli, M. The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume, *Composites Part B*, 160, (2019,) 558–572.

Chen, H., Wang, P., Pan, J., Lawi, A. S., Zhu, Y. Effect of alkali-resistant glass fiber and silica fume on mechanical and shrinkage properties of cement-based mortars, *Construction and Building Materials*, 307, (2021), Article 125054.

Du, S., Ge, X., Zhao, Q. Central composite design-based development of eco-efficient high-volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 358, (2022), Article 129411.

Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., Shen, C. An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure, *Materials and Design*, 74, (2015), Article 125–137.

Eugenio, T.M.C., Narciso, C. R. P., Fagundes, J.F., Henriques, A.B., Mendes, R. F. Study on the use of mining waste as raw material for extruded fiber cement production, *Journal of Building Engineering*, 63, (2023), Article 105547.

Fan, L.-J., Juang, S.H. Reaction effect of fly ash with Al–3Mg melt on the microstructure and hardness of aluminum matrix composites, *Materials and Design*, 89, (2016), 941–949.

Fang, Y., Wang, J., Ma, H., Wang, L., Qian, X., Qiao, P. Performance enhancement of silica fume blended mortars using bio-functionalized nano-silica, *Construction and Building Materials*, 312, (2021), Article 125467.

Galusnyak, S.C., Petrescu, L., Cormos, C-C. Environmental impact assessment of post-combustion CO₂ capture technologies applied to cement

production plants, *Journal of Environmental Management*, 320, (2022), Article 115908.

Ge, X., Zhou, M., Fan, C., Zhang, Y., Zhang, X. Investigation on strength and failure behavior of ceramic foams prepared from silicoaluminous industrial waste under uniaxial compression, *Construction and Building Materials*, 317, (2022), Article 125912.

Gruszczyński, M., Lenart, M. Durability of mortars modified with the addition of amorphous aluminum silicate and silica fume, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, (2020,) Article 102526.

Guan, L.-I., Chen, Y.-G., Ye, W.-M., Wu, D.-B., Deng, Y.-F. Foamed concrete utilizing excavated soil and fly ash for urban underground space backfilling: Physical properties, mechanical properties, and microstructure, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 134, (2023), Article 104995.

Her, S., Park, J., Li, P., Bae, S. Feasibility study on utilization of pulverized eggshell waste as an alternative to limestone in raw materials for Portland cement clinker production, *Construction and Building Materials*, 324, (2022), Article 126589.

Ho, C.M., Doh, S.I., Li, X., Chin, S. C., Ashraf, T. RSM-based modelling of cement mortar with various water to cement ratio and steel slag content, *Physics and Chemistry of the Earth*, 128, (2022), Article 103256.

Huang, J., Chen, H., Yang, J., Zhou, T., Zhang, H. Effects of particle size on microstructure and mechanical strength of a fly ash based ceramic membrane, *Ceramics International*, 49, (2023), 15655–15664.

Ige, O.E., Olanrewaju, O. A., Duffy, K. J., Obiora, C. A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production, *Journal of Cleaner Production*, 324, (2021), Article 129213.

Juangsa, F.B., Cezeliano, A. S., Darmanto, P. S., Aziz, M., Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production, *South African Journal of Chemical Engineering*, 42, (2022), 23–31.

Kansal, C. M., Goyal, R. Analysing mechanical properties of concrete with nano silica, silica fume and steel slag, *Materials Today: Proceedings* 45, (2021), 4520–4525.

Keertan, T. S., Kumar, P.V., Bommisetty, J., Ramanjaneyulu, B., Kumar, M. A. High strength fiber reinforced concrete with steel slag as partial replacement of coarse aggregate: Overview on mechanical and microstructure analysis, *Materials Today: Proceedings*, (2023), Article In Press.

Li, L.G., Zhuo, H.X., Zhu, J., Kwan, A.K.H. Packing density of mortar containing polypropylene, carbon or basalt fibres under dry and wet conditions, *Powder Technology*, 342, (2019), 433–440.

Li, X., Doh, S. I., Ho, C.M., Jing, G., Ashraf, T. The investigation on properties of sodium sulfate-activated mortar incorporating steel slag with various replacement ratio and particle size, *Physics and Chemistry of the Earth*, 128, (2022), Article 103241.

Liang, X., Dang, W., Yang, G., Zhang, Y. Environmental feasibility evaluation of cement co-production using classified domestic waste as alternative raw material and fuel: A life cycle perspective, *Journal of Environmental Management*, 326, (2023), Article 116726.

Liu, G., Rong, H., Wang, J. Valorization of converter steel slag in sustainable mortars by a combined alkali and carbonation activation, *Journal of Cleaner Production*, 370, (2022), Article 133519.

Ma, X., Shao, W., Cui, Z. Energy and thermodynamic analysis of a typical cement production system based on experimental and simulated investigations, *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, (2022), Article 102357.

Ma, Y., Zhang, B., Lin, Y., Huang, Y., Zheng, D, Ji, T. Effect of nickel slag on the basic tensile creep of alkali-activated slag/nickel slag mortars, *Construction and Building Materials*, 351, (2022), Article 128778.

Ma, H., Du, E., Niu, X., Feng, J. Drying shrinkage characteristics and mechanism primary exploration of MgO-slag mortars, *Construction and Building Materials*, 333, (2022), Article 127416.

Marini, L. J., Cavalheiro, R. S., De Araujo, V. A., Cortez-Barbosa, J., de Campos, C. I., Molina, J. C., Silva, D. A. L., Lahr, F. A. R., Christoforo, A. L. Estimation of mechanical properties in Eucalyptus woods towards physical and anatomical parameters, *Construction and Building Materials*, 352, (2022), Article 128824.

Nežerka, V., Bílý, P., Hrbek, V., Fládr, J. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete, *Cement and Concrete Composites*, 103, (2019), 252–262.

Nie, S., Zhou, J., Yang, F., Lan, M., Li, J., Zhang, Z., Chen, Z., Xui M., Li, H., Sanjayan, J. G. Analysis of theoretical carbon dioxide emissions from cement production: Methodology and application, *Journal of Cleaner Production*, 334, (2022), Article 130270.

Pires, M., Fidelis, R. de J. A., Resende, D. S. De, Bezerra, A. C. da S., Phosphate rock waste in the production of cement tile, *Results in Engineering*, 16, (2022), Article 100701.

Poudyal, L., Adhikari, K. Environmental sustainability in cement industry: An integrated approach for green and economical cement production, *Resources, Environment and Sustainability*, 4, (2021), Article 100024.

Santos, T.A., Cilla, M. S., Ribeiro, D. V. Use of asbestos cement tile waste (ACW) as mineralizer in the production of Portland cement with low CO₂ emission and lower energy consumption, *Journal of Cleaner Production*, 335, (2022), Article 130061.

Seo, J., Park, S., Yoon, H.N., Lee, H.K. Effect of CaO incorporation on the microstructure and autogenous shrinkage of ternary blend Portland cement-slag-silica fume, *Construction and Building Materials*, 249, (2020), Article 118691.

Shen, Y., Li, Q., Huang, B., Liu, X., Xu, S. Effects of PVA fibers on microstructures and hydration products of cementitious composites with and without fly ash, *Construction and Building Materials*, 360, (2022), Article 129533.

Shi, Z., Wang, Q., Li, X., Lei, L., Qu, L., Mao, J., Zhang, H. Utilization of super-hydrophobic steel slag in mortar to improve water repellency and corrosion resistance, *Journal of Cleaner Production*, 341, (2022), Article 130783.

Shi, S., Li, H., Zhang, H., Basher, P.A.M, Bai, Y. Alkali-activated fly ash cured with pulsed microwave and thermal oven: A comparison of reaction products, microstructure and compressive strength, *Cement and Concrete Research*, 166, (2023), Article 107104.

Shoukry, H., Perumal, P., Abadel, A., Alghamdi, H., Alamri, M., Abdel-Gawwad, H.A. Performance of limestone-calcined clay cement mortar incorporating high volume ferrochrome waste slag aggregate, *Construction and Building Materials*, 350, (2022), Article 128928.

Qu, L., Song, W., Wang, Q., Xu, S., Hou, C. Effects of hydrophobic modified fly ash on resistance of chloride corrosion and water penetration of cement mortar in the early hydration stage, *Journal of Building Engineering*, 64, (2023), Article 105573.

Wang, Q., Feng, J., Yan, P. The microstructure of 4-year-old hardened cement-fly ash paste, *Construction and Building Materials*, 29, (2012), 114–119.

Wang, H.-Y., Tsai, S.-L., Hung, C.-C., Jian, T.-Y. Research on engineering properties of cement mortar adding stainless steel reduction slag and pozzolanic materials, *Case Studies in Construction Materials*, 16, (2022), Article e01144.

Zhang, Z., Zhang, B., Yan, P. Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, 105, (2016), 82–93.

BÖLÜM VII

ATIK LASTİK İLAVELİ KARMA BAĞLAYICILI ÇİMENTO HARÇLARININ MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ

Microstructure Properties of Cement Mortars Containing Composite Binder and Scrap Rubber

Levent BOSTANCI

(Doç.Dr.), Beykent Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu,
İnşaat Teknolojisi Programı, İstanbul, Türkiye
e-posta: leventbostanci@beykent.edu.tr
ORCID: 0000-0002-4686-9102

1. Giriş

Ekonomi, kültür, siyaset, nüfus ve ulaşım merkezi olan mega şehirlerin global düzeyde her geçen gün genişlemesi bu şehirlerdeki insan kaynaklı sera gazı oluşumunu da hızla arttırmakta ve artış trendindeki sera gazı emisyonları ise günümüzde iklim değişikliğini tetikleyen en önemli küresel unsur olarak değerlendirilmektedir (Pan ve diğ., 2023). Barınma amaçlı olarak inşa edilen binaların günümüzde CO₂ emisyonlarının yaklaşık %40'ından sorumlu olduğu bilinmekte ve bu sebeple Dünya Yeşil Bina Konseyi gibi sürdürülebilirlik temalı kuruluşlar, bina ve inşaat sektörünün mevcut CO₂ emisyonlarının ivedilikle 84 Gt azaltılması ve 2050 yılına kadar da net sıfır emisyon üreten bina üretimi hedefleri üzerine politikalar gerçekleştirmektedir (Ahmed ve diğ., 2021). Dünyadaki hemen hemen tüm ülkeler artan sera gazı tehditline karşın sürdürülebilir iklim politikalarını benimsemiştir ve birçoğu net sıfır emisyon elde etmeyi veya iklim direncini artırmayı taahhüt etmiş düzeydedir (Dudley ve diğ., 2022). Sera gazı emisyonlarının neden olduğu iklim değişikliği insanlık için en büyük tehditlerden biri olarak karşımıza çıkmakta ve şimdiden insanların yaşam şeklini değiştirmiş durumdadır (Hu ve diğ., 2022). İklim

değişikliğinin hem insan sağlığı üzerinde olumsuz bir etkisi hem de ekonomik bir maliyeti vardır. Bu nedenle, araştırmacılar ve politika yapıcılar en çok özeni iklim değişikliğini azaltan anahtar çözümlere odaklanmıştır (Skeiryte ve diğ., 2022).

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, bina ve inşaat sektörleri, küresel nihai enerji tüketiminin %36'sını ve toplam CO₂ emisyonlarının da %40'ını oluşturmaktadır. İlaveten binalar ve iklim değişikliği arasında karşılıklı bir etkileşim vardır. Birbirine paralel olarak binalardaki enerji kullanımı iklim değişikliğine katkıda bulunur ve iklim değişikliği de genellikle artan enerji kullanımına yol açar (Amaripadath ve diğ., 2023). Bu noktada mevcut sera gazı salınımının azaltılmasında inşaat sektörüne ve sektörün en büyük çıktısı olan çimento üretim endüstrisine büyük bir sorumluluk düşmektedir. Son birkaç yüz yıllık süreçte insan toplumunun gelişimine dünyanın en çok insan eliyle üretilen maddelerinden biri olarak kabul edilen çimentonun katkısı yadsınamaz düzeydedir (Cheng ve diğ., 2023). Küresel çapta açığa çıkan toplam CO₂ salınımım %7-8 kadarı çimento üretimi kaynaklı olup tüm çimento tipleri arasında baskın bir üretim miktarına sahip olan Portland çimentosu kireçtaşı ve kalkerin 1450 °C derecelere kadar ısıtılması neticesinde her 1 tonluk üretimi için 712 kg ile (Avrupa ortalaması) 798 kg (Dünya ortalaması) arasında değişen düzeyde CO₂ salınımına yol açmaktadır (Georgiades ve diğ., 2023). Öte yandan, Portland çimentosunun elde edilmesi esnasında genellikle kömür gibi fosil yakıtlar kullanılmakta ve bu esnada harcanan enerji global düzeyde harcanan toplam enerjinin neredeyse %15'ine denk gelmektedir (Kukreja ve diğ., 2023). Bu noktada çimento üretimi neticesinde açığa çıkan sera gazını iki ana kaynağa bağlı olarak ifade etmek mümkün olacaktır. Bunlardan ilki yakıtla ilgili emisyonlar ve diğeri üretim faaliyetleri esnasındaki süreçten dolayı kaynaklanan emisyonlar. Yakıtla ilgili emisyonlar çoğunlukla 1450 °C civarında bir sıcaklığa ulaşmak için gereken termal enerji ile ilişkilidir, bu aşamada sinterleme olarak adlandırılan reaksiyonlar gerçekleşir ve Portland çimentosunun ana bileşeni olan klinker elde edilir. Üretim faaliyetleri esnasındaki süreçten dolayı kaynaklanan emisyonlar ise ham maddedeki karbonatların içeriğinden kaynaklanır. Karbonatlar, özellikle kalsiyum karbonat, klinker ham maddesinin yaklaşık %60'ını oluşturur ve 800 °C'de gerçekleşen kalsinasyon, çimento üretimi kaynaklı CO₂ emisyonlarının en büyük kısmını (yaklaşık %70 düzeyi) oluşturur (Sousa ve diğ., 2023). Üretim faaliyetleri esnasındaki süreçte de yaklaşık her 1 ton'luk Portland çimentosu üretimi için yaklaşık 1.5 ton doğal hammadde tüketimine ihtiyaç duyulduğu da bilinmektedir. Bu noktada

günümüzdeki sürdürülebilirlik politikaları bu sakıncaları sıralanan sürecin daha çevre dostu bir forma dönüştürülmesi hedefiyle enerji verimliliğinin artırılması, alternatif yakıtların kullanılması, klinker alternatifi malzemelerin sorgulanması veya bütünleşmiş karbon depolama teknolojilerinin gelişimi ve yaygınlaşması gibi temel hedefler üzerine odaklanmaktadır (Galusnyak ve diğ., 2022). Portland çimentosu üretimi için yüksek enerji tüketimi gereksinimi, doğal hammadde kaynaklarının tüketimi ve majör sera gazı emisyonu direkt olarak ortaya çıkan sonuçlar olup ekosistemin bu sebeple dolaylı olarak giderek bozulması, toprak, su ve hava artışına ön ayak olunması daha sürdürülebilir bir dünya için inşaat sektörünün gelişiminin mevcut duruma bir alternatif olarak sürdürülebilir yapı malzemeleri ile devamını zorunlu kılmaktadır (Pires ve diğ., 2022).

Çimento esaslı karışımlarda geleneksel Portland çimentosu klinkeri yerine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi puzolanik özellik gösteren mineral kökenli malzemelerin kısmi düzeylerde çimento ikamesi olarak kullanılabilirliği çimento alternatifi sürdürülebilir yapı malzemesi üretimi için büyük bir potansiyel teşkil etmektedir (Chandar ve Santhosh, 2022). Yukarıda sıralanan mineral kökenli bağlayıcılar arasında uçucu kül, çimento esaslı karışımlara sunduğu avantajlarla günümüzde oldukça üzerinde sıkça çalışmalar yürütülen bir noktadadır. Uçucu kül, pulverize kömürün yanmasından elde edilen ince bir tozudur. Global düzeyde yılda yaklaşık 750 milyon ton uçucu kül üretilmekte ve inşaat endüstrisi büyük miktardaki bu yan ürünü işlemek için iyi bir saha olarak değerlendirilmektedir (Jin ve diğ., 2020). Üretilen toplam uçucu külün günümüzde Amerika Birleşik Devletleri istatistikleriyle yaklaşık %36'sının çimento esaslı karışımlarda çimentosunun kısmi ikamesi olarak kullanıldığı bilinmekte ve bu yeniden değerlendirilme sürecine yönelik olarak daha büyük bir potansiyeline karşın hala tam olarak karşılık bulmadığına dair bir göstergedir (Kang ve diğ., 2020). Halbuki partikül tane boyutu 8 ila 20 mm arasında değişen, yoğunluğu çimentodan daha az olan, kimyasal kompozisyonunda barındırdığı %45–60 düzeyindeki silika içeriği ile ciddi düzeyde puzolanik özellik gösterebilen uçucu külün çimento esaslı karışımlara sunabileceği katkılar oldukça geniş bir yelpazede sıralanabilir (Wang ve diğ., 2020). Üstelik uçucu külün puzolanik karakteristiği çeşitli süreçlerin kontrolünde arttırılabilmektedir. Termal aktivasyon, incelik yüzey alanını arttırmak için mekanik aktivasyon ve alkaliler yardımıyla amorf olmayan içeriğinin çözülmesiyle kimyasal aktivasyon işlemleri bu amaca yönelik olarak katkı sunabilmektedir (Nawaz ve diğ., 2020). Uçucu kül sayesinde minimum dozajdaki karma suyu ile sert ve küresel şekilli uçucu kül parçacıkları dahil

oldukları karışımların işlenebilirliği artırabilmektedir. Klinker partiküllerine kıyasla daha ince ve küresel şekilli uçucu kül parçacıkları çimento partikülleri ile iyi bir adhezyon yakalamakta ve bağlayıcı jel ve agregalar arasında daha iyi bağlanma sağlayan pürüzsüz çimento hamurunun üretimine ön ayak olmaktadır. Uçucu kül partikülleri hidrasyon esnasında kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmekte ve mukavemet artışına olanak sağlayan kalsiyum silikat hidrat oluşumunu desteklemektedir. En önemlisi de karışımlarda azalan çimento klinkerinin yerini alan uçucu kül varlığı sayesinde yukarıda bahsedilen üretim için harcanması gereken enerji miktarı ve açığa çıkacak CO₂ emisyonları azalarak sürdürülebilir bir yapı malzemesi elde edilmiş olunur (Sathiparan ve diğ., 2022).

Sınırlı düzeydeki geri dönüşüm teknolojisi nedeniyle, global düzeyde sürdürülebilirlik politikalarının üzerine yoğunlaştığı materyallerden biri de hurda konumuna gelmiş lastiklerdir (Shao ve diğ., 2020). 2021 Küresel Lastik Geri Dönüşüm Pazarı Raporuna göre, yıllık yeni lastik üretimi 1,6 milyar adet üzerine çıkmakta ve yaklaşık 1 milyar lastik de kullanım ömrünün sona ermesi ile atık bir ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Artan nüfus, büyüyen otomotiv endüstrisi sürekli olarak atık lastik oluşumunu tetiklemektedir. 2030 yılında büyüyen otomotiv sektörü ile lastik üretim miktarının 5 milyarı aşacağı tahmin edilmektedir (Letelier ve diğ., 2021). Atık lastik, biyolojik olarak parçalanamayan, doğası nedeniyle dünya çapında başta yangın riski ve çeşitli çevre sorunlarına neden olan oldukça yaygın bir malzemedir. Atık lastiğin uygun işlem görmeden doğrudan depolanması geniş bir depolama alanının ihtiyacına işaret eder ve bu alan da çeşitli haşere için insan sağlığını tehdit eden elverişli bir üreme ortamına neden olur (Yang ve diğ., 2023). Önceki dönemlerde atık lastiklerin yakılarak bertaraf edilmesi fikri tipik bir çözüm olarak ortaya çıksa da bu uygulamanın ciddi yangınlara, tehlikeli gaz salınımlarına ve çevre kirliliğine yol açacağı aşikardır (Ma ve diğ., 2023). Her şeyden önce açık alanlarda lastiklerin yakılması sırasında aromatik hidrokarbonlar, nitrojen dioksit, kükürt dioksit, karbon monoksit ve askıda kalan partiküllerin emisyonları üzerinde kontrol yapılmamakta ve sonuç olarak, hava kalitesi ve insan sağlığı kontrol edilemez bir şekilde tehdit altına girmektedir (Martínez-Barrera ve diğ., 2020). Son yıllarda çevre kirliliğine çözüm ve sürdürülebilirlik politikaları ile uyumlu olarak atık lastiklerin inşaat mühendisliğinde kullanımı alanı bulması söz konusu olabilmektedir. Günümüzde global düzeyde kişi başına ortalama 1 metreküp beton üretildiği istatistiği dikkate alındığında dünyada en çok kullanılan yapı malzemesinin tartışılmaz bir şekilde beton olduğu bilinmekte ve üretilen her 1 metreküp beton için de ortalama 0.6-0.7 metreküp kaba ve ince agrega

gerekmektedir. Bu sebeple agrega olarak kullanılabilme imkanı olan hurda lastikler, inşaat sektöründe yeniden kullanım için oldukça büyük bir potansiyele sahiptir (Mhaya ve diğ., 2020).

Öğütülmüş lastik partiküllerinin kırma, ufalama, ayırma, öğütme ve yıkama gibi bir takım fiziksel işlemlerden geçirildikten sonra çimento esaslı karışımlarda alternatif kaba/ince agrega olarak kullanılabilceği uzun yıllardan beri bilinmektedir. Öğütülmüş lastik partikülleri, dahil oldukları çimento esaslı malzemelerde birim ağırlığın azaltılmasına, elektrik direncinin ve ısı yalıtımının artırılmasına, süneklik ve tokluğun büyük ölçüde iyileştirilmesine ve güçlendirilmesine katkıda bulunan, iyi elastik deformasyona sahip viskoelastik bir malzeme olarak kabul edilir. Bu sayede agrega alternatifi olarak doğal kaynak kullanımı sınırlandırılabilmekte ve atık geri dönüşümü için uygulanabilirliği küresel boyutta olan bir global atık değerlendirilmesi politikası izlenebilmektedir (Li ve diğ., 2023). Çimento esaslı karışımlara ilave edilen geri dönüştürülmüş lastik partiküllerinin malzemenin başta çatlama dayanımı, aşınma direnci, dinamik etkilere karşı direnci, donma – çözülme etkilerine karşı direnci gibi gerek mekanik gerekse durabilite kökenli özelliklerini geliştirebildiği de bilinmektedir (Sun ve diğ., 2023).

2. Malzeme ve Yöntem

Bu çalışmada atık lastik partiküllerinin sürdürülebilir uçucu kül harçlarının mikroyapı özelliklerine olan etkisini araştırmak için ağırlıkça sabit dozajda yarı yarıya çimento ve uçucu kül içeren karma bağlayıcı harç karışımları tasarlanmış ve üretilen harç karışımlarına çimento ağırlığınca %2, %4ve %6 katkı oranlarında atık lastik partikülleri ilave edilmiştir. Üretilen harç karışımlarına ait karışım oranları Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1: Karışım Oranları.

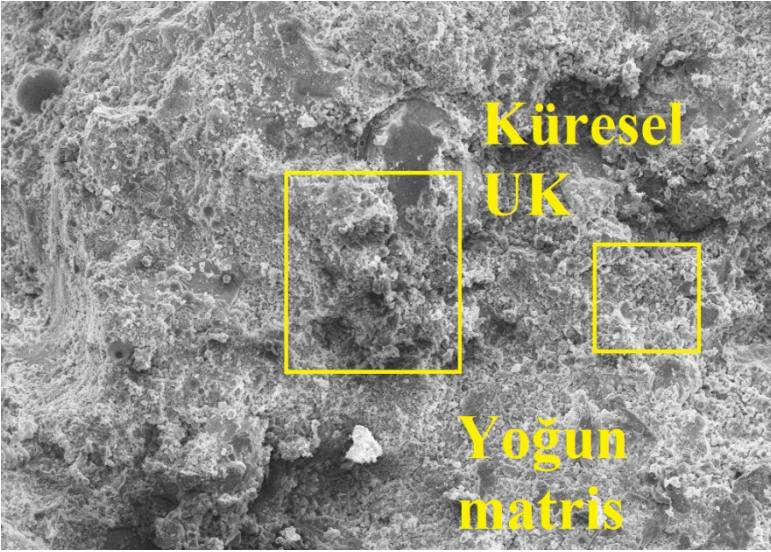
Numune	Bağlayıcı içerik		Atık Lastik	Su	Kum
	Çimento (% wt.)	Uçucu Kül (%wt.)	(%wt.)	(ml)	(g)
Kontrol	100	-	0		
%2 katkılı	50	50	2		
%4 katkılı	50	50	4	225	1350
%6 katkılı	50	50	6		

Yukarıda belirtilen karışım oranlarından elde edilen karışımlar 28 gün boyunca kür işlemine tabi tutulmuş ve mikroyapı özelliklerinin tespiti için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizine tabi tutulmuştur. SEM analizi LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

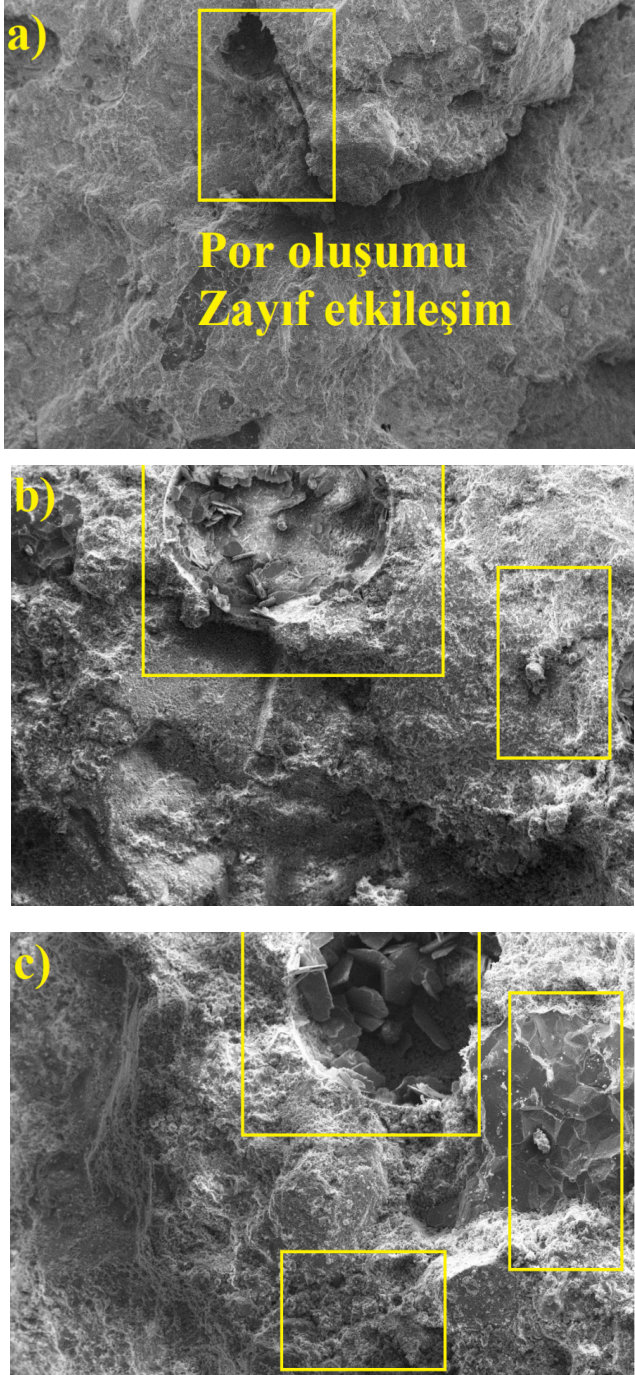
3.1 Katkısız ve %2 Atık Lastik Katkılı numunelerin Mikroyapı Özellikleri

Şekil 1'de atık lastik katkısı içermeyen karma bağlayıcılı kontrol numunesine ait mikroyapı görüntülemesi sunulmuştur.



Şekil 1. 200x büyütme ile kontrol numunesinin mikroyapısı.

Şekil 1'de görülmekte olan kontrol numunesine ait mikroyapı görüntülemesi incelendiğinde atık lastik katkısı içermeyen bu numune için oldukça yoğun olarak kabul edilebilecek bir matris yapısının oluştuğu görülmektedir. Öte yandan, hidrasyona katılmayan uçucu kül partikülleri ise küresel formdaki partikül morfolojileri sebebiyle matris üzerinde oldukça kolay fark edilebilmektedir.

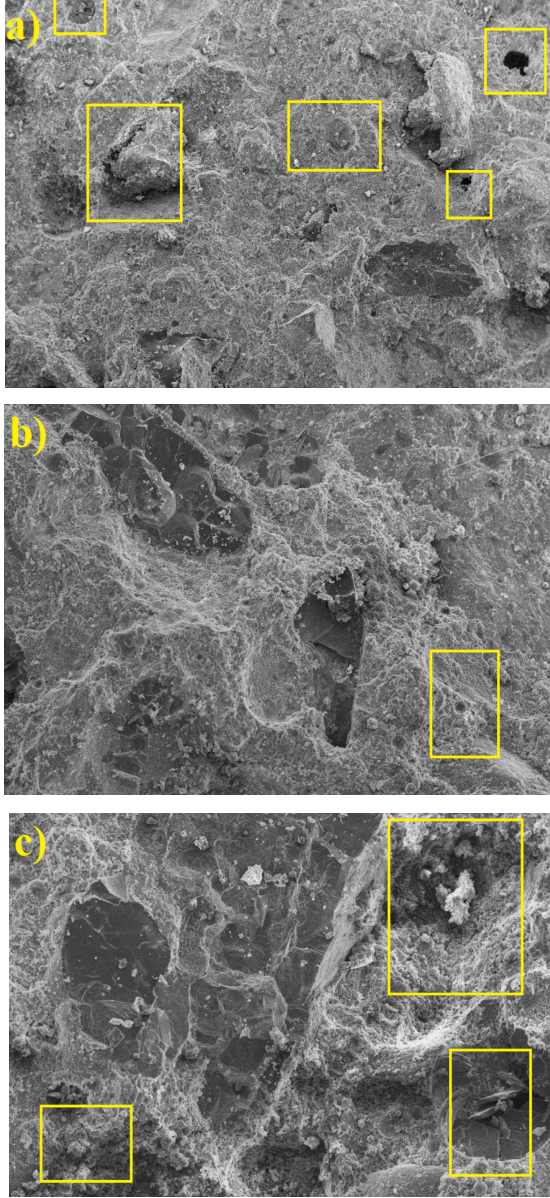


Şekil 2. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile %2 atık lastik katkılı harçların mikroyapı görüntülemeleri.

Şekil 2’de çimento ağırlığınca %2 atık lastik katkısı içeren numunenin sırasıyla 50x, 100x ve 200x büyütme oranları ile elde edilmiş mikroyapısı görülmektedir. Öncelikle, ilave edilen atık lastik içeriğine bağlı olarak matriste kısmi olarak boşluklar gözlemlenmektedir. Bu noktada katkısız durumdaki yoğun matris görünümünden uzaklaşıldığı söylenebilir. Geleneksel agregaya kıyasla lastik partiküllerin su itici karakteristikleri nedeniyle matris bölgelerinde heterojen dağılımlı olarak bağ kusurlarının oluştuğu gözlemlenebilir. Bu nedenle geleneksel agrega-çimento matrisine kıyasla lastik partikülü- çimento pastasında daha zayıf bir bağ yapısının oluşması muhtemeldir (Pham ve diğ., 2018). Bu durum mekanik dayanım düşüşlerine neden olması olası bir durum olsa da artan boşluk yapısı sebebiyle termal yalıtkanlık gibi özelliklerinin gelişmesini tetikleyebilecek bir mekanizmanın ortaya çıkmasına olanak sağlayabilir. Lastik partiküllerinin su tutmayan karakterinin iletkenlik özellikleri üzerindeki nem etkisi etkileşimiyle termal iletkenlik katsayısının düşüşünde rol oynaması beklenir (Záleská ve diğ., 2019).

1.2 %4 Atık Lastik Katkılı Numunelerin Mikroyapı Özellikleri

Şekil 3'te çimento ağırlığınca %4 düzeyinde atık lastik katkısı içeren numunenin sırasıyla 50x, 100x ve 200x büyütme oranları ile elde edilmiş mikroyapı özellikleri sunulmuştur.

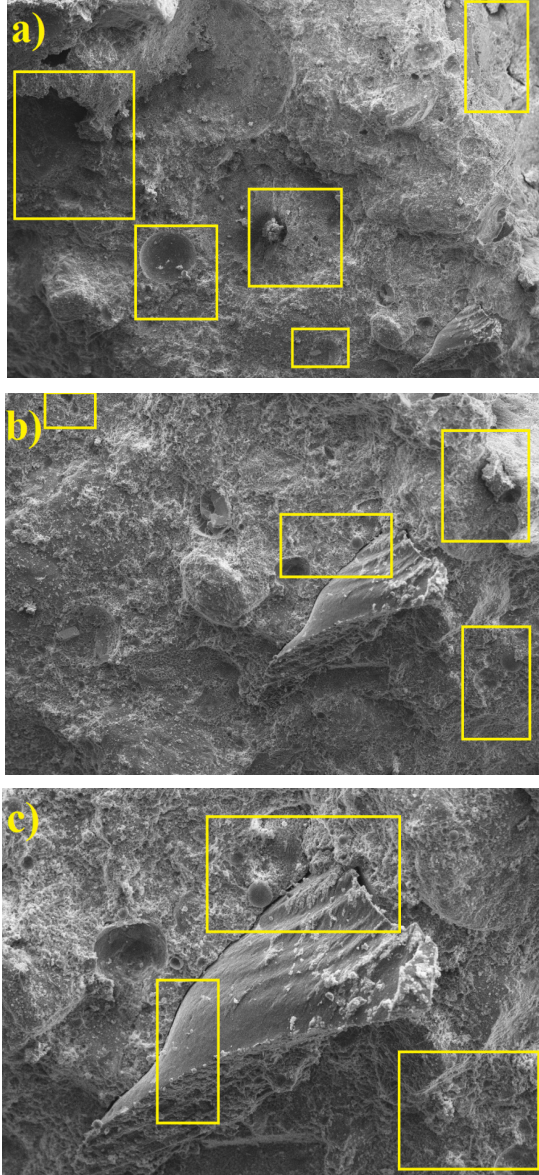


Şekil 3. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile %4 atık lastik katkılı harçların mikroyapı görüntülemeleri.

Şekil 3'te çimento ağırlığınca %4 atık lastik katkısı içeren numunenin sırasıyla 50x, 100x ve 200x büyütme oranları ile elde edilmiş mikroyapısı özellikleri görülmektedir. Artan hidrofobik karakterli lastik partikül miktarına bağlı olarak çimento matrisinde lokal olarak bağlayıcı malzeme – partikül etkileşiminden ötürü zayıf ve kusurlu bölgelerin oluştuğu gözlemlenmektedir. Yine lastik partiküllerinin dağıldığı bölgelerde partikül etrafında düzensiz boşlukların yer aldığı gözlemlenebilir.

1.3 %6 Atık Lastik Katkılı Numunelerin Mikroyapı Özellikleri

Şekil 4'te çimento ağırlığınca %4 düzeyinde atık lastik katkısı içeren numunenin sırasıyla 50x, 100x ve 200x büyütme oranları ile elde edilmiş mikroyapı görüntülemeleri görülmektedir.



Şekil 4. a) 50x, b) 100x ve c) 200x büyütme ile %6 atık lastik katkılı harçların mikroyapı görüntülemeleri.

Şekil 4’te çimento ağırlığınca %6 atık lastik katkısı içeren numunenin sırasıyla 50x, 100x ve 200x büyütme oranları ile elde edilmiş mikroyapı özellikleri görülmektedir. Artan katkı oranı ile hidrofobik karakterdeki lastik partiküllerin matris üzerindeki etkisinin belirginleştiği söylenebilir. Hapsolmuş hava miktarı, lastik partikülü – matris etkileşimi heterojen bir dağılım gösterecek şekilde artmıştır. Zayıf adhezyondan ötürü lastik partikülü etrafında çatlak benzeri bağ kusurları oluşmuştur. Lastik partiküllerinin mikroyapısal bazda oldukça pürüzsüz dokuda, düşük geçirimli, çapraz polimerik bağ yapısında bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle lastik partikülü – çimento ara etkileşim bölgesinde kalsiyum oksit kristallerinin yoğunlaştığı, alüminyum oksit ve silika fazlarının ise geleneksel duruma kıyasla seyreltiği bilinmektedir. Tüm bu özellikler lastik partikülü – çimento ara etkileşim bölgesinde zayıf bir adhezyonu ve doğuracağı olası mekanik dayanım düşüşlerini açıklamaktadır (Medina ve diğ., 2018). Esasen doğal agregaya kıyasla daha küresel olarak kabul edilemeyecek atık lastik partiküllerinin morfolojisi bu durumu destekleyen doğal bir mekanizma olarak olumsuz duruma katkı sunmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme içeriğinde sabit çimento dozajında çimento ikamesi olarak yarı yarıya uçucu kül ve çimento ağırlığınca %0, %2, %4 ve %6 atık lastik katkısı içeren harç numunelerinin mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Çalışmadan aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- Atık lastik katkısı içermeyen kontrol numunesinde atık lastik katkılı durumlara kıyasla çok daha sıkı ve yoğun bir matris görünümü gözlemlenmiştir.
- Atık lastik katkısı içeren numunelerde katkısız durumdan farklı olarak matris kusurları gözlemlenmektedir.
- Bu matris kusurlarının temel sebebi geleneksel agregaya kıyasla lastik partiküllerin su itici ve hava sürükleyici karakteristikleri olup bu sebeple matris bölgelerinde heterojen olarak bağ kusurlarının oluştuğu gözlemlenebilir.
- Atık lastik partiküllerinin özellikle etrafında yoğunlaşmış olan boşluklu matris kusurları numunelerin dayanım özelliklerinde düşüslere sebep verecek görüntüde de olsa başta termal yalıtım olmak üzere numunelerin bazı özelliklerinde arzu edilen gelişmeleri tetikleyebilecek seviyededir.

Kaynakça

Ahmed, N., Abdel-Hamid, M., El-Razik, M.M.A., El-Dash, K.M. Impact of sustainable design in the construction sector on climate change, *Ain Shams Engineering Journal*, 12, (2021), 1375–1383.

Amaripadath, D., Rahif, R., Zuo, W., Velickovic, M., Voglaire, C., Attia, S. Climate change sensitive sizing and design for nearly zero-energy Office building systems in Brussels, *Energy & Buildings*, 286, (2023), Article 112971.

Cheng, Y., Qi, R., Hou, J., Huang, Q. Feasibility study on utilization of copper tailings as raw meal and addition for low carbon Portland cement production, *Construction and Building Materials*, 382, (2023), Article 131275.

Chandar, S. P., Santhosh, R. Partial replacement of cement with alternative cementitious material in the production of concrete: A review, *Materials Today: Proceedings*, 68, (2022), 2421–2426.

Dudley, H., Jordan, A., Lorenzoni, I. Advising national climate policy makers: A longitudinal analysis of the UK Climate Change Committee, *Global Environmental Change*, 76, (2022), Article 102589.

Galusnyak, S.C., Petrescu, L., Cormos, C. Environmental impact assessment of post-combustion CO₂ capture technologies applied to cement production plants, *Journal of Environmental Management*, 320, (2022), Article 115908.

Georgiades, M., Shah, I.H., Steubing, B., Cheeseman, C., Myers, R.J. Prospective life cycle assessment of European cement production, *Resources, Conservation & Recycling*, 194, (2023), Article 106998.

Hu, Y., Zhang, Q., Hu, S., Xiao, G., Chen, X., Wang, J., Qi, Y., Zhang, L., Han, L. Research progress and prospects of ecosystem carbon sequestration under climate change (1992–2022), *Ecological Indicators*, 145, (2022), Article 109656.

Jin, Y., Feng, W., Zheng, D., Dong, Z., Cui, H. Structure refinement of fly ash in connection with its reactivity in geopolymerization, *Waste Management*, 118, (2020), 350–359.

Kang, S., Lloyd, Z., Kim, T., Ley, M.T. Predicting the compressive strength of fly ash concrete with the Particle Model, *Cement and Concrete Research*, 137, (2020), Article 106218.

Kukreja, K., Soni, M.K., Mohapatra, B., Panda, D.K. Impact assessment of alternative fuels on production Cost, plant operation and Environment-

case study of Indian cement industry, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, (2023), Article 103300.

Letelier, V., Bustamante, M., Muñoz, P., Rivas, S., Ortega, J.M. Evaluation of mortars with combined use of fine recycled aggregates and waste crumb rubber, *Journal of Building Engineering*, 43, (2021), Article 103226.

Li, H., Long, W.-J., Khayat, K. H. Efficient recycling of waste rubber in a sustainable fiber-reinforced mortar and its damping and energy dissipation capacity, *Cement and Concrete Composites*, 138, (2023), Article 104963.

Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., Du, G., Li, Y. Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass, *Ceramics International*, 49, (2023), 16951–16970.

Martínez-Barrera, G., Coz-Díaz, J.J., Álvarez-Rabanal, F.P., López Gayarre, F., Martínez-López, M., Cruz-Olivares, J. Waste tire rubber particles modified by gamma radiation and their use as modifiers of concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 12, (2020), Article e00321.

Medina, N.F., Garcia, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., Raffoul, S. Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction, *Construction and Building Materials*, 188, (2018), 884–897.

Mhaya, A. M., Huseien, G.F., Abidin, A.R.Z., Ismail, M. Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes, *Construction and Building Materials*, 256, (2020), Article 119505.

Nawaz, M.A., Ali, B., Qureshi, L.A., Aslam, H. M. U., Hussain, I., Masood, B., Raza, S.S. Effect of sulfate activator on mechanical and durability properties of concrete incorporating low calcium fly ash, *Case Studies in Construction Materials*, 13, (2020), Article e00407.

Pan, G., Li, X., Pan, D., Liu., W. Decoupling effect and driving factors of carbon footprint in megacity Wuhan, Central China, *Ecological Processes*, (2023), 12- 23.

Pham, N.-P., Toumi, A., Turatsinze, A. Rubber aggregate-cement matrix bond enhancement: Microstructural analysis, effect on transfer properties and on mechanical behaviours of the composite, *Cement and Concrete Composites*, 94, (2018), 1–12.

Pires, M., Fidelis, R.J.A., de Resende, D. S., Bezerra, A. C. S. Phosphate rock waste in the production of cement tile, *Results in Engineering*, 16, (2022), Article 100701.

Shao, J., Zhu, H., Zuo, X., Lei, W., Borito, S.M., Liang, J., Duan, F. Effect of waste rubber particles on the mechanical performance and deformation properties of epoxy concrete for repair, *Construction and Building Materials*, 241, (2020), Article 118008.

Skeiryte, A., Krikštolaitis, R., Liobikienė, G. The differences of climate change perception, responsibility and climate-friendly behavior among generations and the main determinants of youth's climate-friendly actions in the EU, *Journal of Environmental Management*, 323, (2022), Article 116277.

Sousa, V., Bogas, J.A., Real, S., Meireles, I., Carriço, A. Recycled cement production energy consumption optimization, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 32, (2023), Article 101010.

Sun, S., Han, X., Chen, A., Zhang, Q., Wang, Z., Li, K. Experimental Analysis and Evaluation of the Compressive Strength of Rubberized Concrete During Freeze–Thaw Cycles, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, (2023), 17-28.

Wang, J., Liu, M., Wang, Y., Zhou, Z., Xu, D., Du, P., Cheng, X. Synergistic effects of nano-silica and fly ash on properties of cement-based composites, *Construction and Building Materials*, 262, (2020), Article 120737.

Yang, G., Fan, Y., Li, X., Xu, Y. Influence of rubber powder size and volume fraction on dynamic compressive properties of rubberized mortar, *Powder Technology*, 420, (2023), Article 118376.

Záleská, M., Pavlík, Z., Cítek, D., Jankovsky, O., Pavlíková, M. Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability, *Construction and Building Materials*, 225, (2019), 709–722.

BÖLÜM VIII

BİLYELİ HADDELEME VE DERİN HADDELEME YÖNTEMLERİ*

Ball Burnishing and Deep Rolling Methods

Oktay Adıyaman^{1} & Feyza AYDIN² & Musa KILIÇ³**

^{1**}(Dr.Öğr.Üyesi), Batman Üniversitesi, oktay.adiyaman@batman.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-2674-3836

²(Yüksek Lisans öğrencisi), Batman Üniversitesi, feyzaay7272@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2836-1030

³(Doç. Dr.), Batman Üniversitesi, musa.kilic@batman.edu.tr
ORCID: 0000-0001-5808-6917

1. Giriş

İş parçalarının işlenen yüzeylerindeki yüzey pürüzlülükleri gibi olumsuzlukları düzeltmek için yüzeylere taşlama (Çetin vd., 2018), honlama, lepleme (Akyüz, 2020), ses titreşimleri ile derin haddeleme (Zhu vd., 2009; Bozdana vd., 2008) farklı yüzey kaynak yöntemleri (Kiliç vd., 2020) gibi iyileştirici işlem metotları uygulanmaktadır. Yüzeylerin iyileştirilmesi için uygulanan işlem yöntemlerini iki ana kategoriye ayırabiliriz. İlk olarak lepleme, honlama, taşlama vb. yöntemler gibi malzemede hacim ve ağırlık kaybını içeren, ikinci olarak ta bilyeli haddeleme (ball burnishing) ve derin haddeleme (deep rolling) işlemleri gibi malzemede hacim ve ağırlık kaybını içermeyen ve yüzey üzerinde dağıtma ile yüzeyin plastik olarak sıkıştırılmasına bağlı olarak çalışan işlemlerdir (Prabhu vd., 2011) (Şekil 1).

Haddeleme yöntemi, iş parçası dış ve iç yüzeylerinin talaş kaldırmadan ezilmesi suretiyle iyileştirilmesi yöntemine verilen isimdir. Bu işleme yöntemi ile elde edilen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerini azaltmakta ve işlenen

parçanın mekanik özelliklerinin de (yüzey sertleşmesi, aşınma direnci, yorulma direnci) olumlu yönde iyileşmesini sağlamaktadır. Bu bakımdan, bilyeli ve derin haddeleme prosesi, bu özelliklerin istenildiği hallerde taşlama, honlama (yüzey ve silindirik) vb. proseslere göre daha çok tercih edilen prosesler olarak tanınmaktadır (Başak vd., 2015).

Frezeleme, taşlama, parlatma, honlama, alıştırma vb. yüzey pürüzlülüğü değerini iyileştirmek için birçok işleme metodu kullanılması yanında haddeleme işlemleri de bu amaçlar için kullanılan işleme metotlarından biridir. Derin ve bilyeli haddeleme takım tutucu ucunda ezme ve düzleştirme aracı olarak ve bilye olarak tabir edilen daha çok küresel formdaki bir uç ile uygulanan bilyeli ve derin haddelemede, parçadaki yüzey üzerinden talaş kaldırmadan plastik deformasyon yoluyla soğuk şekillendirme işlemi olarak tanımlanmaktadır.



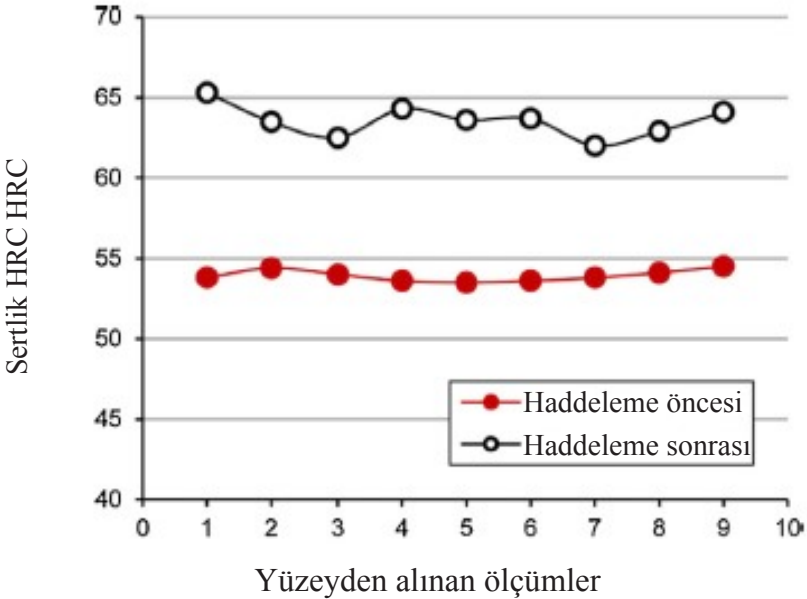
Şekil 1. Yüzeylerde İyileştirme Metotları

Bu son işlemin amacı, boyutsal bir doğruluk elde etmekten daha çok parça yüzeyinde daha iyi bir yüzey pürüzlülük değeri elde etmek, iş parçasının aşınma ve korozyon dirençlerini arttırmak, işlenen parça ile ilgili yorulma ve çekme dayanımlarında iyileştirmeler yapmak ve parça yüzeyinde iyileştirilmiş mikrosertlik değerlerini elde etmek olarak açıklanabilmektedir (Başak vd., 2015).

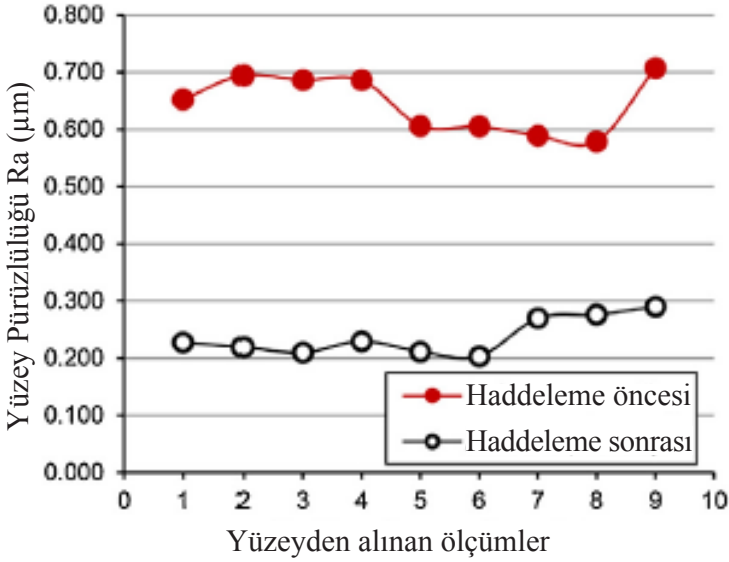
Yüzey düzeltme metotlarından ilk ve en çok uygulanan metot olan bilyeli haddeleme metodunda, yüzey üzerine ayarlanmış bir kuvvet miktarı ile basınçla uygulanan yuvarlanma elemanı, yüzeyleri ezerek ve talaş almadan, yüzey üzerindeki tepe olarak tanımlanacak çıkıntıları küçük plastik deformasyonlara uğratarak yüzey bütünlüğünü iyileştirmektedir.

Perenda ve arkadaşları haddelemeden önce ve sonra, malzeme sertliği ve yüzey pürüzlülüğündeki değişimi Şekil 2 ve 3'te göstermişlerdir (Perenda vd., 2015).

Diğer bir yüzey iyileştirme yöntemlerinden derin haddeleme metodu teknik anlamda bilyeli haddeleme ile benzer özelliktedir. Metodun ilk uygulamaları olarak, Ford firmasının aks millerine uyguladığı yöntem olan derin haddeleme metodunun ilk olarak 1930'lu yıllarda uygulandığı görülmektedir (Varol, 2009). Bu yöntemde kendi eksenini etrafında dönme hareketi yapan parçanın yüzeyine yine küresel formda bir ezici uç ile yüksek veya düşük baskı kuvvetleri uygulanarak yüzey üzerinde çok ince bir tabakada gerilmeler meydana getirilmektedir. Bu yöntem medikal, nükleer endüstri, havacılık, otomotiv, paketleme, kimya ve tıp gibi alanlarda kullanılan yöntem, çoğunlukla farklı malzeme türlerinin haddeleme işleminde kullanılmaktadır (Özkan, 2006).

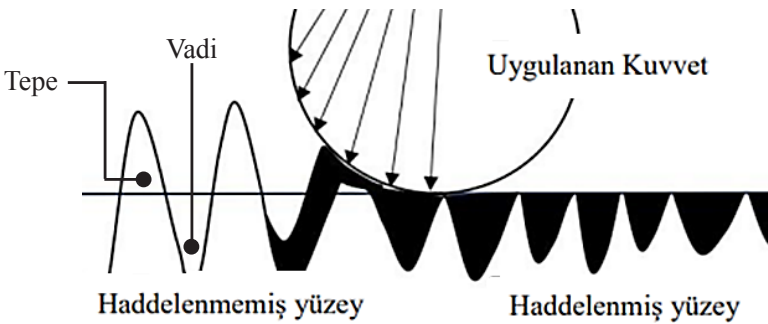


Şekil 2. Haddeleme öncesi ve sonrası yüzey sertlik değişimi (Özkan, 2006)



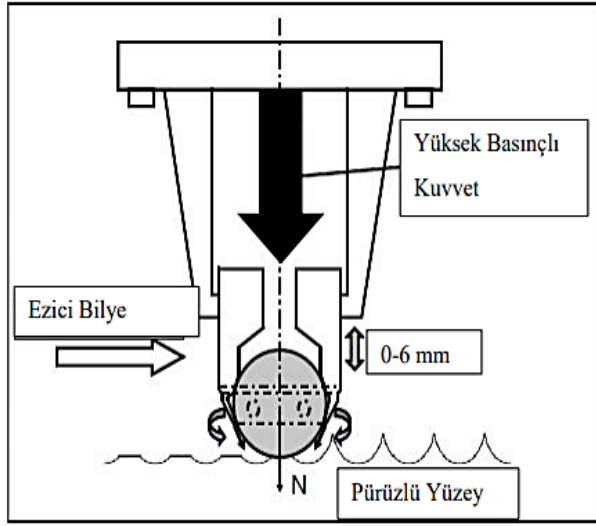
Şekil 3. Haddelenme öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değişimi (Özkan, 2006)

Bilyeli ve derin haddelenme öncesi işlenen bir parçanın yüzeyi incelendiğinde, Şekil 4'deki gibi elde edilen yüzeylerin gerçek anlamda düzlüklerden oluşmadığı, tam tersine yüzeyde tepe ve vadiye benzer girintilerin ve çıkıntıların olduğu görülecektir (Mendi, 1996). Bu işleme yönteminde, bilyeli haddelemeye benzer şekilde yüzey üzerindeki mikro tepeler küresel veya yuvarlamalı basma aparatı vasıtasıyla ezilerek ve plastik deformasyona uğratarak yüzeydeki mikro vadilere doldurulmaktadır. Derin haddelenmenin bilyeli haddelenmeden en belirgin farkı olarak, haddelenme takımının dönmeyerek sabit bir şekilde haddelenme işlemini yapması şeklinde belirtilebilir (Şekil 4).



Şekil 4. Haddelenmede Yüzey Plastik Deformasyonu (Öcalır, 2009)

Bilyeli ve derin haddeleme işlemi, işlenen parçaların düz, silindirik, konik, eğrisel formu iç ve konik dış yüzeylerine uygulanabildiği gibi tormalanmış ve taşlanmış iş parçalarının dış ve iç yüzeylerine de uygulanabilmektedir (Özkan, 2006; Mendi, 1996). Bu yöntemde, Şekil 5'te görülen şematik gösteriminde, yüzeye belirli bir baskı kuvveti ile temas ettirilen yuvarlanmalı veya sabit bir ezici takım yardımıyla yüzeylerden talaş kaldırmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepelerinin plastik deformasyona uğratılması ile düzleştirilmesi ve başka bir tanımlama ile soğuk şekillendirilmesi sağlanmaktadır (El-Axir vd., 2003; Başak vd., 2015).



Şekil 5. Bilyeli ve Derin Haddede Ezici Ucun ve İş Parçasının Hareketi (Avilés vd.,2013)

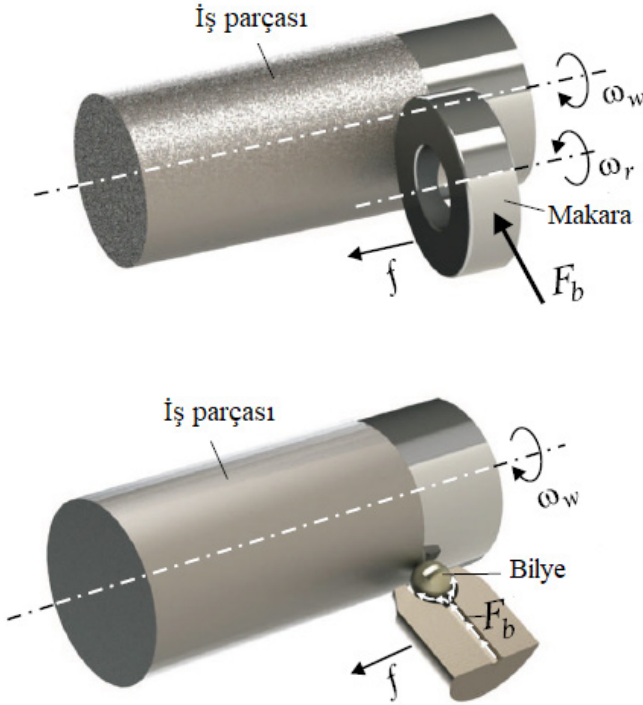
Yuvarlanmalı veya sabit haldeki ezici takım için gerekli olan baskı kuvveti (basınç), yay, hidrolik veya manyetik baskı yöntemleri ile elde edilememektedir. İşlem sonucunda, malzeme yüzeyinde yüzey sertliği artış gösterirken, yüzey pürüzlülük değerinde de önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir. Yüzey üzerine uygulanan baskı miktarına bağlı olarak, düşük ve yüksek baskılı haddeleme olmak üzere iki farklı aralıkta adlandırılmaktadır. Yüksek baskılı haddelemede yüzey üzerine genellikle 30 MPa baskı kuvvetinden daha yüksek basınçlar uygulandığından, yüzey den içe doğru meydana gelen artık çekme gerilme derinliğinin 1 mm'nin üstüne çıktığı tespit edilmiştir (Akyüz, 2020).

Düşük baskılı deformasyon haddeleme uygulamaları ise genellikle kalıp yüzeylerinin, mil, türbin kanat bağlantı kısımlarının, araç süspansiyon sistemlerinin, kaynaklı bağlantıların ve yatak yüzeylerinin iyileştirilmesi istenen parçalara uygulanmaktadır (Rodríguez vd., 2016). Bilyeli ve derin haddeleme yöntemleri, geleneksel finiş tornalama, taşlama, honlama ve lebleme gibi yöntemlere kıyasla ortalama 15 kat daha ekonomik yöntemlerdir. İşlem sonucunda ayrıca, yüzeydeki çekme gerilmeleri basma gerilmelerine evrildiğinden dolayı, yorulma ömründe daha büyük iyileşme görülmektedir (Akyüz, 2020).

2. Haddelemede Kullanılan Temel Haddeleme Elemanları

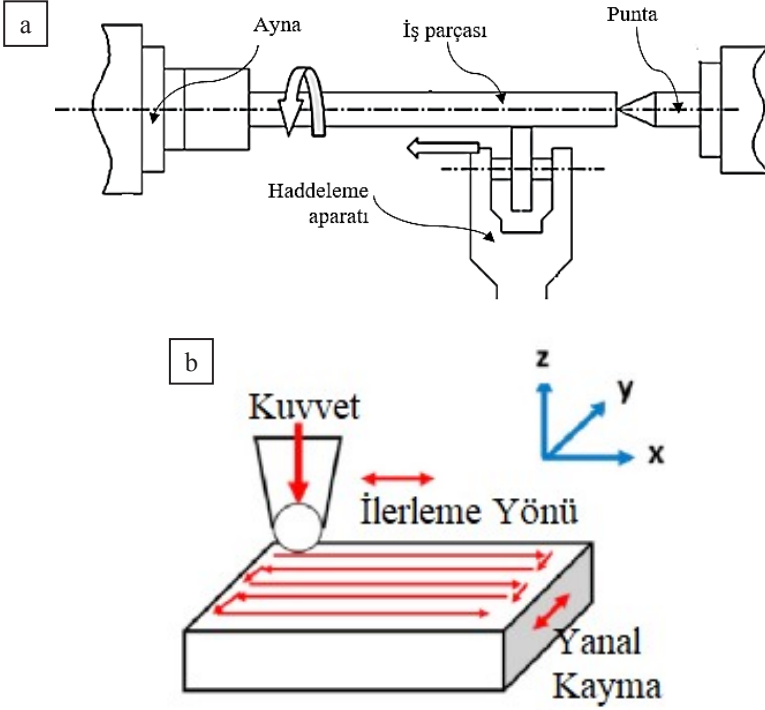
Bilyeli haddeleme ve derin haddelemede çoğunlukla kullanılan haddeleme takımları olarak makara sistemli ve bilyeli tip olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 6).

Ayrıca haddeleme işlemi, yumuşak ve sünek malzemelerde uygulanabildiği gibi sert metallerde de uygulanabilmektedir.



Şekil 6. Makaralı ve Bilyeli Haddeleme Takımları (Maximov vd., 2020)

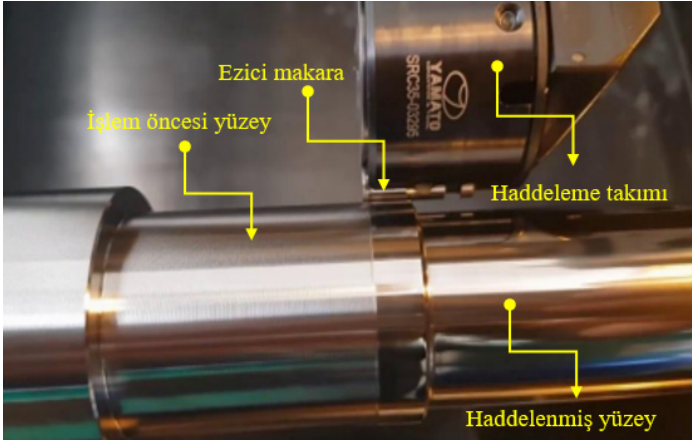
Bilyeli ve derin haddeleme işlemleri ayrıca hem freze tezgâhlarında hem de torna tezgâhlarında uygulanabilmektedir. Aşağıdaki şekillerde (Şekil 7) bu işlemlerin şematik gösterimleri görülmektedir.



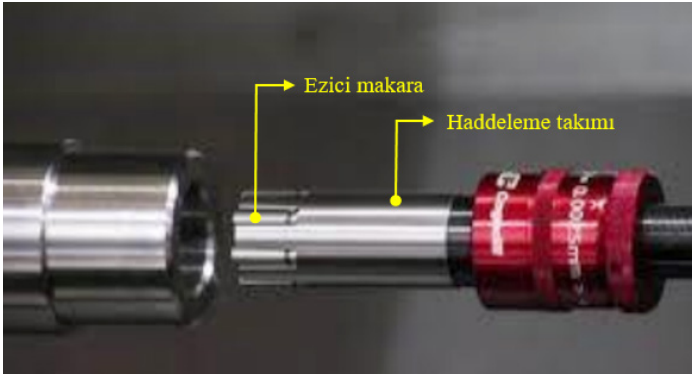
Şekil 7. Bilyeli ve Derin Haddeleme Uygulamaları (a) Torna (Hassan, 1997)
(b) Freze (Uddin vd., 2021)

Şekil 7 a incelendiğinde haddeleme işlemi, haddeleme aparatı üzerindeki ezici olarak dönen bir makaranın iş parçası üzerinde ilerletilmesi şeklinde bir hareketle uygulanmaktadır. Aparata bağlı ezici uç yardımıyla basınç uygulanmakta ve ezici uç takımına hareket verilerek parça eksenini boyunca ilerleme ile yüzey ezilmektedir.

Parçada düzeltilecek yüzey kalınlığı malzeme özelliklerine göre farklı ve genel olarak maksimum 15-20 mikron (μm), taşlama işlemi uygulanmış yüzeylerde bu değer maksimum 6-8 μm olarak öngörülmüştür (Livio, 2002). Bilyeli ve derin haddeleme ayrıca hem dış yüzeylerde hem de delik içine de uygulanabilen yüzey iyileştirme yöntemlerindedir. Burada önemli olan haddeleme takımlarının tasarımıdır. Şekil 8 ve 9'da, endüstride kullanılan ve firmalarca satılan iç ve dış haddeleme takımları görülmektedir.



Şekil 8. Dış haddeleme takımı (Yamato, 2023)



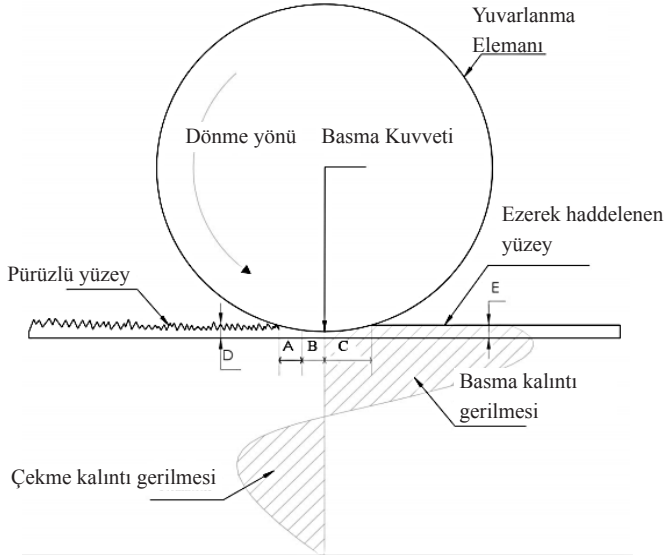
Şekil 9 İç (delik) Haddeme Takımı (Cogsdill, 2023)

3. Haddeme Mekanığı

Hem bilyeli haddelemede hem derin haddeleme yöntemlerinde Hertzian teorisi esas alınmakta oluşan mekanik bununla açıklanmaktadır (Broszeit, 1984). Bu durum, temas edilen bölgedeki iş parçası ile küresel ezici bilye ucu arasındaki elde edilen yüzey basıncı etkisi temeline dayanmaktadır. Uygulanan yüzey basıncı ile malzemenin akma mukavemeti aşılarak yüzey üzerinde ve hemen alt tabakada kalıntı gerilmeler ve mikro yapısal deformasyonlar elde edilmektedir (Berstein vd., 1982; Altenberger, 2003; Altenberger, 2000). Ezici uç ile yüzeyde sıkıştırma işlemi yapıldığında, sıkıştırma ile oluşan etki yüzey boyunca ince bir plastik deformasyona dayalı şekil değişimine sebep olmaktadır ve oluşan deformasyon malzeme yüzeyinden içeriye doğru birkaç mikron derinliğe kadar görülebilmektedir. Plastik deformasyondan kaynaklanan kalıntı

basma gerilmeleri malzeme yüzeyinden atılmaktadır. Bu işlemin uygulanması ile malzeme yüzeyinin korozyon direnci, yorulma dayanımı, aşınma direnci gibi mekanik özelliklerinin diğer yüzey işlemlerine göre daha da iyileştirildiği belirtilmektedir (Prafulla vd., 2011).

Bilyeli ve derin haddeleme işleminde ezici uç olan küresel veya silindirik ucun yüzeyi ezme işlemi ve kalıntı gerilme dağılımı Şekil 10'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 10. Bilyeli ve Derin Haddelemede Malzemede Meydana Gelen Gerilme ve Deformasyon (Akkurt vd., 2009)

Şekil 10 incelendiğinde, talaşlı işleme metodları ile işlenmiş iş parçasının (tornalama, taşlama, delme, raybalama) yüzeyine bilyeli haddeleme veya derin haddelemedeki ezici uç ilk temas noktası A bölgesinde oluşmakta, ezici ucun ilerlemesi sonucunda B bölgesinde uygulanan baskı kuvveti nedeniyle malzeme akma noktasına geçmektedir. Ayrıca B bölgesinde D bölgesindeki mikro yüzey pürüzlülüklerin tepe noktaları plastik deformasyona uğratarak ezilmektedir. C bölgesine bakıldığında ise plastik deformasyona uğrayan yapıda ezme sonrası malzemede elastik geri dönüşüm meydana gelmektedir. E bölgesinde ise ezici uç malzemeye son kez temas etmekte ve bunun sonucunda yüzeyin parlak, pürüzsüz ve istenilen boyutsal değerlere getirilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca bilyeli haddeleme sırasında malzeme yüzeyinde oluşan gerilme yüzeyden eksene doğru azalmaktadır. Oluşan gerilme miktarları haddelemeye yöntemine,

Şekil 11 incelendiğinde, bilyeli haddeleme işlemindeki oluşan teğetsel kuvvetin (F_y), normal kuvvetten (F_z) büyük olması durumunda ince talaşlar oluşmaktadır ya da normal kuvvetin (F_z) teğetsel kuvvetten (F_y) büyük olması durumunda da tersi bir durumun oluşma ihtimali de bulunmaktadır. Şekil 11'den, denklem kullanılarak en geniş penetrasyon derinliği (nüfus etme derinliği) 1 nolu denklemden elde edilebilmektedir (Luo vd., 2006).

$$a_p = \rho - h = \rho(1 - \cos\psi) \quad (1)$$

Denklem 1'de ρ sembolü haddeleme bilyesinin yarıçapı olarak alındığında, $\psi = 45^\circ - \varphi = 45^\circ - \tan^{-1}(F_f/F_N)$ ve bilyeli haddelemede sürtünme açısı $\varphi = 6^\circ \sim 17^\circ$ arasında elde edilmektedir. Diğer bir ifadeyle;

$$a_{pmax} = (0,117 - 0,223)\rho \quad (2)$$

Eşitliği elde edilmektedir. Gerekli olan bilyeli haddeleme kuvveti ise denklem 3'te gösterildiği şekliyle bulunabilmektedir.

$$F = \sigma A \quad (3)$$

Bu denklemde σ , malzemenin akma gerilmesidir, A ise haddeleme bilyesinin yüzeye olan temas alanıdır ve 4 nolu denklem elde edilmektedir.

$$A = \frac{1}{2}\pi\rho^2(1 - \cos\alpha) \quad (4)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\rho - a_p}{\rho}\right) \quad (5)$$

Denklem 2 ve denklem 5'ten maksimum haddeleme kuvveti elde edilebilir.

$$F_{max} = 0,223\pi\sigma\rho^2 \quad (6)$$

Bilyeli haddeleme işlemi amaç olarak yüzey sertleştirilmesi, boyutlandırma ve düzleştirme gibi amaçlar ile kullanılmaktadır. Takım ile iş parçası yüzeyi arasındaki temas alanı Şekil 8'de görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü üzere bilye ile malzeme arasındaki temas, yüzeydeki pürüzlülüğü oluşturan çıkıntılar ile dairesel bilye arasında meydana gelmektedir. Dolayısıyla, gerçek temas alanı

genellikle görünür temas alanından çok daha az olmaktadır. Bu nedenle, ihtiyaç duyulan parlatma kuvvetinin büyüklüğü denklem 6'da hesaplanan maksimum haddeleme kuvvetinden daha küçük elde edilecektir (Luo vd., 2006).

4. Bilyeli Haddeleme ve Derin Haddeleme Yönteminin Temel Parametreleri

Bilyeli ve derin haddeleme yöntemi uygulanırken diğer işleme yöntemlerindeki gibi farklı işleme parametreleri bulunmaktadır. Kullanılan bu parametrelerin en belirleyici olanları ilerleme hızı, baskı kuvveti (hadde basıncı), paso sayısı gibi temel değişkenlerdir. Bu yöntemler uygulanırken parametrelerin doğru değer aralıklarında seçilmesi beklenen yüzey özelliklerinin elde edilebilmesi için (Akyüz, 2020).

4.1. İlerleme Hızı

İlerleme hızı, klasik anlamda kesici ucun doğrusal olarak malzeme üzerinde dakikada veya bir devirde aldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır ve birimi mm/dak veya mm/dev şeklindedir. İlerleme değeri talaşlı imalatta malzeme cinsi, kesici tipi, kesme tipi gibi çok farklı parametreye bağlı olarak farklı değerler alabilmektedir. Talaşlı imalatta malzemeye uygun optimum ilerleme hızı yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiş ve katalog haline getirilmiştir. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yönteminde de talaşlı imalattakine benzer olarak, iyi sonuçlar elde etmek amacıyla ilerleme hızı çoğu çalışmada en önemli parametre olarak belirtilmektedir. Fakat yöntemin yeni oluşu ve deneysel çalışmaların yeterli düzeyde olmaması sebebiyle her malzeme için bu değer tam olarak bilinmemektedir (Akyüz, 2020). Çalışmaların çoğunda özellikle de yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değerlendirilmesinde en etkin parametrelerden biri olarak ilerleme değeri belirtilmektedir.

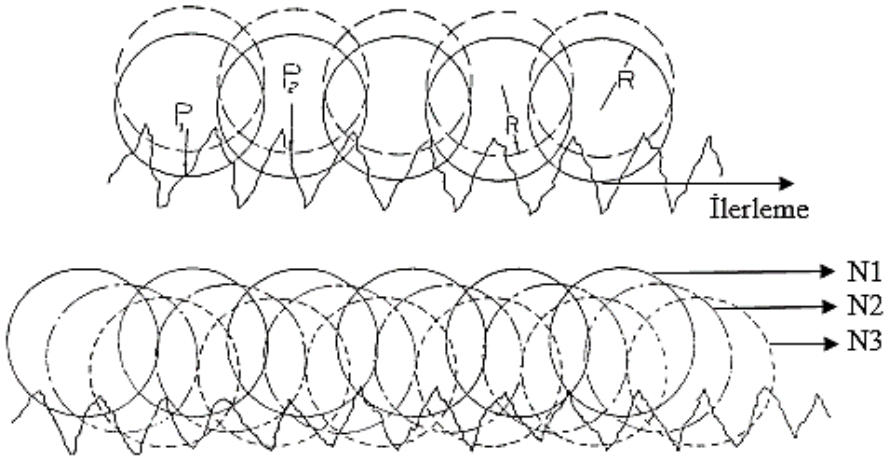
4.2. Haddeleme Kuvveti (Baskı Kuvveti)

Ezici ucun farklı basınç yöntemleri kullanılarak malzeme yüzeyine uyguladığı yük miktarı olarak tanımlanan haddeleme kuvvetinde birim olarak genellikle Newton (N) kullanılmaktadır. Bazı çalışmalarda bar veya kg olarak ifade edilmektedir. Bilyeli haddelemede ve derin haddelemede haddeleme kuvveti yüzey üzerindeki plastik deformasyonu etkilemesi, akma noktasının geçilmesi anlamında etkili olması nedeniyle önemli bir parametredir. Baskı kuvvetinin yüksek seçilmesi durumunda malzemede istenmeyen şekil

değişimlerin oluşmasına ve yüzeyde de deformasyon miktarının fazla olmasına neden olabilmektedir. Bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yönteminde temel prensip, yüzeydeki tepe noktalarının plastik deformasyona uğratarak çukur bölgelerin doldurulması esasına dayanmaktadır. Böylece yüzeydeki tepe ve çukur noktaları birbirine yaklaştırılarak daha düzgün hale getirilmektedir. Tüm bu şekil değişimine doğrudan etki etmesi sebebiyle baskı kuvvetinin uygun seçilmesi bilyeli haddeleme yönteminde çok büyük önem arz etmektedir (Akyüz, 2020). Uygulanacak kuvvetin malzemenin akma sınırını aşacak şekilde verilmesi de ayrıca gerekmektedir. Aksi durumda haddeleme olayından bahsetmek mümkün değildir.

4.3. Paso Sayısı

Paso sayısı ezici ucun yüzey üzerinde ilerleme yönünde kaç kez uygulandığı ve haddeleme işleminin tekrar edilmesi noktasında birimsiz bir parametredir. Farklı parametrelere göre bu değer belirlenmekte ve haddeleme işlemi tekrar edilebilmektedir. Yüzey özelliklerini istenilen ölçülere getirmek amacıyla bilyeli ve derin haddeleme işlemi tek seferde veya istenilen sayıda tekrar edilebilmektedir (Akyüz, 2020). Şekil 12’de de görüldüğü üzere ilk pasoda yüzey üzerindeki tepe noktalarının bir kısmı plastik deformasyon sonucu çukur (vadi) kısımlara kademeli olarak doldurulmakta sonrasında da aynı işlem ikinci ve üçüncü pasolarla kalan çukur kısımların doldurulması şeklinde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 12. Paso Sayıları ile Yüzey Düzeltme Aşamaları (Hassan, 1997)

5. Bilyeli ve Derin Haddeleme Yönteminin Avantajları

Bilyeli ve derin haddeleme yöntemi diğer yüzey düzeltici işlemlere kıyaslandığında sahip olduğu avantajları nedeniyle tercih edilmekte ve yüzey iyileştirme yöntemleri arasında daha çok ön plana çıkmaktadır. Yöntemdeki temel avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek hassasiyette yüzey kalitesi elde edilebilmektedir.
- Taşlama, lebleme, raspalama ve honlama gibi malzemelere uygulanan iyileştirme operasyonlarında sadece yüzey pürüzlülüklerinde iyileşme elde edilirken bilyeli haddeleme ve derin haddeleme yöntemlerinde yüzey pürüzlülüklerinde iyileşme yanında, aşınma ve korozyon direnci, yorulma dayanımı, yüzey sertliği gibi mekanik özelliklerde de iyileşme olmaktadır.
- Elde edilen yüzey kalitesi tatmin edicidir ve bun nedenle de ilave başka bir yüzey iyileştirme işlemine gerek duyulmadan uygulanabilmektedir.
- Yüksek hassasiyet gerektiren parçalarda yüzey iyileştirici son işlem olarak kullanılabilir.
- Diğer yöntemlerde çoğunlukla ekstra tezgâh ve özel ekipmanlar gerekli iken bilyeli ve derin haddeleme yöntemlerin de kullanılan aparatların tasarımı ve imalatı ile elde edilmesi daha kolay ve daha ekonomiktir. Ayrıca bu aparatlar birçok kez kullanılabilir.
- Bilyeli ve derin haddelemedeki işlem süreleri, geleneksel yüzey işleme yöntemlerine göre oldukça kısadır.
- Bilyeli ve derin haddeleme iş parçalarından talaş kaldırmadan uygulanabilen bir üretim tekniğidir.
- Bilyeli ve derin haddeleme yöntemlerinde talaş kaldırarak uygulanan diğer yüzey bitirme yöntemlerine göre daha az fire ile uygulama sağlanmaktadır.
- Malzeme liflerinin sürekliliği bozulmamaktadır, dolayısıyla üretilen parçaların dayanımına iyi yönde etkisi olmaktadır.
- Bilyeli ve derin haddeleme işlemini uygulamak için tasarlanan haddeleme aparatları hem torna tezgâhlarına hem de freze tezgâhlarına bağlanabilmektedir.
- Seri üretime daha elverişli bir uygulama alanı bulunmaktadır.
- Bu yöntemde uygulamada ustalık gerektirmeden işlemin uygulanması yapılabilmektedir.
- Bilyeli ve derin haddeleme işlemi silindirik düz yüzeylere uygulanabildiği gibi hem konik iç ve dış yüzeylere hem de figürlü parçaların iç ve dış yüzeylerine uygulanabilmektedir.

- Haddeme işlemleri için kullanılan aparatın tasarım süreci ve imalatı, diğer yüzey iyileştirme yöntemlerindeki takımlara göre hem basit hem de daha az maliyetlidir.

- Birim zamanda üretim anlamında daha yüksek üretim hızlarına ulaşılabilir. Daha kısa sürelerde arzu edilen yüzey kalitesi elde edilebilmektedir.

- Enerji yönünden değerlendirildiğinde bilyeli haddeme ve derin haddemede harcanan güç ve enerji gereksinimi diğer yüzey işleme proseslerine nazaran çok daha azdır. Böylece üretim maliyeti de daha da düşürülmektedir.

- Elde edilen yüzey kalitesi çok iyi olduğundan uygulandığı yüzeylerde sürtünmeyi azaltır, enerji tasarrufu sağlamaktadır (Yen vd., 2005; Luo vd., 2006; Korzynski, 2009).

6. Bilyeli ve Derin Haddeme Yönteminin Dezavantajları

Bilyeli ve derin haddeme yönteminde bazı dezavantajlar mevcuttur. Bu dezavantajlar aşağıda verilmiştir.

- Bilyeli ve derin haddemede malzemenin ezilmesi prensibi nedeniyle malzemenin haddeme işlemine tepki vermesi ezilme kabiliyetine bağlıdır. Bu durum yapısı sert malzemelerde olumlu etkinin sınırlı kalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle işlemin olumlu etkisi iyi parametre ayarlarına bağlıdır.

- Haddemede etkili olan parametrelerden özellikle ilerleme, baskı kuvveti ve paso sayısı gibi değişkenlerin uygun değerde verilmemesi durumunda yüzeyde olumsuz sonuçlar elde edilebilmektedir.

- Tezgâhların baskı kuvvetlerini karşılayacak rijitliğe sahip olması gerekmektedir.

- Yöntemin yeni olması ve yapılan çalışmaların yetersiz kalması nedeniyle malzemeler için optimum değerler sınırlı olarak bilinmektedir (Özgün, 2010; Öcalır, 2009; Yurtoğlu, 2005).

7. Sonuç

Bilyeli ve derin haddeme işlemleri sonucu elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekildedir:

- Finiş tormalama işlemi uygulaması sonrasında tüm derin haddeme işlemi uygulanmış yüzeylerde Ra değerlerinin azaldığı görülmektedir.

- Devir sayısının yüksek olduğu durumlarda Ra üzerinde ilerleme değerlerinin etkisinin azaldığı ve haddeleme kuvvetinin değişiminin de buna paralel olarak daha az etkili olduğu görülmektedir.

- Genel olarak yapılan optimizasyon analizleri sonuçlarına göre, Ra üzerinde en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu görülmektedir, haddeleme kuvveti ve devir sayısının etkisinin ilerleme kadar yüksek olmadığı görülmüştür.

- Daha düşük Ra değerleri için daha düşük ilerleme değerlerinin seçimi daha çok tercih edilebilir.

- Haddeleme işlemlerinin yağlı ortam seçilerek uygulanması daha iyi Ra değerleri için daha uygundur.

Kaynakça

Akkurt, A., Ovalı, İ. (2009). Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 371-382.

Akyüz, M., (2020). *Bilyeli Haddeleme Yönteminde İşlem Parametrelerinin AA7075-T6 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması* (Yayın No: 612983) [Master theses, Fırat Üniversitesi]

Altenberger, I., Scholtes, B. (2000). Recent developments in mechanical surface optimization. *In Materials science forum. Trans Tech Publications Ltd.* 347, 382-398.

Altenberger, I. (2003) Alternative mechanical surface treatments: microstructures, residual stresses & fatigue behavior. *Shot Peening*, 419-434.

Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A. and LN López de Lacalle, (2013). Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel. *International journal of fatigue*, 55, 230-244.

Başak, H., Sönmez, F., (2015). Haddeleme İşleminde Haddeleme Aparat Tipinin (Bilyeli, Makaralı, Çift Makaralı) Yüzey Pürüzlülüğü ve Yüzey Sertliğine Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 18 (3), 125-132.

Berstein, G., Fuchsbauer, B. (1982). Deep rolling and fatigue strength. *Z. Werkstofftech*, 13(3), 103-109.

Bozdana A. T. Gindy N. N. Z. (2008). Comparative experimental study on effects of conventional and ultrasonic deep cold rolling processes on Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology*, 24(11), 1378-1384. <https://doi.org/10.1179/174328408X302431>.

Broszeit, E. (1984). Grundlagen der Schwingfestigkeitssteigerung durch Fest-und Glattwalzen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 15 (12), 416-420.

Cogsdill SRMR Internal Roll-a-Finish, (Haziran 2023)

<https://www.youtube.com/watch?v=1BWzWhyh038>

Çetin, Ö., Ballıkaya, H., Altuğ, M., Savaş, V., Sağlam, M. (2018). Investigation of the effects of processing parameters on the vibration of tangential cylindrical grinding method. *Science and Eng. J of Firat Univ.*, 30(1), 311-317.

El-Axir, M.H., El-Khabeery, M.M. (2003). Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 82–89. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00269-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00269-8).

Hassan, A. M. (1997). The effects of ball-and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals. *Journal of materials processing technology*, 72 (3), 385-391.

Kiliç, M., Batı S., Biliz, I., Demir, F., Ceyhan, A. A. (2020). SHS yöntemiyle üretilen Cr takviyeli katmanlı NiAl-Ni3Al intermetalik bileşiğinin mikroyapı ve mikrosertlik özelliklerinin belirlenmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 862-874.

Korzynski, M., (2009). A model of smoothing slide ball-burnishing and an analysis of the parameter interaction. *Journal of materials processing technology*, 209(1), 625-633.

Liviu Luca (2002) *Investigations into the Use of Ball-Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process*, [PhD dissertation, University of Toledo]

Luo, H., Liu, J., Wang, L., & Zhong, Q. (2006). The effect of burnishing parameters on burnishing force and surface microhardness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7-8), 707-713.

Maximov, J. T., Duncheva, G. V., Anchev, A. P., Dunchev, V. P. (2020). Slide burnishing versus deep rolling—a comparative analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 1923-1939.

Mendi, F., 1996. Takım Tezgâhları Teori ve Hesapları, ISBN:975-06008-0-3, Ankara.

Öcalır, Ş. (2009). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Yapılan Alüminyum Alaşımı Birleştirmelerde Optimum Parametrelerin Belirlenmesi*, (Yayın No: 258977) [Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi]

Özgün, S. (2010). *Galetaj Yöntemiyle İşlemede Yüzey Kalitesinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi*, (Yayın No: 283075) [Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi]

Özkan, S., (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Parçalarda Haddeme (Burnishing) ile Yüzeylerin İşlenmesi, Haddemenin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Sertleşmeye Etkisinin İncelenmesi*, [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]

Perenda, J., Trajkovski, J., Zerovnik, A., Prebil, I. (2015). Residual stresses after deeprolling of a torsion bar made from high strength steel. *J. Mater. Process. Technol.* 218, 89–98.

Prabhu, P. R., Kulkarni, S. M., & Sharma, S. S. (2011). An experimental investigation on the effect of deep cold rolling parameters on surface roughness and hardness of AISI 4140 steel. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60, 1594-1598.

Prafulla Chaudhari, GK Awari and SS Khandare, (2011). Investigation On micro and Macro properties of ball burnished component, *VSRD-TNTJ*, 2(3), 137-143.

Rodríguez, A., LN Lopez de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, and J. Albizuri. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 11, 2817-2824.

Uddin, M., Hall, C., Santos, V., Visalakshan, R., Qian, G., Vasilev, K. (2021). Synergistic effect of deep ball burnishing and HA coating on surface integrity, corrosion and immune response of biodegradable AZ31B Mg alloys. *Materials Science and Engineering C*, 118, 111459.

Varol, R., (2009) Metal İmalat Sanayisinde Modern Yöntemler ve Mekanik Yüzey İşlemleri Uygulaması.

Yamato, (2023, Haziran)

<https://www.youtube.com/watch?v=wV6S8eIpdqk>

Yen, Y.C., Sartkulvanich, P., Altan, T. (2005). Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54, 237-240.

Yurtoğlu, H. (2005). Yapay Sinir Ağları Metodolojisi ile Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği, Uzmanlık Tezi, DPT Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü.

Zhu, Y. L., Wang, K., Li, L., Huang, Y. L. (2009). Evaluation of an ultrasound-aided deep rolling process for anti-fatigue applications. *Journal of materials engineering and performance*, 18, 1036-1040. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9341-2>.

BÖLÜM IX

KÖMÜR YANMA ATIKLARININ ÇEVRESEL ETKİLERİ VE SR İZOTOPU UYGULAMALARI

Environmental Impacts of Coal Burning Wastes and Applications of Sr Isotopes

Mehmet Ali ERTÜRK¹ & Hatice KARA²

*¹(Dr.), Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği
Bölümü, 23119, Merkez, Elazığ, Türkiye,
e-mail: erturkmae@gmail.com,
ORCID: 0000-0003-1197-9202*

*²(Dr.), Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği
Bölümü, 23119, Merkez, Elazığ, Türkiye,
e-mail: haticekara@firat.edu.tr,
ORCID: 0000-0003-3441-9865*

1. Giriş

Kömür, dünyadaki çoğu ülkede termik santrallerde elektrik üretmek için kullanılan önemli bir enerji kaynağıdır. Kömürün, birincil kullanım alanı elektrik enerjisidir ve günümüzde dünyada elektrik ihtiyacının %41'ini karşılamaktadır (World Coal Association, 2017). Termik santrallerde enerji üretimi için kömür yakılmasından kaynaklı baca gazı kükürt giderme ürünleri, uçucu kül ve taban külü dahil olmak üzere büyük miktarlarda katı kömür kullanım yan ürünleri oluşmaktadır. Türkiye ve Dünya her yıl termik santrallerden tonlarca kömür yanma atık ürünleri çevreye bırakılmaktadır. Atık olarak oluşan bu küller birçok çevresel sorunlara neden olmaktadır. Kömürün yanmasıyla termik santrallerde atık ürünlerde toksik elementler (Cd, As, Ge, Pb, Ga, Sb, Sn, Ti, Mo, Se ve Zn) zenginleşmektedir. Toksik element içeren kömür yanma atık ürünleri olan bu küller yığınlar halinde veya toplama havuzlarında

depolanmaktadır. Kül havuzları veya yığınlar içerisinde sızan çözülebilir bileşikler ve metal iyonları hareket ederek toprak, yüzey ve yeraltı suyuna karışarak kirliliğe neden olmaktadır. Kömür yanma atıkları, toksik elementler açısından zengindir ve sızıntı sularının su kalitesi bakımından önemli etkileri olmaktadır (Swaine, 2000; Finkelman vd., 2002; Dai vd., 2005; Spivak-Birndorf, 2004; Rulh vd., 2014; ACAA, 2016; EPA, 2018). Bu sebeplerden ötürü küllerin bertaraf edilmesi yerine, bu atıklar geri kazandırılmalıdır. Kül miktarının çok olmasından dolayı bu kömür yanma atıkları geniş alanlarda muhafaza edilmesi gerekmektedir. Günümüzde uygulanan kömür külü depolama yöntemleri, havada kaçak toz emisyonu olarak kaçan kömür küllerine maruz bırakılmakta veya yeraltı suyuna sızmaktadır (Mueller vd., 2013; Sönmez ve Işık, 2020).

2010 yılında dünya çapında 780 Mt kömür yakma ürününün üretildiği tahmin edilmektedir. Bu kömür yakma ürünlerinin yaklaşık %53,5'i tüketilmiştir, kalan kısım ise bertaraf veya depolama sahalarına gitmiştir. Kömür yakma atıkları bir elektrik santralinde yerinde bertaraf edilmesi, milyonlarca değilse de yüzbinlerce ton kuru kül veya ıslak kül bulamacının depolandığı onlarca yıllık atık birikimini içermektedir (Zhang, 2014). Türkiye'de her yıl termik santrallerde milyonlarca ton kömür yakılmakta ve yaklaşık 100 milyon tondan fazla kül ortaya çıkmaktadır. Türkiye'de 2014 yılında kurulu gücü ≥ 100 MW olan toplam 66 termik santralde, toplam 24,2 milyon ton atık tespit edilmiş olup bunlardan 9.100 tonu tehlikeli atık olduğu belirlenmiştir (TÜİK, 2014). Bu atıkların %98,5'ini mineral atıklar (uçucu kül, kül, alçıtaşı, cüruf vb.), toplam atığın %48,3'ü kül barajına/kül dağı, %21,7'si düzenli depolama sahalarına, %15'i diğer bertaraf yöntemleri uygulanmaktadır ve %15'i satılma veya lisanslı atık bertaraf/geri kazanım firmalarına verilmektedir (Başar vd., 2016). Kömür külleri antropojenik malzemelerdendir ve uygun olmayan şekilde bertaraf edilmesi çevresel bir sorun haline gelmektedir. Bu nedenle kömür yanma atık ürünlerinin izini sürmek günümüzde çevresel sorunlara çözüm getirmek açısından önemlidir. Farklı ortamlarda kömür yanma atık ürünlerinin izini sürmek için kullanılan yöntemlerden biride stronsiyum (Sr) izotopudur (Spivak-Birndorf, 2004; Rulh vd., 2014).

2. Kömür Yanma Ürünleri

Kömür havanın oksijeni ile doğrudan yanabilen, %55-95 arasında serbest ve bileşik halinde karbon içeren organik kökenli kayaçlardır. Bitki artıklarının turba, linyit, taşkömürü ve antrasit aşamalarını geçerek meta-antrasite dönüşmesine kadar geçen evrelerdeki değişime kömürleşme denilmektedir.

Jeolojik zaman içerisinde oluşmuş kömürlerde kömürleşme öncelikle turba fazından başlamaktadır. Kömürleşme ilerledikçe yumuşak linyit, sert linyit, taşkömürü ve antrasite dönüşmektedir. Kömür yanma ürünleri; baca gazı, uçucu kül, dip külü ve kazan cürufu ürünlerini kapsamaktadır ve tipik olarak As, B, Se, Hg ve Sr gibi toksik elementler açısından zengindir (EPA, 2009; Adrio vd., 1980). Kömür yanma ürünlerinin özellikleri, kömürle çalışan santraller arasında önemli ölçüde değişiklik gösterir ve kömür kaynağı (kömürün mineral bileşenleri) ve kömür santrallerindeki süreçler dahil olmak üzere birçok koşula bağlıdır (Mardon vd., 2004).

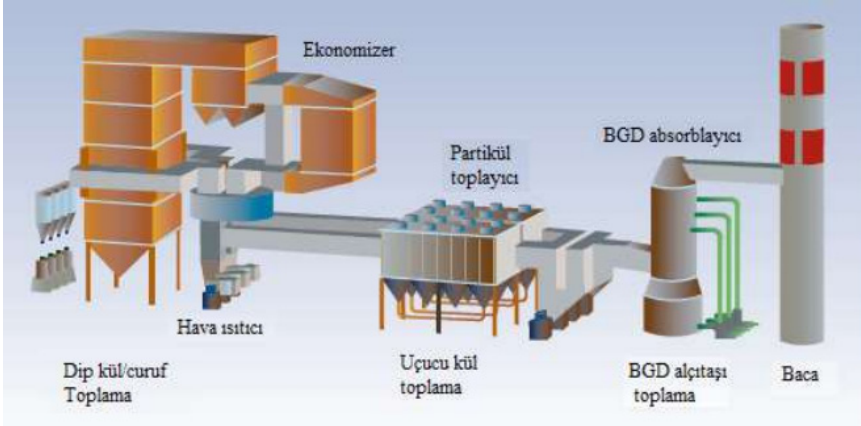
Kömürün yanması sırasında, karbon ve diğer bazı elementler oksitlenebilir veya buharlaşabilir. Bununla birlikte, mineralin önemli bir kısmı, kömürde bulunan yanıcı olmayan mineral maddeden ve daha düşük miktarda kısmen yanmış kömürden oluşan bir kalıntıya yani kömür külüne dönüşmektedir (Şekil 1). Kömürün organik bileşikleri yandıkça, kazan fırınının içinde yanmamış inorganik bileşenlerden ve yanmamış karbondan kül üretilir. Üretilen külün türü, kömürün mineral bileşenlerine ve kullanılan yakma tekniğine bağlı olarak değişir. Kömür külü üç ana kısma ayrılmaktadır: uçucu kül, dip külü (veya kazan altı külü) ve cüruf (Roy vd., 1981; Zhang, 2014; Hower vd., 2017). Cüruf ve dip külü (yani fırında biriken kömür artıkları) hava veya su kullanılarak düzenli olarak yıkanmaktadır. Uçucu kül ise baca gazına çekilen ve yakma ünitesinden uzaklaştırılan, parçacık boyutu açısından ince olan kömür külü fraksiyonudur (Şekil 2). Uçucu kül partikülleri genellikle mineral maddenin erimesi veya kömürün kısmi yanması ile oluşmaktadır (Hower vd., 2017).



Şekil 1. Kömür külü atığı (a) uçucu kül (b) dip külü (Singh ve Siddique, 2014).

Kömür yakıtlı enerji santrallerinin çoğu, kömürün kükürt içeriğine, tesis yıkayıcı teknolojisine ve kömürün mevcut fiyatına bağlı olarak bir kömür

karışımı kullanmaktadır. Bu varyasyonlar, kömür tipini ve dolayısıyla üretilen kömür yanma ürünlerini kontrol etmektedir ve bu da kömürle çalışan tesislerde kömür yanma ürünlerinden üretilen sızıntı sularının bileşimini etkilemektedir (Ruhl vd., 2012).



Şekil 2. Kömür küllerinin oluşumunu gösteren tipik bir enerji tesisi akım şeması (EPRI, 2009).

Kömür yanma atık ürünleri olan uçucu ve dip küllerinin kullanım alanları oldukça geniştir. Uçucu kül; betonda mineral katkı malzemesi, katkılı çimento üretimi, çimento klinker hammaddesi, çimento ikamesi, karayolu temel/alt temel malzemesi (katkı/mineral dolgu), Gazbeton, yapısal veya akışkan (CLSM) dolgular, terkedilmiş maden sahalarının reklamasyonu, atıksu arıtımında düşük maliyetli adsorban üretimi, tarımsal toprakların ıslahı, tuğla/seramik alanlarında kullanılmaktadır. Dip külleri; ince ve kaba agrega, beton/beton ürünleri/derz dolgu, katkılı çimento üretimi, çimento klinker hammaddesi, yapısal veya akışkan (CLSM) dolgular, terkedilmiş maden sahalarının reklamasyonu, karayolu inşaatlarında (katkı/mineral dolgu) ve tarımsal toprakların ıslahında kullanılmaktadır (Başar vd., 2016).

3. Kömür Yanma Ürünlerinin Çevresel Etkileri

Kömür külü genellikle uçucu kül, taban külü, kazan cürufu ve baca gazı kükürt giderme ürünlerinden oluşmaktadır. Kömür yanma atıklarının fiziksel, kimyasal, mineralojik, morfolojik ve radyoaktif özellikleri, kömür kaynağı ve kalitesi, yanma süreci, birlikte yanan malzemelerin varlığı, ayrışma derecesi,

partikül boyutu gibi özellikler çevre ve insan sağlığı için potansiyel tehlikenin boyutunu belirlemektedir. Kömür külü, en büyük endüstriyel atık kollarından biridir çevre ve insan sağlığı riskleri oluşturabilecek yüksek konsantrasyonlarda tehlikeli elementler içermektedir. Bunlardan uçucu kül, nispeten daha fazla bolluğu, daha ince parçacıklı oluşu ve potansiyel olarak toksik eser elementlerin (örn. As, Se, Cd, Cr ve Pb) yüksek konsantrasyonları nedeniyle çevreye bırakıldığında insan sağlığı ve ekolojimiz için daha fazla risk oluşturmaktadır (Swaine, 1994; Kosson vd., 2002; Nelson vd., 2010; Córdoba vd., 2012; Izquierdo ve Querol, 2012).

Termik santrallerde yakılan kömürlerden, her yıl milyonlarca ton kömür yanma artıkları elde edilmektedir (Şekil 3). Kömürün yanmasıyla oluşan kül miktarı kömürün ısıl değerine bağlı olarak değişmektedir. Ülkemizde elektrik enerjisi üreten bir termik santralde kullanılan linyit kömürlerinin genelde %20-50'si kül atığı olarak ortaya çıkmakta; bu miktarın %80-90'ı uçucu küller; %10-20'si taban külleridir (Başar vd., 2016) (Tablo 1).



Şekil 3. Afşin-Elbistan Termik Santrali'nin görünümü ([http:1](http://1))

Dünya ve Türkiye'de giderek artan enerji talebini karşılamak amacıyla kurulan termik santraller toprak, bitki örtüsü, yeraltı ve yer üstü sularında, canlıların sağlığı ve çevre üzerinde birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Uçucu

küllerin yaklaşık %20'si değerlendirilmekte olup diğer kısmı havuzlarda veya karalar doldurularak muhafaza edilmektedir ve uçucu küller, kil yapısı, yüksek ısıya dayanıklı olmaları ve gözenekli bir yapıya sahip olmalarından dolayı sıvı ve gaz gibi ortamlarda, elementlerin yüzeylerinde tutulabileceği çok uygun ortamlar oluşturmaktadırlar. Oldukça fazla miktarlarda biriken bu küller canlılar ve çevre açısından olumsuz yönde etkilemektedir. Kömür ile işletilen termik santrallerde, zararlı partiküller ve gazlar ilk olarak termik santral ve kömür işletme alanlarında çalışanlarda görülmektedir (Demir, 2009). Linyitin yanması ile birlikte, kömürün içeriğinde bulunan ve kirliliğe sebep olma potansiyeline sahip toksik iz elementler (As, Cd, Pb, Sb, Se, Sn, Mo, Zn vb.) atıklara geçiş yapmaktadır (Tablo 2). Özellikle daha küçük parçacıklara sahip olmasından dolayı uçucu küller, elementlerin yüzeylerinde tutunabilecekleri ortamlar oluşturmaktadır.

Tablo 1. Türkiye Temik Santralleri'nin kömür ve kömür kül miktarları (Başar vd., 2016)

TERMİK SANTRAL	Kullanılan Kömür Miktarı (ton/yıl)	Oluşan Kül Miktarı (ton/yıl)
Soma	5.884.156	2.373.439
Çatalağzı	1.710.000	803.703
Kangal	6.452.745	1.322.832
Sugözü	3.300.000	375.000
Tunçbilek	1.240.786	591.854
Seyitömer	5.850.000	1.989.000
Kemerköy	3.962.987	1.585.195
Afşin	23.382.791	6.141.137
Yatağan	6.558.000	1.320.570
Orhaneli	1.426.360	357.391
Yeniköy	2.522.432	713.847

Uçucu küllerin bir kısmı kurutulurken, bir kısmı pompa ile nakliyyeyi kolaylaştırmak amacıyla su ile karıştırılmaktadır. Kullanılmayan uçucu küller yaş halde ise saha-içi büyük yapay kül barajlarında, kuru halde ise saha-içi veya saha-dışı düzenli depolama alanlarında depolanmaktadır. Bir kısım

kül ise Türkiye’de de uygulandığı üzere, denize boşaltılmaktadır. Çevre Koruma Ajansı’nın (EPA) potansiyel risk ve zarar durumları üzerine yaptığı değerlendirmeler, uygun önlemler alınmadığı takdirde, kömür yakma atık ürünleri olan bu küllerin içerdiği kirleticilerin yeraltı sularına sızabileceğini ve potansiyel olarak içme suyu kaynaklarına karışıp sorunlar yaratabileceğini ön görmektedir (Akgül ve Yoncacı, 2012).

Tablo 2. Dip küller ve uçucu küllerin element konsantrasyonları (mg/kg) (EPRI, 2009)

	Uçucu Kül	Dip Kül
Aluminyum	70000-140000	59000-130000
Antimon	dl.-16	dl.
Arsenik	22-260	2.6-21
Bakır	62-220	39-120
Baryum	380-5100	380-3600
Berilyum	2.2-26	0.21-14
Boron	120-1000	dl.-335
Çinko	63-680	16-370
Civa	0.01-0.51	dl.-0.07
Demir	34000-130000	40000-160000
Kadmiyum	dl.-3.7	dl.
Kalsiyum	7400-150000	5700-15000
Krom	27-300	51-1100
Kurşun	21-230	8.1-53
Magnezyum	3900-23000	3400-17000
Magnezyum	91-700	85-890
Molibden	9.0-60	3.8-27
Nikel	47-230	39-440
Potasyum	6200-21000	46000-18000
Selenyum	1.8-18	dl.-4.2
Silikon	160000-270000	160000-280000
Sodyum	1700-17000	1600-11000
Stronsiyum	270-3100	270-2000
Süfür	1900-34000	dl.-15000
Talyum	dl.-45	dl.
Titanyum	4300-9000	4100-7200
Uranyum	dl.-19	dl.-16
Vanadyum	dl.-360	dl.-250
dl.: dedeksiyon limitinin altında		

4. Kömür ve Kömür Yanma Atıklarında Stronsiyum İzotopu Kullanımı

Enerji üretimi için kömür yakılması sonucunda baca gazı, uçucu küller ve taban külleri ve kükürt giderme ürünleri dahil olmak üzere büyük miktarlarda katı kömür yan ürünleri oluşturmaktadır. Bu malzemeler ya çevresel ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır ya da havuzlarda depolanmaktadır. Havuzlarda ve yığınlar şeklinde alanlarda birleştirilen bu küller çevresel problemlere neden olmaktadır. Bu nedenle, kömür yanma ürünlerinin çevredeki davranışını izlemek ve anlamak için yeni tekniklerin geliştirilmesi, kömürün güvenli kullanımı için oldukça önemlidir (Capo vd., 1998; Bullen ve Kendall 1998).

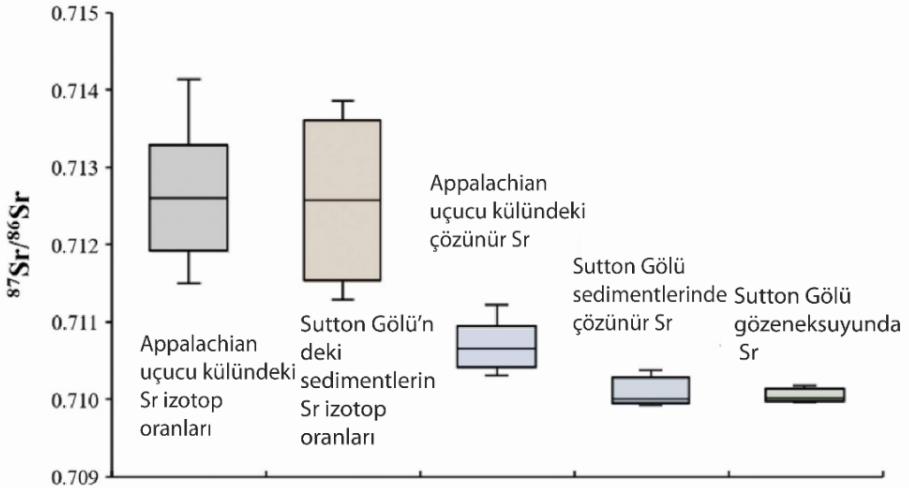
Serbest kalan kömür külünün çevresel etkilerini tayin etmek için, çeşitli jeokimyasal ve izotopik izleyiciler (örneğin; bor, stronsiyum, radyum, cıva ve kurşun izotopları) kömür/ kömür külünün varlığını ve ortamdaki kirliliği belirlemek için kullanılmıştır (Bartov vd., 2013; Deonarine vd., 2013; Hurst vd., 1993; Ruhl vd., 2014; Wang vd., 2019). Kömür yanma ürünlerinin çevresel etkilerinin belirlenmesine yardımcı tekniklerden biride stronsiyum izotopudur. Kömür külü, en büyük endüstriyel atık kollarından biridir ve çevre ve insan sağlığı riskleri oluşturabilecek yüksek konsantrasyonlarda tehlikeli toksik elementler içermektedir. Sr izotoplarının kömür ve kömür yanma ürünlerinin çalışmalarına uygulanması, çevrede güçlü bir kömür yanma ürünleri belirleyicisi olarak daha iyi bertaraf tekniklerinin geliştirilmesini kolaylaştırabilir. Stronsiyum (Sr) izotopları, jeolojik ve çevresel sistemlerde izleyici olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır (Capo vd., 1998; Bullen ve Kendall, 1998). Kömür külündeki nispeten yüksek stronsiyum konsantrasyonları ve ayırt edici $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları nedeniyle, etkilenen su kaynaklarında kömür külü kirlenici maddelerin izini sürmek için de stronsiyum izotopları kullanılmaktadır (Wang vd., 2020).

Stronsiyum, ^{84}Sr (%0.56), ^{86}Sr (%9.86), ^{81}Sr (%7.0) ve ^{88}Sr (%82.58) olmak üzere dört duraylı doğal izotop ile ^{87}Sr bir radyojenik izotopa sahiptir. ^{87}Sr , ^{87}Rb izotopunun ($T_{1/2} = 48.8 \times 10^6$ yıl) radyoaktif bozunması ile oluşmaktadır. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranı ile ifade edilmekte olup kayalarda bu oran 0.7 ile 4 arasında değişmektedir (Clark and Fritz, 1997).

Jeolojik malzemelerdeki ^{87}Sr konsantrasyonu, malzemenin Rb/Sr oranına bağlı bir oranda, ^{87}Rb 'nin beta bozunmasının bir sonucu olarak (genellikle milyonlarca yıl) artmaktadır. Farklı malzemelerin $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranlarındaki doğal varyasyonlar, benzersiz Sr kaynaklarını belirlemek için kullanılabilir. Jeolojik birim içerisinde kayacın kristallenme süreci, yaşı, ilksel Rb/Sr konsantrasyonları ile ilksel $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranına bağlı olarak farklı $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranı belirlenmiştir. Su-kayaç etkileşimi sırasında bir mineralden kazanılan stronsiyum, mineral ile

aynı $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranına sahip olmaktadır. Bundan dolayı yeraltısuyunda farklı $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları, yeraltısuyu yolu boyunca değişik mineraller ile temas etmesini veya farklı temas sürelerini gösterir. Tüm veriler birlikte değerlendirildiğinde $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranları, yeraltısuyu akım yollarının, yeraltısuyu geçiş süresinin ve köken kayacın belirlenmesinde kullanılacak önemli bir yöntemdir (Clark and Fritz, 1997). Ayrıca, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranlarında; farklı kömür yanma türleri arasında ve sızıntı suları ile bunlara karşılık gelen kömür yanma ürünlerinin değerleri arasında sistematik farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıklar, kömürün inorganik bileşenlerinin kökenlerinin yanı sıra yanma sırasında meydana gelen dönüşümlerin aydınlatılmasına yardımcı olmaktadır. Kömürde Sr, ortalama konsantrasyonu yaklaşık 100 ppm olan bir eser elementtir (Swaine, 1990). Kömür yanma ürünlerinde Sr bakımından, kömür ve diğer birçok jeolojik rezervuara göre (yaklaşık 3000 ppm) daha zengindir (Hurst vd., 1991). Stronsiyum ayrıca su ortamlarında kolayca mobilize olur ve mobilizasyonu redoks koşullarından bağımsız olması, sudaki kömür külü kirliliği için Sr izotoplarını ideal bir izleyici haline getirmektedir (Hurst vd., 1991; Ruhl vd., 2014).

Bu nedenle, kömür yanma ürünlerinde Sr izotopları, öncelikle bu elementin çevresel bir izleyici olarak kullanımı konusunda çalışmalar yapılabilmesine uygun olduğu yapılan çalışmalarla gözlenmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oranlarının, Appalachian uçucu külleri, Sutton Gölü (Kuzey Karolina) sedimentleri ve gözenek suyundakilerle karşılaştırılması (Vengosh vd., 2019; Wang vd., 2020).

5. Sonuçlar

- Kömür, dünyadaki çoğu ülkede termik santrallerde elektrik üretmek için kullanılan önemli bir enerji kaynağıdır.
- Termik santrallerden her yıl tonlarca kömür yanma atık ürünleri çevreye bırakılmaktadır.
- Kömür yanma ürünleri; baca gazı, uçucu kül, dip külü ve kazan cürufu ürünlerini kapsamaktadır ve tipik olarak As, B, Se, Hg ve Sr gibi toksik elementler açısından zengindir.
- Türkiye’de her yıl termik santrallerde milyonlarca ton kömür yakılmakta ve yaklaşık 100 milyon tondan fazla kül ortaya çıkmaktadır.
- Dünya ve Türkiye’de giderek artan enerji talebini karşılamak amacıyla kurulan termik santraller toprak, bitki örtüsü, yeraltı ve yer üstü sularında, canlıların sağlığı ve çevre üzerinde birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır.
- Serbest kalan kömür külünün çevresel etkilerini tayin etmek için, çeşitli jeokimyasal ve stronsiyum izotopları kömür/kömür külünün varlığını ve ortamdaki kirliliği belirlemek için kullanılabilir.
- Bu atık ürünleri rehabilite edilmesi ve yeni kullanım alanlarının belirlenerek farklı alanlarda değerlendirilmesi için yapılacak çalışmalar hem çevre sağlığı hem de ekonomik anlamda katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Adriano, D. C., Page, A. L., Elsewi, A. A., Chang, A. C., ve Straughan, I. (1980). Utilization and disposal of fly-ash and other coal residues in terrestrial ecosystems. A review. *J. Environ. Qual.*, 9, 333– 344.
- American Coal Ash Association (ACAA). (2016). Coal combustion product (CCP) & use survey report, September 11.
- Bartov, G., Deonarine, A., Johnson, T.M., Ruhl, L., Vengosh, A., ve Hsu-Kim, H. (2013). Environmental impacts of the tennessee valley authority kingston coal ash spill. 1. source apportionment using mercury stable isotopes. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 2092–2099.
- Başar, H., Pelitli, M., ve Güzel, B. (2016). Termik Santrallerden Kaynaklanan Küllerin Yönetimi-Uygulama Örnekleri. TÜBİTAK MAM ÇTÜE. Ankara 19-20 Ekim 2016
- Clark, I., ve Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*, Lewis Publishers.
- Córdoba, P., Ochoa-Gonzalez, R., Font, O., Izquierdo, M., Querol, X., Leiva, C., LópezAntón, M.A., Díaz-Somoano, M., Rosa Martinez-

Tarazona, M., Fernandez, C., ve Tomás, A. (2012). Partitioning of trace inorganic elements in a coal-fired power plant equipped with a wet Flue Gas Desulphurisation system. *Fuel* 92, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.025>.

Dai, S., Ren, D., Tang, Y., Yue, M., ve Hao, L.M. (2005). Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 61 (1), 119–137.

Deonaraine, A., Bartov, G., Johnson, T.M., Ruhl, L., Vengosh, A., ve Hsu-Kim, H. (2013). Environmental Impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston Coal Ash spill. 2. Effect of Coal Ash on Methylmercury in Historically Contaminated River Sediments. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 2100–2108. <https://doi.org/10.1021/es303639d>.

Electric Power Research Institute. (2009). Coal Ash: Characteristics, Management and Environmental Issues, EPRI Rep., September.

Environmental Protection Agency (EPA) (2018). Hazardous and solid waste management system; Disposal of coal combustion residuals from electric utilities. *Federal Register*, vol. 83, no.51.

Finkelman, R.B., Orem, W., Castranova, V., Tatu, C.A., Belkin, H.E., ve Zheng, B. (2002). Health impacts of coal and coal use: possible solutions. *International Journal of Coal Geology*, 50(4), 425–443.

Hower, J. C., Robl, T. L., Anderson, C., ve Thomas, G. A. (2005). Sakulpitakphon, T.; Mardon, S. M.; Clark, W. L. Characteristics of coal combustion products (CCP's) from Kentucky power plants, with emphasis on mercury content. *Fuel*, 84, 1338–1350.

Hower, J. C., Sakulpitakphon, T., Trimble, A. S., Thomas, G. A., ve Schram, W. H. (2006). Major and minor element distribution in a coal-fired utility boiler in KY. *Energy Sources*, 28, 79–95.

Hurst, R.W., Davis, T.E., ve Elseewi, A.A. (1991). Strontium isotopes as tracers of coal combustion residue in the environment. *Eng. Geol., Appl. Geosci. Low-Level Radioact. Chem. Wastes* 30, 59–77. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90035-J](https://doi.org/10.1016/0013-7952(91)90035-J).

Hurst, R.W., Davis, T.E., ve Elseewi, A.A. (1993). Strontium and lead isotopes as monitors of fossil fuel dispersion. In: *Trace Elements in Coal and Coal Combustion Residues*.

Izquierdo, M., ve Querol, X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: an overview. *Int. J. Coal Geol., Min. Trace Elem. Coal* 94, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.10.006>.

Spivak-Birndorf, L.J. (2004). Strontium Isotope Systematics and Geochemistry Of Coal Utilization By-Products. A.B., University of Chicago, Master of Science. 56.

Sönmez, G., ve Işık, M. (2020). Kömür yanma atıklarının çevresel etkileri ve kullanım alanları. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 9(1), 72-83.

Kosson, D.S., Sloat, H.A., Sanchez, F., Garrabrants, A. C. (2002). An Integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. Environ. Eng. Sci. 19, 159–204. <https://doi.org/10.1089/109287502760079188>.

Mardon, S. M., ve Hower, J. C. (2004). Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: Examples from a Kentucky power plant. Int. J. Coal Geol., 59, 153–169.

Mueller, S. Mallard, J.W. Mao, Q., ve Shaw, S.L. (2013). Fugitive particulate emission factors for dry fly ash disposal,” Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 63, pp. 806-818,.

Nelson, P.F., Shah, P., Strezov, V., Halliburton, B., ve Carras, J.N., (2010). Environmental impacts of coal combustion: a risk approach to assessment of emissions. Fuel Gas Clea. High Temp. 810–816.

Ruhl, L., Vengosh, A., Dwyer, G. S., Hsu-Kim, H., Schwartz, G. E., Romanski, A., ve Smith, D. S. (2012). The impact of coal combustion residual effluent on water resources: A North Carolina case study. Environ. Sci. Technol., 46, 12226–12233.

Ruhl, L.S., Dwyer, G.S., Hsu-Kim, H., Hower, J.C., ve Vengosh, A., (2014). Boron and strontium isotopic characterization of coal combustion residuals: validation of new environmental tracers. Environ. Sci. Technol. 48, 14790–14798. <https://doi.org/10.1021/es503746v>.

Swaine, D.J. (2000). Why trace elements are important. Fuel Processing Technology, 65(66), 21–33.

Singh, M., ve Siddique, R. (2014). compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand,” J. Clean. Prod., 112, 620–630.

Swaine, D.J. (1994). Trace elements in coal and their dispersal during combustion. Fuel Process. Technol. 39, 121–137. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(94\)90176-7](https://doi.org/10.1016/0378-3820(94)90176-7). Trace element transformations in coal-fired power systems.

TÜİK, 2014. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Bertaraf-ve-Geri-Kazanım-Tesisleri-Istatistikleri-2014-18776>

Wang, Z., Dwyer, G.S., Coleman, D.S., ve Vengosh, A. (2019). Lead isotopes as a new tracer for detecting coal fly ash in the environment. *Environ. Sci. Technol. Lett.* <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00512>.

World Coal Association (2017). *Coal facts 2017*. London, UK, World Coal Association, 3 pp (2017)

Vengosh, A., Cowan, E.A., Coyte, R.M., Kondash, A.J., Wang, Z., Brandt, J.E., ve Dwyer, G.S. (2019). Evidence for unmonitored coal ash spills in Sutton Lake, North Carolina: Implications for contamination of lake ecosystems. *Sci. Total Environ.* 686, 1090–1103.

Zhang, X. (2014). *Management of coal combustion waste*. IEA CLEAN COAL CENTRE. CCC/231 ISBN 978-92-9029-551-8

<https://www.euas.gov.tr/tr-TR/santraller/afsin-elbistan-b>

BÖLÜM X

BİTKİSEL MADDE KATKILI KOMPOZİT MALZEME

Herbal Additive Composite Material

**Erdi BULUŞ¹ & Yeşim Müge ŞAHİN² & Gülseren SAKARYA
BULUŞ³ Mehmet AKKAŞ⁴**

¹(Öğr. Gör.): İstanbul Arel Üniversitesi, ArelPOTKAM (Polimer Teknolojileri ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi), İstanbul, 34537, Türkiye, erdibulus@arel.edu.tr

ORCID: 0000-0002-2045-2499

İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri Programı, İstanbul, 34295, Türkiye, buluserdi@gmail.com

²(Doç. Dr.), İstanbul Arel Üniversitesi, ArelPOTKAM (Polimer Teknolojileri ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi), İstanbul, 34537, Türkiye, ymugesahin@arel.edu.tr

ORCID: 0000-0003-2119-1216

³(Uzman), İstanbul İl Sağlık Müdürlüğü, Ar-Ge Projeler Birimi, İstanbul, 34093, sakaryagulseren1@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6096-8177

⁴(Doç. Dr.), Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, 37150, Türkiye, mehmetakkas@kastamonu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-0359-4743

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34467, Türkiye

1. Giriş

Yara, derinin tamamında çeşitli nedenlerle bozulması sonucunda canlı dokunun yapı ve fonksiyonel işlevinin durması olarak tanımlanmaktadır (Buluş vd., 2020). Yara tedavisi insanlık tarihi ile başlamıştır. Yara tedavisinde asıl amaç; mümkün olan en kısa sürede doku onarımının sağlanarak bozulan deri yapısı ve fonksiyonel özelliklerini düzeltmektir. Bu nedenle günümüzde yara tedavisinde farklı birçok teknik bulunmaktadır. Yara tedavisinde etkili olan membranların üretildiği elektrospinning nanoteknolojik üretim yöntemlerinden en az maliyetli ve kolay üretim imkânına sahiptir. Elektrospinning tekniğinin çalışma prensibine bağlı olarak çok çeşitli polimer ve katkı maddesinin kullanılabilme imkanı ile farklı birçok sektöre yönelik yenilikçi malzeme üretimine imkan tanımaktadır.

Kompozit yapı içerisinde dağılmış nanoparçacıklardan meydana gelme olarak tanımlanmaktadır. Nanoteknolojinin yapı taşıdır. Bir nanometre milimetrenin milyonda biridir ve insan saç telinden yaklaşık olarak 100,000 kat daha küçük olması olarak ölçeklendirilmektedir (Buluş vd., 2021; Zhao vd., 2020).

Anghel ve arkadaşları (2014), T'nin verum işlevselleştirilmesi ile demir (II, III) oksit (Fe_3O_4) büyüklüğü 9.4 nm nanopartiküllere sahip lazer gram pozitif ve gram negatif mikrobik kolonizasyon doğru antibakteriyel aktivite değerlendirme için mide tüpü (G-tüp) üzerine matriks yardımcı lazer darbeleri buharlaştırma (akçaagaç) tekniği ile transfer etmişlerdir. Nanoparçacık tozunun X-ışını kırınım (XRD) analizi bir polikristalin manyetit yapısı gösterilirken, kızılötesi bütünlük doğrulamıştır. T'nin lazer transferinden sonra fonksiyonel grupları yatırılan filmlerin spesifik topografisinde, G-tüplerini kaplayan biyo-fonksiyonelleştirilmiş manyetit parçacıkları ile birlikte düzgün bir ince kaplama gözlemlenmiştir. Sitotoksisite deneylerinde demir (Fe), G-tüp yüzey biyoyumluluğunda bir artış sağladığını belirlemişlerdir. Fe_3O_4 inkübasyon beş gün endotelial hücrelerin normal gelişimini sağlayan T tedavisi ile nanoparçacık ile modifiye edilmiş G-tüpü yüzeyleri üzerindeki mikrobiyolojik analizler, hem gram negatif hem de gram pozitif bakteri kolonizasyonunu önemli ölçüde azaltarak yapışma önleyici özelliklerin iyileştiğini kanıtlamışlardır (Anghel vd., 2014).

Rauchensteiner ve arkadaşları (2004), CP grubu olarak bilinen botanik cins *Achillea L.*'nin (Asteraceae) çeşitli türleri, ham ilaç *Herba Millefolii*'yi içermekte olan bir bitkidir. Esansiyel yağ taşıyan bitkiler Orta ve Güneydoğu Avrupa'da toplanır ve başlıca anti-ödemli, antiphlogistik ve spazmolitik aktivitelere sahip olmak için kullanılır. Cilt ve mukozanın sindirim bozuklukları ve iltihaplarını

içeren Herba Millefolii'nin tıbbi endikasyonları, uçucu yağ, seskiterpenler, alkamidler ve flavonoidlere referans edebilmek için kullanılmaktadır. Kimyasal bileşim, yaygın coğrafi ve ekolojik oluşumlar, farklı ploidi seviyeleri (di-, tetra-, hekza-, ahtapot) ve grup içindeki sık hibridizasyonlardan dolayı ve aynı zamanda diğer *Achillea* bölümlerinden türlerle de güçlü bir şekilde değişebildiğini gözlemlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalarında CP grubundan türlerin biyoaktif bileşikleri, botanik, ploidi ve halk tıbbında kullanım hakkında açıklamalar da dahil olmak üzere araştırmalar hakkında analiz yapmışlardır (Rauchensteiner vd., 2004).

Cam ve arkadaşları (2019), çalışmalarında deri dokusu mühendisliğinde elektrospun CP yüklü (ağırlıkça% 0.125, 0.250 ve 0.500) PLA (% 8, w / v) nanofiber matların karakterizasyonu ve performansını araştırmışlardır. Elektrospun nanofiberlerini SEM, FTIR, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve çekme mukavemeti testi araştırmışlardır. İlaç salım testi ve hücre kültürü çalışması da yapmışlardır. CP yüklü nanofibröz matlar ağırlıkça %0.250 ve ağırlıkça % 0.500 mükemmel hücre uyumluluğu gösterdiğini gözlemlemişlerdir ve fare embriyo fibroblast (NIH / 3T3) hücrelerinin canlılığını 72 saat içinde arttırdığını tespit etmişlerdir. Sonuçlara göre, CP yüklü PLA nanofiberlerin gerilme mukavemetini ve kontrollü salımı olduğunu tespit etmişlerdir. Daha yüksek bitki ekstresi içeriğine sahip kompozitler için çalışma sıcaklığı aralığı genişletilmiştir. Sonuç olarak, CP yüklü nanofiber matlar cilt dokusu mühendisliği uygulamalarında büyük bir potansiyele sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Cam vd., 2019).

Çalışmamızda amaç, doğal yara iyileştirici özellikleri bilinen tarçın (*Cinnamomum verum*) (T) ve civanperçemi (*Achillea millefolium*) (CP) maddelerinin poliakrilonitril (PAN) polimerine katıldığı kompozit membran üretiminin nanoteknolojik elektrospinning tekniği ile elde edilmesidir. Üretilen membranlara yapısal (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi-FTIR), morfolojik (Alan Emisyon Tabanlı Taramalı Elektron Mikroskopu-FEGSEM) ve mekanik (Çekme) analizleri gerçekleştirilerek malzeme özellikleri belirlenecektir. Üretilen kompozit malzeme fonksiyonel özellikleri ile sağlık sektörü başta olmak üzere çeşitli sektörlere öncülük edebilecek ideal bir malzeme olabilecektir.

2. Materyal Ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmamızda PAN polimeri Inovenso firmasından temin edilmiştir. Polimeri çözmek için dimetilformamid (Sigma-Aldrich) çözücüsü,

electrospinning aşamasında altlık malzeme olarak yağlı kağıt kullanılmıştır. Katkı maddeleri olarak T ve CP yerel bir aktardan satın alınmıştır.

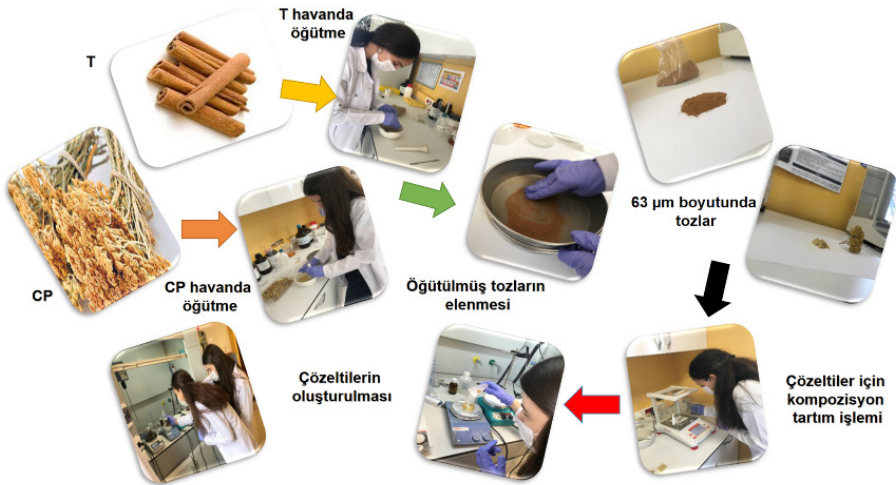
2.2. Deneysel Plan Ve Teknikler

2.2.1. Yara İyileştirici Nanofiber Membran Üretimi

PAN polimeri literatürde ki çalışmalar incelendiğinde yara iyileşmesi üzerine kullanılmaktadır. PAN polimeri ağırlıkça 10 gr tartılarak 90 ml DMF çözücüsü ile çözelti haline getirilmiştir. %1 oranında T, CP ve T-CP blendi PAN çözeltisine takviye edilerek dört farklı kompozisyon elde edilmiştir (Buluş vd., 2021). Yara iyileştirici çözeltilerin hazırlanma parametreleri Tablo 2.1’de yer almaktadır. Yara iyileştirici çözeltilerin hazırlanma aşamaları Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

Tablo 2.1: Yara iyileştirici çözeltilerin hazırlanma parametreleri

Polimer / Katkı maddesi	Çözücü	Karışım sıcaklığı (°C)	Karıştırma süresi (dakika)
%10 PAN	DMF	60	60
%10 PAN+%1 T	DMF	60	60
%10 PAN+%1 CP	DMF	60	65
%10 PAN+%1 T+%1 CP	DMF	70	70



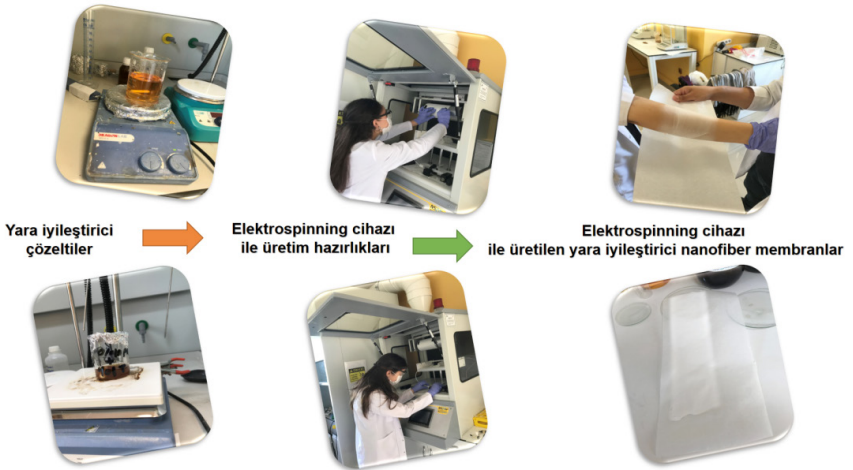
Şekil 2.1: Yara iyileştirici çözeltilerin hazırlanma aşamaları

Yara iyileştirici nanofiber membran üretimi için gerekli elektrospinning parametreleri Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Yara iyileştirici nanofiber membran üretimi için gerekli elektrospinning parametreleri

Polimer / Katkı Maddesi	İğne Ucu ile Toplayıcı Arası Mesafe (cm)	Debi (ml/saat)	Voltaj (kV)
%10 PAN	15	2.5	30
%10 PAN+%1 T	15	2.5	30
%10 PAN+%1 CP	15	3.0	30
%10 PAN+%1 T+%1 CP	15	3.0	30

Oluşturulan dört farklı kompozisyon çözeltisinden Tablo 2.2’deki üretim parametreleri uygulanarak yara iyileştirici nanofiber membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Elektrospinning yöntemiyle yara iyileştirici nanofiber membran üretim aşamaları Şekil 2.2’de yer almaktadır.



Şekil 2.2: Elektrospinning yöntemiyle yara iyileştirici nanofiber membran üretim aşamaları

2.3. Karakterizasyon Çalışmaları

2.3.1. Yapısal Karakterizasyon

Yara iyileştirici nanofiber membranların FTIR analizleri Jasco marka 6600 model analiz cihazında 400 ile 4400 cm^{-1} dalga sayısı aralığında belirlenen yüzde transmittans (%T) değerlerine bağlı olarak numunelerin yapılarında bulunan bağlar tespit edilmiştir.

2.3.2. Morfolojik Karakterizasyon

Üretilen yara iyileştirici nanofiber membranların FEI FEGSEM QUANTA 450 marka cihazında nanolif çaplarının incelenmesi sırasında 8000x ve 16000xkat oranında büyütülmüş görüntüler 7 kV potansiyelde incelenmiştir. Görüntüler üzerinden 40 adet nanofiber çapı ölçülerek aritmetik ortalamaları alınarak ortalama nanofiber çap aralıkları belirlenmiştir.

2.3.3. Mekanik Karakterizasyon

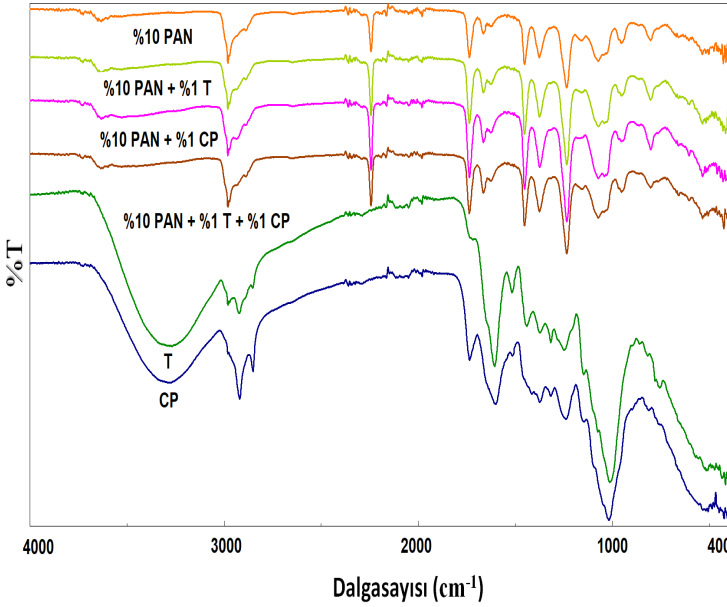
Üretilen yara iyileştirici nanofiber membranların ASTM E4 standartlarına göre mekanik özellikleri Devatrons mekanik analiz cihazı kullanılarak belirlendi. Numunelerin mekanik özellikleri, 5 mm^2 / dakika çekme hızında, 10 mm çene aralığı ayarlanarak oda koşullarında belirlenmiştir. Numunelere üçer kez mekanik analiz işlemi uygulanarak çekme mukavemetlerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Üretilen yara iyileştirici nanofiber membranların mekanik analiz öncesi membran et kalınlıkları dijital göstergeli mikrometre ile sağlandı.

3. Bulgular Ve Tartışma

3.1. Yapısal Karakterizasyon

T, CP katkı maddeleri ve yara iyileştirici nanofiber membranların FTIR analizi ile fonksiyonel grupların varlığı ile yapılarak aydınlatılmıştır. 3500-1000 cm^{-1} aralığında güçlü karakteristik absorpsiyon bandını karboksilik, hidroksil ve epoksi gruplarının varlığını işaret eder. Özel olarak, 3430 cm^{-1} 'deki iki güçlü tepe ve 1610 cm^{-1} O için karşılık gelir ve aromatik C=C germe gerilme titreşimlerinin H iken, 1785 cm^{-1} , 1105 cm^{-1} tepe değeri, C=O germe titreşimlerine ve C=O germe titreşimlerine karşılık gelmektedir (Koosha ve Mirzadeh, 2015). T'nin FTIR spektrumu incelendiğinde aktif bileşenin fonksiyonel grupları ve bağlama yapıları FTIR tepe konumlarına

dayanmaktadır. T için 3435 cm^{-1} 'de merkezlenmiş güçlü bir emilim bandı ortaya çıkarmıştır. O-H'ye tahsis edilen alkollerin ve fenollerin gerilme titreşimi grup, alkanların C-H germe titreşimine 2920 cm^{-1} atanmıştır. 2099 cm^{-1} 'deki bant, $\text{-C}\equiv\text{C-}$ gerilmesinin varlığını belirtmiştir. Alkinler ve aldehitler 1702 cm^{-1} 'de görülen bant temsil etmek için karboninin esnetilmesi T için önemli bir bileşeni olan O alken gruplarını (sinnamaldehit) göstermektedir. 1448 cm^{-1} piki, titreşimsel bükülme emilimine karşılık gelmiştir. C-OH alkanları, buna karşılık 1358 cm^{-1} 'deki emme bandı aromatik aminlerin C-N gerilmesinden kaynaklanmaktadır. 1096 cm^{-1} 'deki bandın, C-O gerilmesinin varlığını ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Alifatik aminlerin 774 cm^{-1} ve 690 cm^{-1} 'deki bantlar alkinlerin ve alkil halojenürlerin $\text{C}\equiv\text{C-H}$ bükülmesi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu açıktır T'nin, yüksek seviyede aldehid ve daha önce bildirildiği gibi cinnamaldehit ihtiva etmesinden ortaya çıkmaktadır (Saudi vd., 2019). CP FTIR spektrumu incelendiğinde $<1000\text{ cm}^{-1}$ düzlemde CH bükülme titreşimlerine karşılık gelir, $997\text{-}1140\text{ cm}^{-1}$ 1033 , 1042 , 1072 , 1104 ve 1133 'teki CO (mono-, oligo- ve karbonhidratlar) gerilme titreşimlerinin emilimine karşılık gelir, 1136 cm^{-1} , $1150\text{-}1270\text{ cm}^{-1}$, karbonil CO'nun gerilme titreşimlerine dayanmaktadır. $1300\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$ fenil gruplarından gerilme titreşimleri C-O (amid) ve C-C gerilmelerine karşılık gelirken, $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$ aromatik alana ve N-H bükülme titreşimlerini işaret etmektedir. NH (amino asitler) eğilme titreşimlerine karşılık gelen kompleks $1600\text{-}1760\text{ cm}^{-1}$ bantları, 1710 cm^{-1} dalgasayısı olan C=O ve 1740 cm^{-1} gibi esterin C=O. $2800\text{-}2900\text{ cm}^{-1}$, lipitlerden, metoksi türevlerinden CH_3 ve CH_2 'ye özgü C-H germe titreşimlerine karşılık gelmektedir $3350\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ OH gruplarının (su, alkoller, fenoller, karbonhidratlar, peroksitler) gerilme titreşimlerini işaret etmektedir. Tüm numunelere ait FTIR spektrumları incelendiğinde PAN, T ve CP maddelerinin fonksiyonel grupları çıkarılarak yara iyileştirici nanofiber membran yapısında ihtiva ettiği belirlenmiştir. PAN nanofiber membranı ile T ve CP maddelerinin benzeri pikleri yara iyileştirici nanofiber membran yapısında çakıştığı belirlenmiştir. O sebeple ayırt edici pikler seçilememiştir. Ancak, PAN nanofiber membranına göre T ve CP katkısının PAN piklerinin şiddetini artırdığı gözlemlenmiştir. Yara iyileştirici nanofiber membranların FTIR analiz grafiği Şekil 3.1.'de gösterilmektedir.

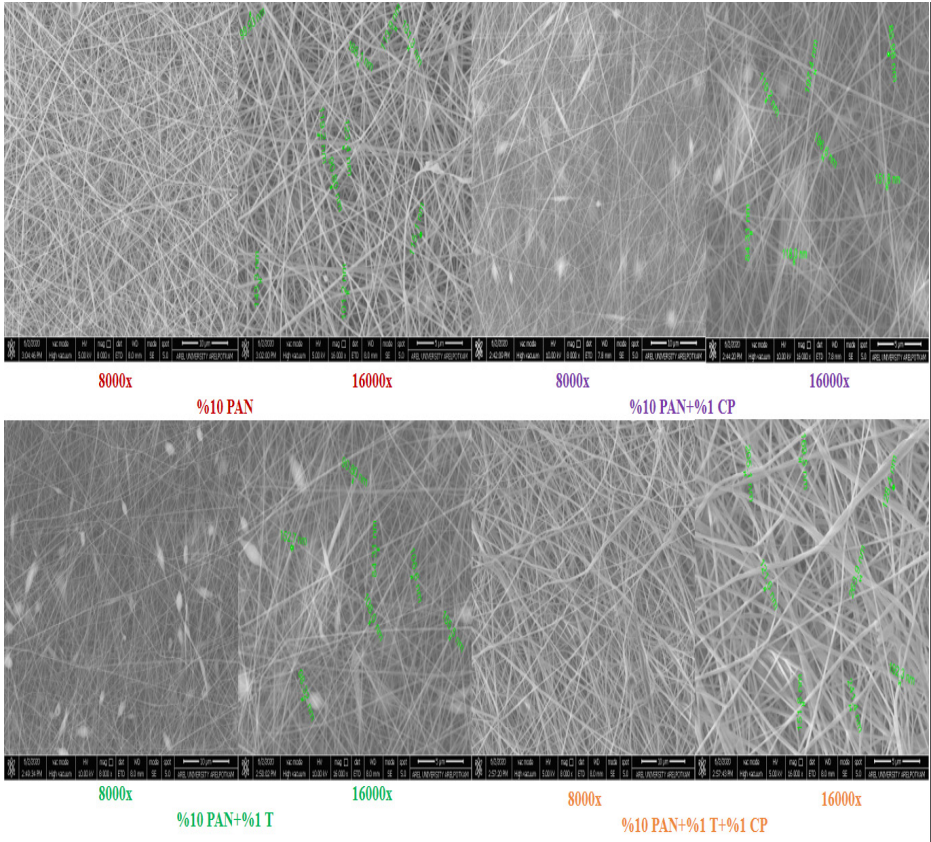


Şekil 3.1: Yara iyileştirici nanofiber membranların FTIR analiz grafiği

3.2. Morfolojik Karakterizasyon

Tüm numunelerde nanofiber üretimleri gerçekleştirilmiştir. FEGSEM görüntüleri 8000x ve 16000x büyütme oranlarında çekilmiştir. FEGSEM görüntülerinden PAN nanofiberlerinin homojen nanofiberlerden meydana geldiğini belirledik ve ortalama nanofiber çap dağılımı FEGSEM görüntüleri üzerinden 40 adet nanofiberin ölçümünün aritmetik ortalamalarından ortalama çap dağılımı ortaya çıkarılmıştır. PAN nanofiber ortalama çap dağılımı 100-210 nm aralığına sahiptir. %1 T katkılı PAN nanofiber membranında farklı yönelmelere sahip topaklanmalar meydana gelmiş olup, bu topaklanma T ilavesinden meydana gelmiştir. Ortalama çap dağılımı incelendiğinde T ilavesi PAN nanofiberlerinin etrafını homojen bir şekilde sararak fiber çaplarını inceltmiştir ve 83-170 nm aralığında bir fiber ortalama çap dağılımını ortaya koymuştur. CP katkılı PAN nanofiberlerinin ortalama çap dağılımı 80-200 nm olup, CP katkısından dolayı PAN nanofiberlerinin üzerlerinde yer yer dağınık halde topaklanmalar oluşmuştur. %1 T+%1 CP katkılı PAN nanofiberleri incelendiğinde ortalama nanofiber çap dağılımı 110-270 nm olup, %1 T+%1 CP ilavesi ile PAN nanofiberleri üzerinde bulunan topaklanmalar yok olurken fiber çapları kalınlaşmıştır. Tüm numunelere bakıldığında PAN nanofiberlerine göre

katkı maddesi ilavesi ile fiber çaplarının ortalama olarak incelendiği ve yer yer topaklanmaların meydana geldiği tespit edilmiştir (Zahedi ve Fallah-Darrehchi, 2015). Ancak katkı maddesi ilavesi çözeltinin elektriksel iletkenlik değerini artırarak daha iyi bir fiber FEGSEM görüntüsü meydana getirmiştir. Şekil 3.2’de yara iyileştirici nanofiber membranların 8000x ve 16000x büyütmelerdeki FEGSEM görüntüleri ve Tablo 3.1’de yara iyileştirici nanofiber membranların FEGSEM görüntüleri üzerinden hesaplanan ortalama nanofiber çap değerleri yer almaktadır.



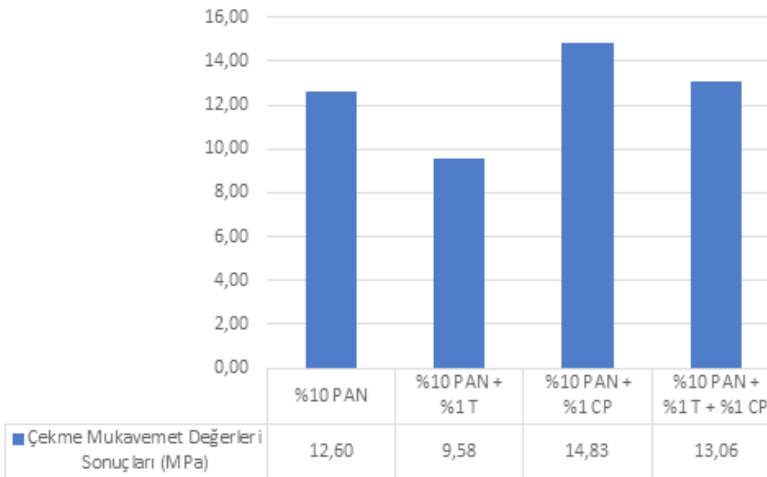
Şekil 3.2: Yara iyileştirici nanofiber membranların 8000x ve 16000x büyütmelerdeki FEGSEM görüntüleri

Tablo 3.1: Yara iyileştirici nanofiber membranların FEGSEM görüntüleri üzerinden hesaplanan ortalama nanofiber çap değerleri

Numune Adı	Numunelerin Nanofiber Çap Dağılım Aralığı (nm)
%10 PAN	100-210
%10 PAN+%1 T	83-170
%10 PAN+%1 CP	80-200
%10 PAN+%1 T+%1 CP	110-270

3.3. Mekanik Karakterizasyon

Tüm numuneler ASTM E4 standarına göre 1x4 cm boyutunda kesilerek mekanik özellikleri belirlenmek üzere çekme test cihazı çenelerine bağlanmıştır. Numuneler üçer kez tekrarlanarak aritmetik ortalamaları belirlenmiştir. Numunelerin çekme mukavemet değerleri incelendiğinde %10 PAN nanofiber membranın 12,60 MPa olduğu saptanmıştır. PAN matris yapısına %1 T ilavesi ile 9,58 MPa çekme mukavemet değeri elde edilmiştir. %1 CP katkısının PAN üzerinde mukavemet artışı sağladığı tespit edilmiştir, elde edilen çekme mukavemet değeri 14,83 MPa olarak elde edilmiştir. PAN matris yapısına katılmış %1 T-%1 CP blend katkısı ile 13,06 MPa değeri tespit edilmiştir. Çekme mukavemet test grafiği incelendiğinde %10 PAN+%1 T nanofiber membran çalışmadaki en düşük değere sahip olurken, %T ilavesi mukavemet düşüşü sağlarken, %CP katkısı mukavemet artışı göstermektedir. Tüm numuneler incelendiğinde en yüksek çekme test değeri %10 PAN + %1 CP nanofiber membranında ortaya çıkmıştır (Lee vd., 2009). Yara iyileştirici nanofiber membranların çekme mukavemet test grafiği Şekil 3.3’de yer almaktadır.



Şekil 3.3: Yara iyileştirici nanofiber membranların çekme mukavemet test grafiği

Tablo 3.2’de yara iyileştirici nanofiber membranların çekme mukavemet ve et kalınlığı değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.2: Yara iyileştirici nanofiber membranların çekme mukavemet ve et kalınlığı değerleri

Polimer / Katkı Maddesi	Yara iyileştirici nanofiber membranların et kalınlığı (mm)	Yara iyileştirici nanofiber membranların çekme mukavemet değerleri (MPa)
%10 PAN	0.33	12,60
%10 PAN+%1 T	0.27	9,58
%10 PAN+%1 CP	0.36	14,83
%10 PAN+%1 T+%1 CP	0.34	13,06

4. Sonuçlar

Çalışmamızda elektrospinning tekniği ile yara iyileştirici nanofiber membranlar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen yara iyileştirici nanofiber membranlara yapısal, morfolojik ve mekanik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. FTIR yapısal analiz sonuçlarına göre PAN, T ve CP maddelerinin fonksiyonel grupları belirlenerek yara iyileştirici nanofiber membran yapısında T ve CP maddelerinin PAN içerisindeki katkı oranının az olmasından dolayı belirgin bir pik elde edilememiştir. Ancak T ve CP katkısı sonucu PAN piklerinin şiddetinin artması ile yara iyileştirici nanofiber membran yapı içerisinde var olduğu kanısına varılmıştır. FEGSEM analiz sonuçlarına göre tüm numunelerde nanofiber oluşumu gözlemlenmiştir. PAN nanofiber membrane numunesine nazaran T ve CP katkıları PAN nanofiberlerinin çaplarını incelterek daha sıkı paketli bir yara iyileştirici nanofiber membran elde edilmiştir. Tüm numuneler incelendiğinde %10 PAN+ %1 T+%1 CP kompozit nanofiber membranımız çalışmadaki en ince nanofiber yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Mekanik analiz sonuçlarına göre PAN nanofiber membranlarının çekme mukavemet değeri 12.60 MPa olduğu sonucuna varılmıştır. T katkılı PAN numunesi çalışmamızdaki en düşük çekme mukavemet değerine sahip olduğu, CP katkılı PAN numunesinin ise en yüksek çekme mukavemet değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde elde edilen nanofiber membranımız yara iyileştirici uygulamalarda ideal bir malzeme olabileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmamızın devamında;

- Yara iyileştirici nanofiber membranlarımıza in vivo ve in vitro biyolojik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilerek yara iyileştirme özellikleri belirlenebilecektir.

- Yara iyileştirici nanofiber membranlarımıza antimikrobiyal testler uygulanarak antimikrobiyal özellikleri belirlenecektir.

- PAN, T ve CP maddelerinin farklı konsantrasyonlarda çözelti oluşturularak ideal bir malzeme optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi sağlanacaktır.

- Farklı polimer ve katkı maddeleri kullanılarak yara iyileştirici nanofiber membranlarımızın mekanik özellikleri iyileştirilecektir.

- Farklı polimer ve katkı maddeleri kullanılarak sağlık sektörünün yanı sıra, tekstil, gıda, tarım, filtrasyon, savunma gibi sektörlerde kullanılacak amaca yönelik fonksiyonel malzemeler elde edilecektir.

Referanslar

Anghel, A. G., Grumezescu, A. M., Chirea, M., Grumezescu, V., Socol, G., Iordache, F., ... & Holban, A. M. (2014). MAPLE fabricated Fe₃O₄@Cinnamomum verum antimicrobial surfaces for improved gastrostomy tubes. *Molecules*, 19(7), 8981-8994.

Buluş, E., Buluş, G. S., Akkaş, M., Cetin, T., Yaman, E., & Altındal, T. (2020). Nanotechnological Wound Healing Bandage Production from Polymer Solutions Containing Tea Tree Oil, Echinacea, Spider Web and Aloe Vera. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 6(1), 19-23.

Buluş, E., Buluş, G. S., Akkaş, M., & Çetin, T. (2021). Production and Morphological Characterization of Nanofiber Membrane with Natural Wound Healing. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 2(1), 1-5.

Buluş, E., Buluş, G. S., & Akkaş, M. (2021). Investigation of the Effects of Working Parameters in Electrospinning Technology on Morphology of Polymeric Nanofiber Membranes Using Reference Polymers. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 2(1), 6-11.

CAM, E. M., CESUR, S., AŞKIN, T., ŞAHİN, M., Y., Fabrication, Characterization And Fibroblast Proliferative Activity Of Electrospun Achillea Lycaonica-Loaded Nanofibrous Mats, 2019.

Koosha, M., & Mirzadeh, H. (2015). Electrospinning, mechanical properties, and cell behavior study of chitosan/PVA nanofibers. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 103(9), 3081-3093.

Lee, H. W., Karim, M. R., Ji, H. M., Choi, J. H., Ghim, H. D., Park, S. M., ... & Yeum, J. H. (2009). Electrospinning fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/montmorillonite nanofiber mats. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(3), 1860-1867.

RAUCHENSTEINER, F., Rauchensteiner, F., NEJATI, S., & SAUKEL, J. (2004). The *Achillea millefolium* group (Asteraceae) in Middle Europe and the Balkans: a diverse source for the crude drug *Herba Millefolii*. *Journal of Traditional Medicines*, 21(3), 113-119.

Saudi, A., Rafienia, M., Zargar Kharazi, A., Salehi, H., Zarrabi, A., & Karevan, M. (2019). Design and fabrication of poly (glycerol sebacate)-based fibers for neural tissue engineering: Synthesis, electrospinning, and characterization. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(6), 1427-1440.

Zahedi, P., & Fallah-Darrehchi, M. (2015). Electrospun egg albumin-PVA nanofibers containing tetracycline hydrochloride: Morphological, drug release, antibacterial, thermal and mechanical properties. *Fibers and Polymers*, 16, 2184-2192.

Zhao, Y., Li, X., Shen, J., Gao, C., & Van der Bruggen, B. (2020). The potential of Kevlar aramid nanofiber composite membranes. *Journal of materials chemistry A*, 8(16), 7548-7568.

BÖLÜM XI

ATIK MALZEME İÇEREN NANOKOMPOZİTLER

Nanocomposites Containing Waste Material

**Erdi BULUŞ¹ & Yeşim Müge ŞAHİN² & Kübra GÖDEK³
Gülseren SAKARYA BULUŞ⁴ & Mehmet AKKAŞ⁵**

¹(Öğr. Gör.): İstanbul Arel Üniversitesi, ArelPOTKAM (Polimer Teknolojileri ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi), İstanbul, 34537,
Türkiye, erdibulus@arel.edu.tr
ORCID: 0000-0002-2045-2499

İstanbul Arel Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü,
Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri Programı, İstanbul, 34295,
Türkiye, buluserdi@gmail.com

²(Doç. Dr.), İstanbul Arel Üniversitesi, ArelPOTKAM (Polimer Teknolojileri ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi), İstanbul, 34537, Türkiye,
ymugesahin@arel.edu.tr
ORCID: 0000-0003-2119-1216

³(Öğrenci), İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34537,
Türkiye, godekkubra1965@gmail.com

⁴(Uzman), İstanbul İl Sağlık Müdürlüğü, Ar-Ge Projeler Birimi,
İstanbul, 34093, sakaryagulseren1@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6096-8177

⁵(Doç. Dr.), Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Kastamonu, 37150, Türkiye,
mehmetakkas@kastamonu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0359-4743

İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34467, Türkiye

1. Giriş

1962'nin ortalarına kadar yara pansuman ve iyileştirme araştırmaları biraz ihmal edildi. Önceden, yaranın kuru ve üstü açık tutulursa iyileşmesinin daha hızlı ve daha etkili olduğu sanılıyordu. Bu spekülasyon, yara iyileştirme malzemeleri için ideal gereksinimleri belirlemeden önce varsayılmıştı (Pancur vd., 2022). Winter'ın öncü çalışması, yaralı domuz derisinin epitel onarımının havaya maruz kalan yaralara kıyasla en az iki kat olduğunu ortaya koyduğu ilk nesil yara filmi veya "pansumanları" tasarladı. Bu tarihten itibaren yara örtüsü geliştirme çalışmaları ve araştırmaları daha da ilerlemiştir (<https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2022/12/TIBBI-BILIMLERDE-YENILIKCI-YAKLASIMLAR.pdf>).

Rana Shimizu, Yoshimune Nonomura (2017), insan derisinin iç yapısını ve mekanik özelliklerini taklit eden yapay deri geliştirmektedir. Krem yapımı aşamasında kremlerin denenmesi için yapılan bir deridir. Yapay deri; Sert bir yüzey filmi yumuşak bir alt tabakadan oluşan suni deri modelleri oluşturulmuş. Farklı yüzey kalınlıklarına ve substrat sertliğine sahip A'dan D'ye suni deri modelleri hazırlamak için, substratlardan birine a veya b filmi tutturulmuştur. Akrilik yapıştırıcı a ve b filmlerinin bir tarafına kaplandığından, filmi üreten substrat üzerine sabitlemek mümkün görülmektedir. Poliüretan substratları elde etmek için 90g ana bileşen ve 30g sertleştirici akrilik reçine kalıbına dökülerek floresan levha ile kaplanarak 24 saat oda sıcaklığına bırakılıyor. Kremler, su damlacıklarının bir yağ fazında dağıldığı yağda su emülsiyonu ve yağ damlacıklarının su fazında dağıldığı suda yağ emülsiyonuydu. Bu çalışmada, yumuşak bir üretan jel, yapay bir cilt modeli hazırlamak için mikroskobik olarak pürüzlü bir yüzeye sahip bir poliüretan film ile kaplandı. Modelin dokunsal skorunun insan derisinin geleneksel suni deriden daha yakın olduğu gözlemlenmiş. Bu çalışmada geliştirilen suni derinin, sıvı kozmetik kullanırken yaşanan hisleri değerlendirecek bir sistem oluşturulmasında faydalı olması beklenmektedir (Shimizu ve Nonomura, 2018).

F.A. Sheikh ve arkadaşları (2015), Bu çalışmada elektroçizme tekniğinin eksikliklerinin üstesinden gelmek için suda çözünür bir polimer yani ipek fibroin için CPE teknolojinin kullanımı anlatılmaktadır. Bu teknik kullanılarak elde edilen nanolifler TE ile üretilen 2B nanolif levhalar ve SLE teknikleri kullanılarak üretilen 3B nanolif yapı iskekeleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Amacı ise CPE ile 3D nanofiberleri kullanarak deri yerine kullanılması geliştirilmektedir.

Kozalar, Partikül büyüklüğü 200 µm olan sodyum klorür (NaCl), %10 ölümcül sığır serumu, %1 penisilin-streptomisin ve Tripsin kokteyli ile desteklenmiş Dulbecco'nun modifiye Eagle ortamı, Fosfat Tampon Salin (PBS) pH 7.4 (1 ×) ve Tripan Mavisi Leke %0,4, Hücre tohumlaması ve büyümesi için doku kültürü şişeleri ve mikroplakları BD Falcon™ (Winston-Salem, NC, ABD) ve SPL Life Sciences kullanılmıştır. CPE tekniği ile hazırlanan 3D nanofiber yapı iskeleleri, soğutma yapabilen bir daldırma soğutucu kullanılarak gerçekleştirilerek soğutucudan çıkan esnek bir soğutma transfer borusu, soğuk plaka için delikleri olan yalıtımlı bir kutunun içine yerleştirilerek toplayıcı, buz soğutucusuna bağlandı. TE ve SLE teknikleri uygulandı. Aynı zamanda, soğuk bir levha 0°C'nin altını algıladığında elektroegirmenin başlamasına izin verildi, bu da aynı anda buz kristali katmanlarının birikmesine ve toplayıcı üzerinde nanoliflerin birikmesine neden oldu. Ayrıca, buz parçacıklarının katman katman birikimi, soğuk plaka üzerindeki elektrik iletkenliğini artırmaya devam etti, bu da nanofiberlerin tam kalınlıkta biriktirilme olasılığının artmasıyla sonuçlandı. Son olarak, TE, SLE ve CPE tarafından üretilen tüm nanofiberler hemen dondurularak kurutuldu, kristalizasyon için %95 etanole daldırıldı ve daha sonra belirtildiği gibi de-iyonize suda "kurban" peo'nun uzaklaştırılması sağlandı. CPE ile üretilen nanofiber diğer tekniklerle üretilen nanofiberlere göre kalınlığı daha mükemmeldir. Fiziksel bütünlüğü kaybolmamaktadır. CPE kullanılarak yapılan elektroegirme, TE ve SLE teknikleri kullanılarak elde edilenlerden daha yüksek gözenekli nanolifler üretebilir. CPE tekniği kullanılarak 10 mm'den daha büyük bir tam kalınlıkta 3D nanofiber iskele elde etmek mümkün görülmektedir. Bu teknik, kesin şekil ve morfolojilere sahip biyomalzemelerin üretimini kolaylaştırmak için doğrudan uygulanabilir; özellikle, bu tür nanolifler, dermise, burna veya kulağa benzeyen yapılar oluşturmak veya diğer yüz kusurlarını onarmak için kullanılabilir denmektedir (Sheikh vd., 2015).

Buluş ve arkadaşları (2021), Bu çalışmada doğal yara iyileştirici özelliği olan maddelere ilaveler eklenerek elektrospinning tekniği ile nanofiber membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Morfolojik analizleri Taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Papatya, bal, sarımsak, Çam sakızı, nar, yonca gibi bitkiler. Polikaprolakton, polivinialkol, polietilenoksit, poliüretan, polistiren, polilaktik asit, poliakrilonitril. Çeşitli çözücüler kullanılmış. Yara iyileştirmek için solüsyonlar hazırlanmış. Elektrospinnig yöntemi ile yara iyileştirici nanofiber membran üretimi yapılmıştır. Sonuç olarak nanofiber membranın morfolojik karakteri incelenerek nanolif çap aralıkları belirlenmiştir. Nanolif oluşumu olumlu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar üretilen polimerik matrisli kompozitlerin iyi birer yara iyileştirici olacağı belirlenmiştir (Buluş vd., 2021).

Hwang ve arkadaşları (2010), gentamisin yüklü bir yara örtüsü geliştirmek için, donma-çözme yöntemi kullanılarak PVA ve dekstran ile çapraz bağlı hidrojel filmler hazırlamışlardır. Jel fraksiyonu, şişme, su buharı iletim testi, morfoloji, çekme dayanımı ve termal özellik gibi jel özelliklerini incelenmişlerdir. In vitro protein adsorpsiyon testi, in vivo yara iyileşme testi ve histopatoloji testleri yapmışlardır. Dekstran jel fraksiyonunu, maksimum mukavemeti ve hidrojellerin termal stabilitesini azalttığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, şişme kabiliyeti, su buharı iletim hızı, elastikiyet, gözeneklilik ve protein adsorpsiyonu özelliklerinin arttığını tespit etmişlerdir. İlaç hidrojellerin jel özellikleri üzerinde küçük bir pozitif etki yarattığını saptamışlardır. %2,5 PVA, %1.13 dekstran ve %0.1 ilahtan oluşan gentamisin yüklü yara örtüsü, PVA ile çapraz bağlanma etkileşimi nedeniyle, sadece PVA ile olandan daha şişebilir, esnek ve elastik olduğunu belirlemişlerdir. Özellikle, yeterli bir nem seviyesi sağlayabilir ve yara bölgesindeki sızıntıları biriktirebilir olduğunu düşünmüşlerdir. İn vivo yara iyileşmesi ve histolojik sonuçlardan, bu gentamisin yüklü yara sargısı, gentamisin potansiyel iyileştirici etkisi nedeniyle, geleneksel ürüne kıyasla iyileşme etkisini daha da arttırmış olduğunu saptamışlardır. Bu nedenle, bu gentamisin yüklü yara sargısı, yara bakımında mükemmel şekillendirme ve iyileştirici etkisi olan potansiyel bir yara sargısı olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Hwang vd., 2010).

Kompozit malzemeler de yara iyileştirici ürünler grubuna özellikle nanoteknolojinin gelişimi ile önemli katkılar sunmuş ve sunmaya devam etmektedir. İdeal bir yara örtüsünde olması gereken özellikler olarak yara izi giderme, kanama durdurma, yaranın iyileşme durumunu kontrol etme, enfeksiyondan koruma, nefes alabilme ve akıntı giderme sayılabilmektedir. Yara örtülerine Dünya üzerinde önemli katkı elektroğirme tekniği ile verilmiştir. Elektroğirme sistemi, polimer çözeltilerinden elektriksel alan yardımı ile nanolif membran üretim tekniğidir. Basitçe sistem şırınga pompası, yüksek voltaj güç kaynağı ve toplayıcı plakadan oluşmaktadır (Ahmadian vd., 2020; Buluş vd., 2021; Buluş vd., 2021; Karthick vd., 2022).

Çalışmamızda yara iyileşmesinin yanı sıra yara izi giderme üzerine kompozit malzemeler elektroğirme tekniği ile üretilmiştir. Üretilen biyomalzemelerin ideal özellikleri sağlayan yüksek performanslı yara pansuman ürünü grubuna katkı sunulacaktır.

2. Materyal Ve Metot

2.1. Materyal

Doku iskelesi üretimi için 85,000-124,000 g/mol molekül ağırlığındaki polivinil alkol (PVA), 85,000-124,000 g/mol molekül ağırlığındaki sodium

aljinat (SA), 360,000 g/mol molekül ağırlığındaki polivinilpirolidon (PVP), 300,000 g/mol molekül ağırlığındaki polietilen oksit (PEO) polimeri Sigma-Aldrich (Türkiye) firmasından satın alınmıştır. Polimeri çözmek için saf su ve elektroçirime sisteminde altlık malzeme olarak yağlı kağıt kullanılmıştır. Gıda da kullanılan jelatin (JEL) satın alınmıştır. Kudret narı, tavuk tüyü, balık pulu, hurma çekirdeği, propolis, trikalsiyum fosfat (TCP) ve kurkumin çevremizdeki işletmelerden temin edilmiştir.

2.2. Deneysel Plan ve Teknikler

2.2.1. Elektroçirime Tekniği İçin Çözeltilerin Hazırlanması

Kompozit doku iskelesi üretiminde kullanılmak üzere PVA, JEL, PEO ve PVP polimerleri saf su içerisinde manyetik karıştırıcı ile çözelti haline getirilmiştir. Ağırlıkça 10 g PVA, 2 gr JEL, 1 gr SA, 2 gr PVP ve 2 gr PEO 100 ml saf su içinde 70°C sıcaklıkta 150 dakika boyunca karıştırılarak çözelti haline getirilmiştir. Kudret narı, tavuk tüyü, balık pulu, hurma çekirdeği ve propolis liyofilizatör (dondurarak kurutma) cihazında kurutularak toz haline getirilmiştir. Tablo 2.1.'deki değerlere göre kompozit doku iskelelerinin üretimi için gerekli çözeltiler hazırlanmıştır.

Tablo 2.1: Kompozit doku iskelelerinin üretiminde kullanılan çözeltilerin hazırlanması

Polimer / Katkı maddesi	Çözücü	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma süresi (dk)
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO	Saf su	70	150
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Tavuk Tüyü-%6 Balık Pulu	Saf su	70	150
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kudret Narı-%6 Hurma	Saf su	70	150
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Propolis-%6 TCP	Saf su	70	150
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kurkumin-%6 Balık Pulu	Saf su	80	150
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin	Saf su	80	150

2.2.2. Elektroğirme Tekniği İle Kompozit Doku İskelesi Üretimi

Tablo 2.1'deki değerlerle hazırlanan çözeltiler için Tablo 2.2'de yer alan çalışma parametreleri uygulanarak elektroğirme tekniğiyle kompozit doku iskeleleri elde edilmiştir. Üretilen doku iskelelerindeki çözücünün uzaklaştırılması amacıyla etüvde 45°C'de 24 saat kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1'de elektroğirme cihazı yer almaktadır. Tablo 2.2'de kompozit doku iskelelerinin üretiminde kullanılan elektroğirme çalışma parametreleri gösterilmiştir. Doku iskelelerinin elektroğirme tekniği ile üretim aşamaları ise Şekil 2.2'de yer almaktadır. Tablo 2.2'de elektroğirme çalışma parametrelerinden besleme hızı ve voltaj değerleri sabit tutularak çalışma mesafesi değiştirilerek üretim sağlanmıştır.

Tablo 2.2: Kompozit doku iskelelerinin üretiminde kullanılan elektroğirme parametreleri

Polimer / Katkı maddesi	Akış hızı (ml/saat)	İğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe (cm)	Voltaj (kV)
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO	5.0	8	27.5
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Tavuk Tüyü-%6 Balık Pulu	5.0	8	27.5
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kudret Narı-%6 Hurma	5.0	8	27.5
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Propolis-%6 TCP	5.0	12	27.5
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kurkumin-%6 Balık Pulu	5.0	12	27.5
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin	5.0	12	27.5



Şekil 2.1: Üretimde kullanılan elektroğirme cihazı (Inovenso marka NS24XPro model elektroğirme cihazı)



Şekil 2.2 : Doku iskelelerinin elektroğirme tekniği ile üretim aşamaları; (a) Çözelti hazırlama, (b) hammadde tartımı, (c) maddelerden yağ giderimi, (ç) polimer çözeltisi hazırlama, (d) kompozit çözeltisi hazırlama, (e) hazırlanan çözeltinin şırıngaya çekimi, (f) elektroğirme ile doku iskelesi üretimi, (g) polimer doku iskeleleri, (ğ) kompozit doku iskeleleri ve (h) vakum etüvünde üretilen doku iskelesi membranlarının kurutulması

2.3. Karakterizasyon Çalışmaları

2.3.1. Yapısal Karakterizasyon (FTIR Analizi)

Kompozit doku iskelelerindeki fonksiyonel grupların varlığı, JASCO marka FT/IR-6600 model Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FTIR) cihazında $400-4400 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında belirlenmiştir. Bu işlem sonucunda kompozit doku iskelelerinin varlığı tayin edilmiştir.

2.3.2. Morfolojik Karakterizasyon (FEGSEM Analizi)

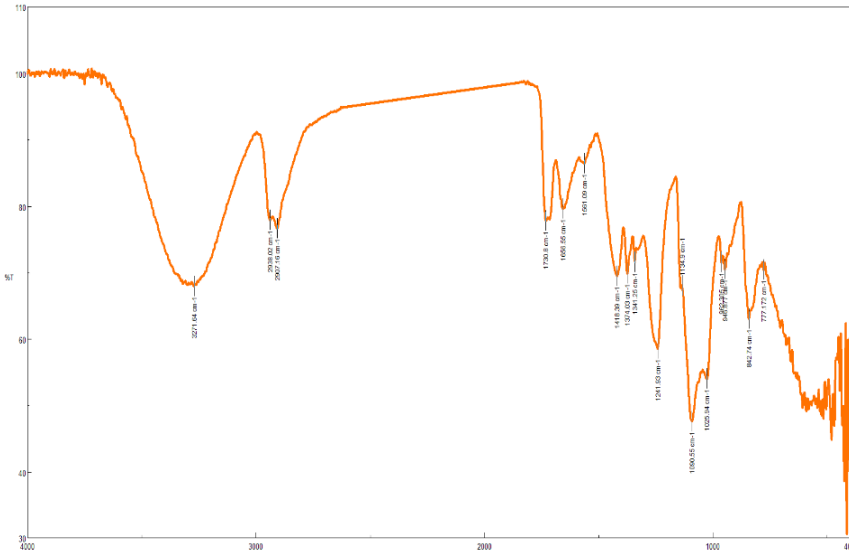
Kompozit doku iskeleleri altın-paladyum malzemesi ile Argon (Ar) gazı altında 10 dakika kaplanmıştır. Kaplama işleminin ardından FEI Quanta marka FEG450 model Çevresel Taramalı Elektron Mikroskopunda (FEGSEM) yüksek vakum (high vacuum) dedektörü ile 12.00-15.00 kV potansiyelde, numunelerin 100-500 nm, 1-40 µm skalasındaki görüntüleri alınmıştır. Görüntüler üzerinden 40 adet nanolifin çapı ölçülerek aritmetik ortalamaları hesaplanmış ve nanoliflerin çap dağılımları belirlenmiştir. Numuneler farklı büyütme değerlerinde incelenmiştir.

2.3.3. Mekanik Karakterizasyon (Çekme Testi)

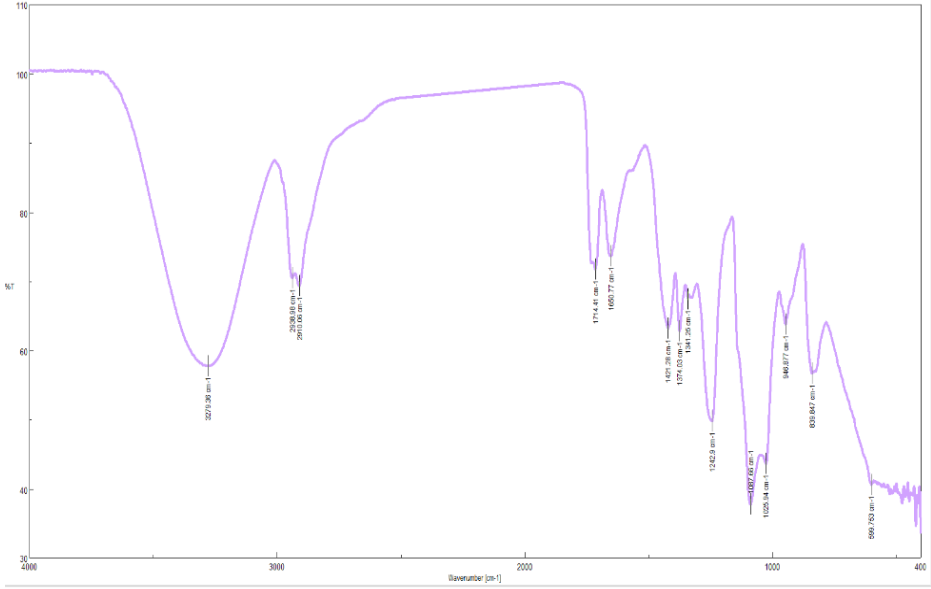
Kompozit doku iskelelerine ASTM D882-10 standartlarındaki çekme testi işlemi, DEVOTRANS marka DVT UZM K3 model çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. 500 N yük altında, 5 mm²/dk çekme hızı ile 10 mm çene aralığı ayarlanarak numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

3. Bulgular Ve Tartışma

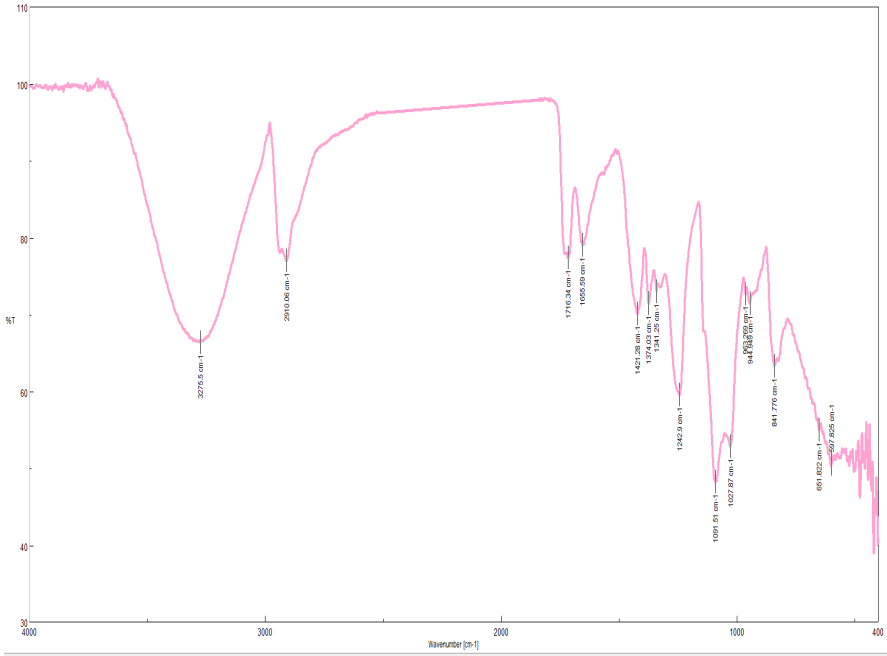
3.1. Yapısal Karakterizasyon (FTIR Analizi)



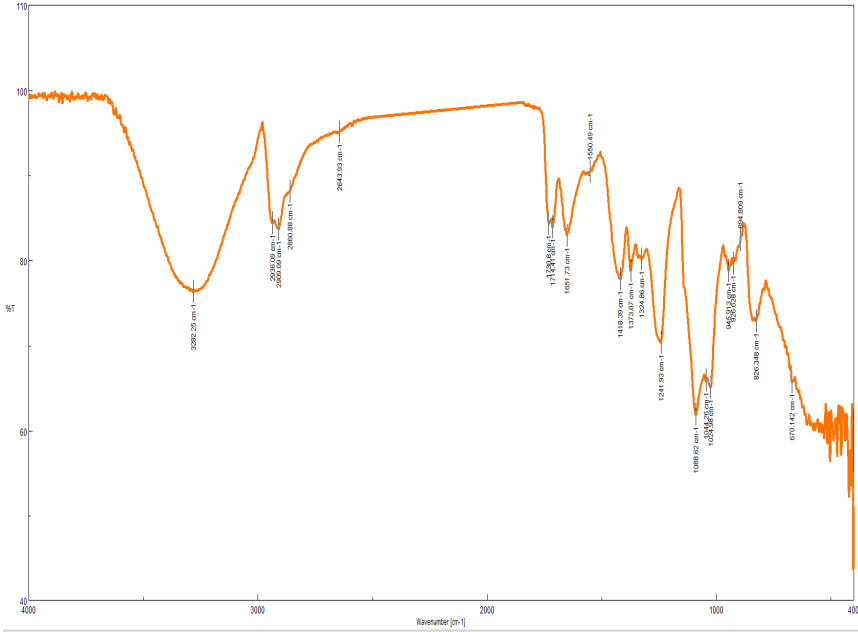
Şekil 3.1: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO FTIR Spektrumu



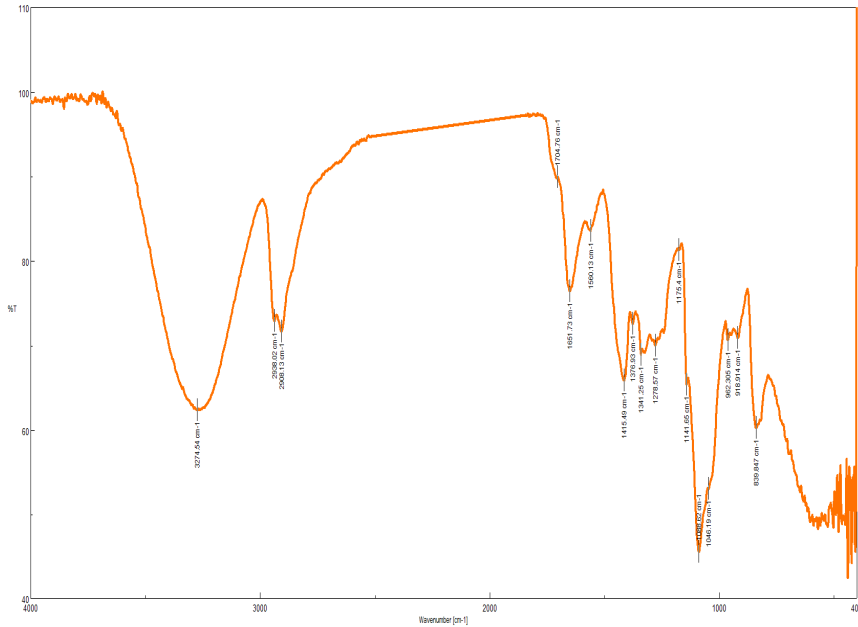
Şekil 3.2: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Hurma Çekirdeği FTIR Spektrumu



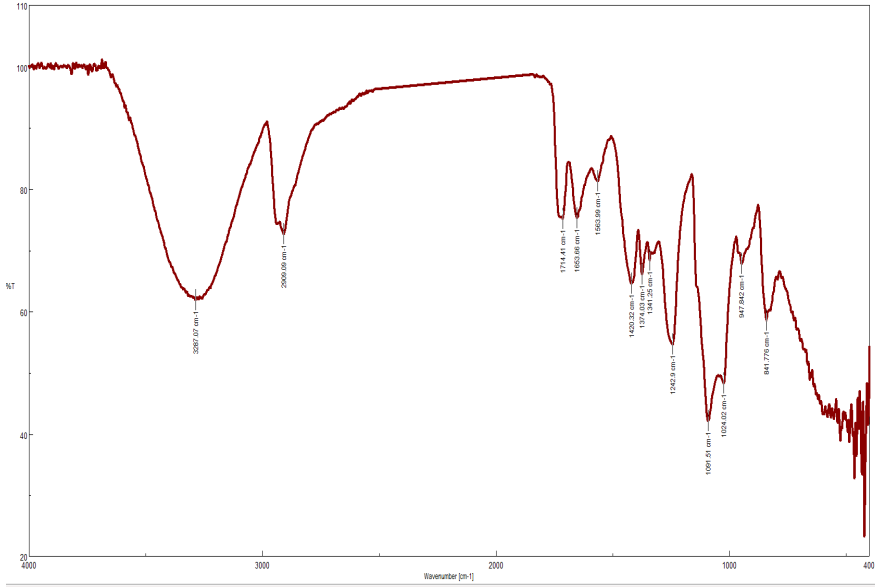
Şekil 3.3: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Propolis FTIR Spektrumu



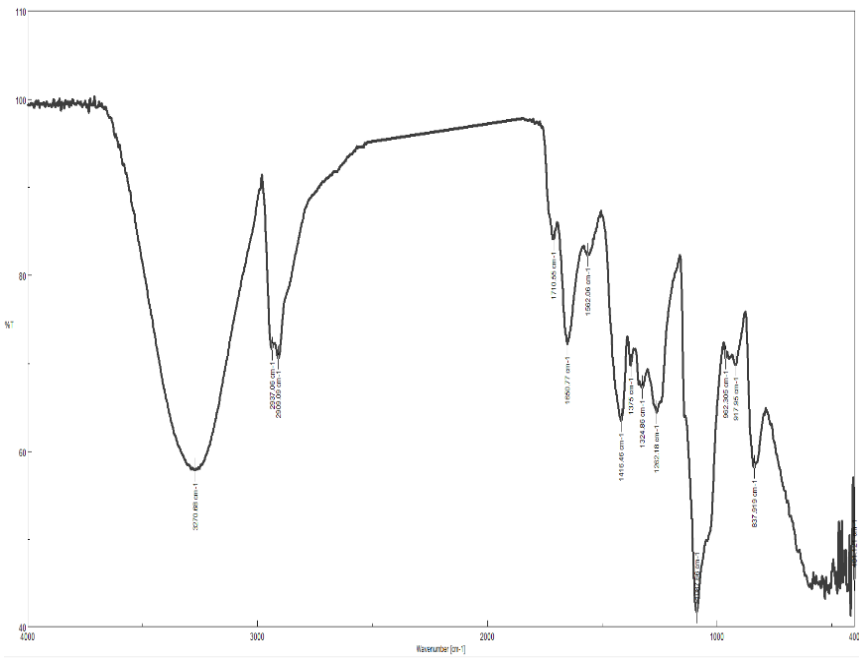
Şekil 3.4: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Tavuk Tüyü FTIR Spektrumu



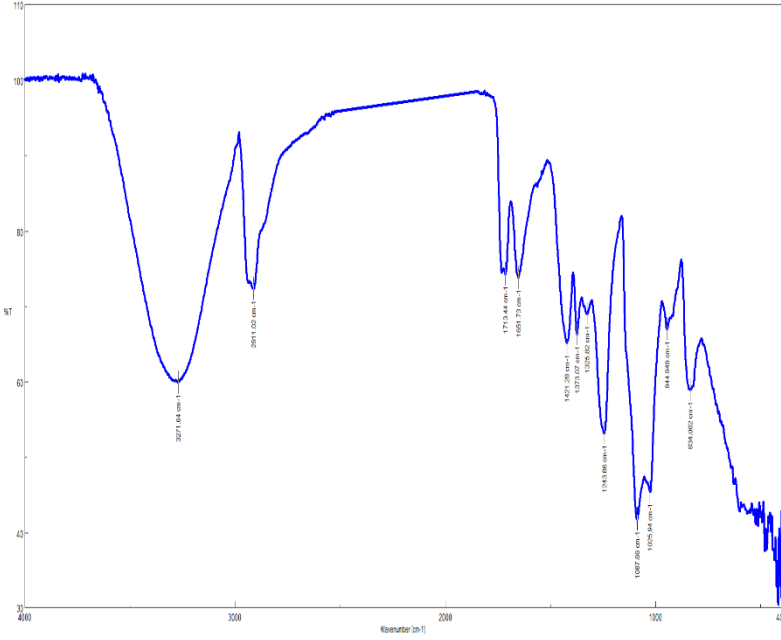
Şekil 3.5: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Balık Pulu FTIR Spektrumu



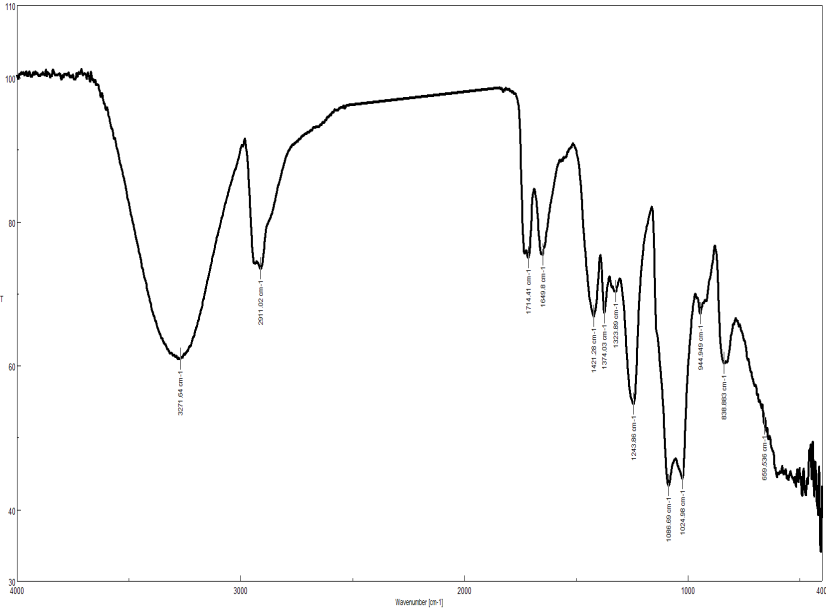
Şekil 3.6: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kudret Narı FTIR Spektrumu



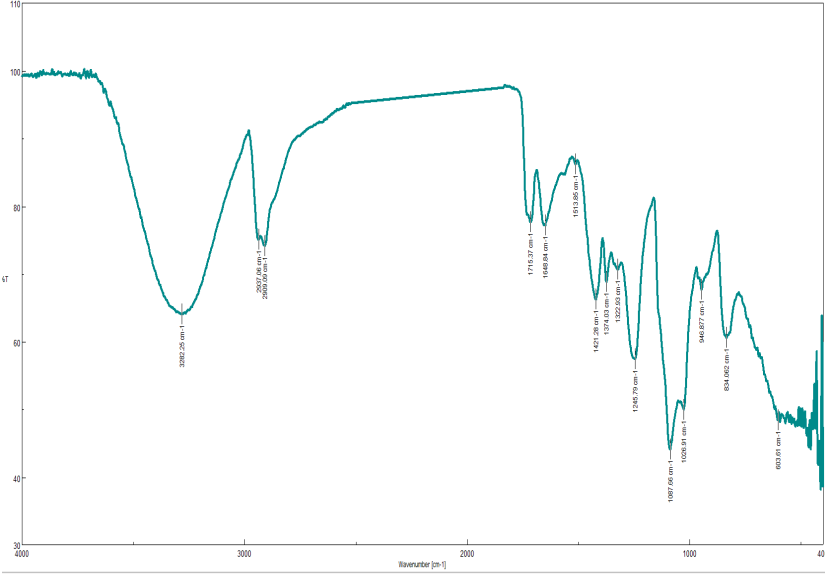
Şekil 3.7: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Tavuk Tüyü-%6 Balık Pulu FTIR Spektrumu



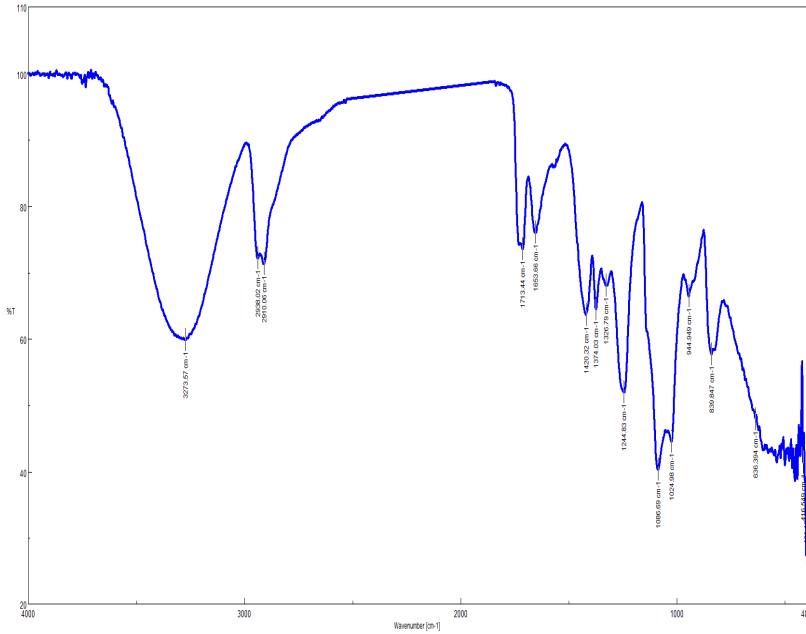
Şekil 3.8: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kudret Narı-%6 Hurma FTIR Spektrumu



Şekil 3.9: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Propolis-%6 TCP FTIR Spektrumu



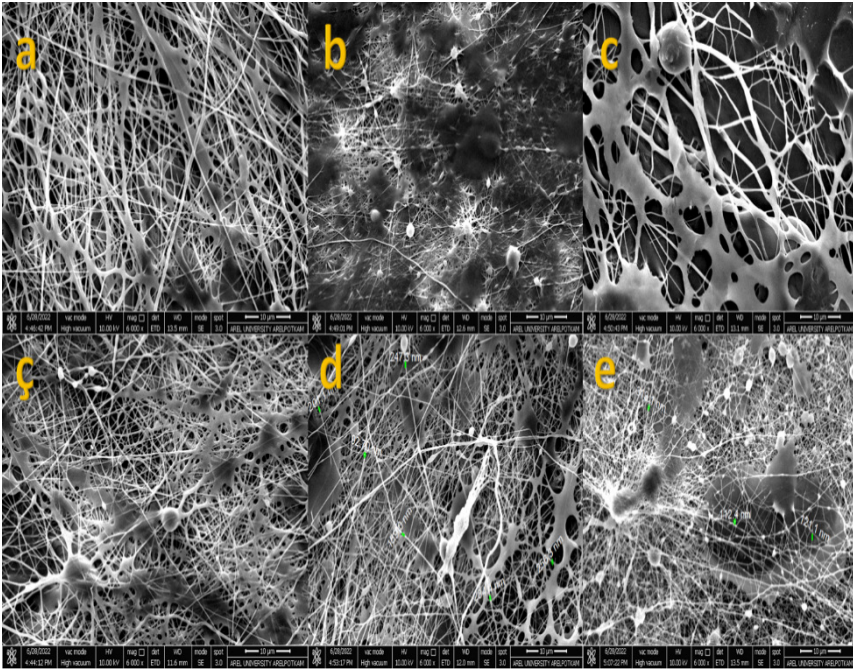
Şekil 3.10: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kurkumin-%6 Balık Pulu FTIR Spektrumu



Şekil 3.11: %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin FTIR Spektrumu

Şekil 3.1-Şekil 3.11 aralığındaki FTIR spektrumları gösterilmektedir. %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO polimer yapısındaki PVA'ya ait karakteristik titreşim bantları membranda 3286.11 cm^{-1} ($-\text{OH}$) hidroksil grubunun varlığını göstermektedir. 2916.81 cm^{-1} ($-\text{CH}_3$), 2854.13 cm^{-1} ($-\text{CH}_2$), 1421.28 cm^{-1} ($\text{O}=\text{C}-\text{OR}$), 1246.75 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) ve 835.02 cm^{-1} ($-\text{CH}$) olarak yer almaktadır. 1718.26 cm^{-1} hidrofilik kuvvetlere bağlı olarak PVA zincirleri karbonil ile hidrojen grubu arasındaki moleküller arası etkileşime atfedilmiştir. Bu bantlar mol ağırlığına göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, çalışmada kullanılan $86.000\text{-}124.000 \text{ g/mol}$ ağırlığına sahip PVA'nın $-\text{OH}$ titreşim bandı 3286.11 cm^{-1} 'de çıkmıştır. Etken madde katılımı ile $1025\text{-}1060 \text{ cm}^{-1}$ aralığında piklerin şiddeti azalmış veya artmıştır. Yer yer etken madde farklılığı ile $1421\text{-}1715 \text{ cm}^{-1}$ aralığında piklerin şiddeti değişmiştir. Bu durumda kompozit malzeme oluşumunu desteklemiştir (Buluş vd., 2020).

3.2. Morfolojik Karakterizasyon (FEGSEM Analizi)



Şekil 3.12: Doku iskelelerinin FEGSEM görüntüleri

Doku iskelelerinin FEGSEM görüntüleri Şekil 3.12'de yer almaktadır. Doku iskelelerinin FEGSEM morfolojik görüntüleri incelendiğinde %10 PVA-

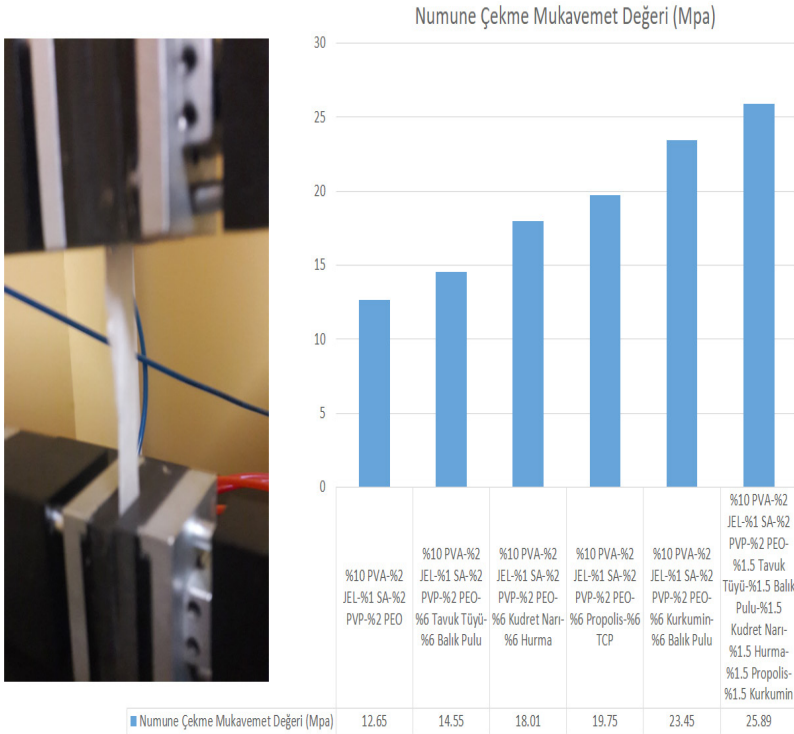
%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO numunesinin fiber çap ortalamaları 190-330 nm olurken, etken madde katılımı ile fiber çapları incelmıştır. Bu inceleme ile mekanik mukavemetin arttığı çekme test sonuçlarından da görülmektedir. Çalışmadaki en ince fiber çaplarına sahip %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin kompoziti ile 100-130 nm aralığında olup, mekanik özelliklerdeki sonuç ile örtüşmektedir. Saf polimer FEGSEM görüntüleri incelendiğinde fiberlerin yönlendiği görülmektedir. Tavuk tüyü-balık pulu eklenmesi ile fiberlerde inceleme olmakla birlikte fiber tabakasını kapatan aglomera yapılar söz konusu olmuştur. Polimer yapısına kudret narı ve hurma katılması ile elektriksel direnç arttığından fiberlerin gözenek oranı artmıştır ve lifler incelmıştır. Yer yer topaklanmalar da görülmektedir. Propolis ve TCP katılması ile fiberlerin çapları incelse de farklı yönlendirmelerde partikül aglomerasyonunda yer almıştır. Kurkumin ve balık pulu ilavesi ile fiberlerin yönlendirmesinin yanı sıra farklı yönlendirmelerde partikül aglomerasyonunda yer almaktadır. %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin kompozit numunesinde farklı yönlerde partiküller var olsa da daha ince lif yapılanmasına sahip bir morfoloji yer almaktadır (Azizi vd., 2018). Doku iskelelerinin aritmetik fiber çap değerleri Tablo 3.1’de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Doku iskelelerinin aritmetik fiber çap değerleri

Polimer / Katkı maddesi	Fiber çap değerleri (nm)
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO	190-330
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Tavuk Tüyü-%6 Balık Pulu	195-280
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kudret Narı-%6 Hurma	190-225
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Propolis-%6 TCP	175-210
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%6 Kurkumin-%6 Balık Pulu	155-185
%10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin	100-130

3.3. Mekanik Karakterizasyon (Çekme Testi)

ASTM D882-10 standartlarına göre 1*4 cm ebatında hazırlanan doku iskelelerine 500 N yük altında, 5 mm²/dk çekme hızı ile 10 mm çene arası mesafe uygulanarak çekme testi işlemi gerçekleştirilmiştir. Üçer kez çekme testi işlemi uygulanıp çekme mukavemetlerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO numunesi 12.65 MPa elde edilirken, katkı maddesi takviyesi ile mekanik mukavemet artmıştır. Katkı maddesi takviyesi ile polimer elektriksel özellikleri arttığından daha ince lif yapılanması elde edilmiştir. Lif incelmesi ve katkı maddesinin lif etrafını sarması ile mekanik mukavemet sağlamıştır. Bu da saf polimer numunesine göre daha dayanıklı bir ürün olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmadaki en mukavemetli malzeme %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin kompoziti ile 25.89 MPa olduğu yapılan çekme testi sonuçlarına göre belirlenmiştir. Tüm etken maddelerin sinerjik etkisi mekanik mukamet artışında etkili olmuştur (Buluş vd., 2020).. Doku iskelelerinin çekme mukavemet değerleri Şekil 3.13’de yer almaktadır.



Şekil 3.13 Doku iskelelerinin çekme mukavemet değerleri

4. Sonuçlar

Çalışmada doku iskelesi üretimi için polivinil alkol (PVA), sodium aljinat (SA), polivinilpirolidon (PVP), polietilen oksit (PEO) polimeri, Gıda da kullanılan jelatin (JEL), Kudret narı, tavuk tüyü, balık pulu, hurma çekirdeği, propolis, trikalsiyum fosfat (TCP) ve kurkumin kullanılarak yeni nesil yara örtücüler elektroğirme sistemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Çalışmadaki en mukavemetli malzeme %10 PVA-%2 JEL-%1 SA-%2 PVP-%2 PEO-%1.5 Tavuk Tüyü-%1.5 Balık Pulu-%1.5 Kudret Narı-%1.5 Hurma-%1.5 Propolis-%1.5 Kurkumin kompoziti ile 25.89 MPa olduğu yapılan çekme testi sonuçlarına göre belirlenmiştir. Etken maddelerin sinerjik etkilerinden yararlanarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca etken madde katılımı ile fiber çapları incelmıştır. Bu inceleme ile mekanik mukavemetin arttığı çekme test sonuçlarından da görülmektedir. FTIR yapısal analizi ile polimer ve etken madde fonksiyonel grupları belirlenmiş ve kompozit doku iskeleleri elde edildiği belirlenmiştir. Çalışma sonuçları dikkate alındığında, üretilen yara örtücü doku iskelelerinin ideal özelliklere sahip umut verici yara iyileştirici biyomalzemeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın devamında:

- Farklı polimer ve katkı maddelerinin kullanımı ile fonksiyonel özellikler kazandırılarak geniş kullanım olanağı sağlanabilir.
- In vivo ve in vitro testler yapılarak doku iskelelerinin özellikleri belirlenebilir ve test sonuçlarına bağlı olarak malzeme özellikleri iyileştirilebilir.
- Elektroğirme çalışma parametreleri optimize edilerek ideal gözenek boyutu, üstün mekanik özellikler ve biyoyumluluk kazandırılabilir.
- Sitotoksitesite testleri, antimikrobiyal duyarlılık testleri, temas açısı ölçümü gibi farklı prosedürler uygulanarak malzemelerin vücudun farklı bölgelerinde, ayrıca çeşitli sektörlerde kullanılma potansiyeli araştırılabilir.

Referanslar

Ahmadian, S., Ghorbani, M., & Mahmoodzadeh, F. (2020). Silver sulfadiazine-loaded electrospun ethyl cellulose/poly(lactic acid)/collagen nanofibrous mats with antibacterial properties for wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1555-1565.

Azizi, M., Azimzadeh, M., Afzali, M., Alafzadeh, M., & Mirhosseini, S. H. (2018). Characterization and optimization of using calendula officinalis extract in fabrication of polycaprolactone-gelatin electrospun nanofibers for wound dressing applications. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 6(2), 34-46.

Buluş, E., Buluş, G. S., Akkaş, M., & Çetin, T. (2021). Production and Morphological Characterization of Nanofiber Membrane with Natural Wound Healing. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 2(1), 1-5.

Buluş, E., Buluş, G. S., Akkaş, M., Cetin, T., Yaman, E., & Altındal, T. (2020). Production and Characterization of Natural Sourced Hydroxyapatite Added Polystyrene Tissue Scaffolds by Electrospinning. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 6(1), 12-18.

Buluş, E., Buluş, G. S., Akkaş, M., Cetin, T., Yaman, E., & Altındal, T. (2020). Nanotechnological Wound Healing Bandage Production from Polymer Solutions Containing Tea Tree Oil, Echinacea, Spider Web and Aloe Vera. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 6(1), 19-23.

Buluş, E., Buluş, G. S., & Akkaş, M. (2021). Investigation of the Effects of Working Parameters in Electrospinning Technology on Morphology of Polymeric Nanofiber Membranes Using Reference Polymers. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 2(1), 6-11

Buluş, E., Yucel, N., & Kamaci, O. (2021). Differences and Parametric Evaluation of Centrifugal Force Spinning from Electrospinning Method. *JOURNAL OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES*, 1(1), 16-27.

Hwang, M. R., Kim, J. O., Lee, J. H., Kim, Y. I., Kim, J. H., Chang, S. W., ... & Choi, H. G. (2010). Gentamicin-loaded wound dressing with polyvinyl alcohol/dextran hydrogel: gel characterization and in vivo healing evaluation. *Aaps Pharmscitech*, 11, 1092-1103.

Karthick, S. A., Ragavi, T. K., Naresh, K., & Sreekanth, P. R. (2022). A study on collagen-PVA and chitosan-PVA nanofibrous matrix for wound dressing application. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1347-1350.

Pancur, S., Bilensoy, E., & Çalış, S. (2022). Biyoparçalanır Doğal ve Sentetik Polimerlerin Yara Örtülerinde Kullanımı. *Fabad Journal of Pharmaceutical Sciences*, 47(3), 419-442.

Sheikh, F. A., Ju, H. W., Lee, J. M., Moon, B. M., Park, H. J., Lee, O. J., ... & Park, C. H. (2015). 3D electrospun silk fibroin nanofibers for fabrication

of artificial skin. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 11(3), 681-691.

Shimizu, R., & Nonomura, Y. (2018). Preparation of artificial skin that mimics human skin surface and mechanical properties. *Journal of Oleo Science*, 67(1), 47-54.

<https://iksadyayinevi.com/wp-content/uploads/2022/12/TIBBI-BILIMLERDE-YENILIKCI-YAKLASIMLAR.pdf>

BÖLÜM XII

ÇOK KATMANLI ALGILAYICI YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİNLEME

Prediction with Multilayer Perceptron Neural Networks

Mehmet Şirin ATEŞ¹ & Erol TERZİ² & Ercan SIR³

¹(Arş. Gör.), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Fakültesi İstatistik Bölümü,
Samsun, TÜRKİYE.

Email: mehmet.ates@omu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-9904-6380

²(Doç. Dr.), Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Fakültesi İstatistik Bölümü,
Samsun, TÜRKİYE.

Email: eroltr@omu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-2309-827X

³Türkiye Vakıflar Bankası, İstanbul, TÜRKİYE.

Email: ercan.sir@vakifbank.com.tr

ORCID: 0000-0002-4040-5382

1. Giriş

Bankacılık sektörü finansal sistem içerisinde ülke ekonomisine büyük katkı sağlamakla birlikte gerek bireysel gerekse de ticari segment bazında müşterilere finansal destek sağlamak hususunda birer hizmet noktası olarak da faaliyet göstermektedir. Söz konusu faaliyetler çeşitli ve kapsamlı olmakla beraber sunulan hizmetler dijital kanallar üzerinden ve banka şubelerinden sağlanmaktadır. Dijital kanallar aracılığı ile verilen hizmetlerin ölçümleri, işlem ve müşteri bazında rahatlıkla kayıt altına alınabilmekle beraber sistemsel bir aksaklık olmaması durumunda tüm müşterilerine standart hizmet sağlanabilmektedir. Ancak söz konusu hizmetler için fiziki olarak hizmet sağlanan şube lokallerinde her zaman aynı standart sağlanamayabilir. Söz konusu

standardı yakalayabilmek adına şubelere hizmet almak için gelen müşterilerin oluşturduğu işlem kayıtlarının bir yansıması olan sıramatik raporları bahsi geçen standart hizmeti sağlayabilmek için kıymetli bir veri oluşturmaktadır. Sektör genelinde benzer bir yapı ile yönetilen sıramatik sistemleri müşterilerin işlem ve segment bazında önceliklendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda şube/bölge özelinde nasıl bir müşteri kitlesinin bulunduğu, bu müşteri kitlesine ne kalitede bir hizmet sağlandığı, eksik olan noktalarda nasıl bir iyileştirme yapılması gerektiği veya tam tersi atıl olan iş gücünün farklı bir lokasyona yönlendirilmesi gerektiği gibi kararlar alınabilmektedir. Dolayısıyla mevcut verilerden yola çıkarak gelecek belirli dönemlerde veya bölgelerde nasıl bir müşteri yoğunluğu olacağını öngörebilmek bankalar açısından karar alma aşamasında destek sağlayabilecek önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Mühendislik, sağlık, eğitim konularında olduğu gibi bankacılık sektöründe de öngörü, oldukça önemli bir yere sahiptir. Klasik öngörü yöntemleri olarak adlandırılan yöntemler birçok zaman serisi öngörü probleminde sıklıkla kullanılmasına rağmen bu yöntemlerin belirli kısıtlamalara sahip olması bu yöntemlerin kullanılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle son yıllarda araştırmacılar yapay sinir ağı yöntemleri gibi varsayımlara sahip olmayan yöntemlere yönelmiştir. Bu çalışmada da öngörü için yapay sinir ağı modellerinden çok katmanlı algılayıcı yapay sinir ağı (ÇKA-YSA) kullanılmıştır.

Bu çalışmada Vakıfbank Genel Müdürlüğünden 27.04.2020-30.11.2021 tarihleri arasında sıramatiklerden temin edilen günlük toplam bilet sayısı zaman serisi ÇKA-YSA, Basit Üstel Düzleştirme, Holt, Damped Holt ve Naive yöntemleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları hata kareler ortalaması karekök (HKOK) kriterince karşılaştırılmıştır ve alınan sonuçlara göre zaman serisi için en uygun yöntemin ÇKA-YSA yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

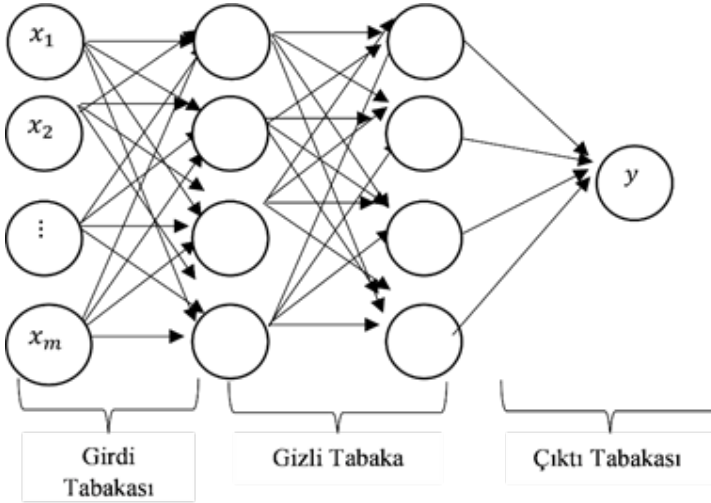
2. Çalışmada Kullanılan Yöntemler

2.1. Çok Katmanlı Algılayıcı Yapay Sinir Ağları

Literatürde yaygın olarak kullanılan yapay sinir ağı, çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağlarıdır. Çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağlarında girdi, çıktı ve gizli katman olmak üzere üç katman bulunur. Veriler ağda çıktı katmanına ulaşana kadar katmandan katmana geçer ve katmanlar arasında geri besleme olmaz. Bu nedenle bu yapay sinir ağları ileri beslemeli sinir ağları olarak bilinmektedir. Aynı katmandaki nöronlar arasında bağlantı

yoktur. Bağlantılar yalnızca ileriye yöneliktir. Her bağlantının da farklı ağırlıkları olabilir. Ağ yapısındaki ağırlıkların elde edilmesi bir optimizasyon problemi olarak bilinmekle birlikte bu işleme ağın eğitimi denilmektedir. Rumelhart ve ark. (1986) ağırlıkları güncellemek için geri yayılım öğrenme algoritmasını kullanmıştır. Gizli katman sayısının ve tüm katmanlardaki birim sayısının belirlenmesi YSA mimarisinin belirlenmesi anlamına gelir. Gizli katmanın ileri beslemeli sinir ağlarının en önemli yapısı olduğu söylenebilir. Bu nedenle, gizli katman birimlerinin sayısı algoritmanın performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Ancak gizli katman birimlerinin sayısını belirlemek önemli bir problemidir.

Şekil 1’de m girdili iki gizli tabaka ve tek nöronlu çıktı tabakasına sahip bir ÇKA-YSA’nın mimari grafiği verilmiştir.



Şekil 1. Çok tabakalı algılayıcı örneği

Şekil 1’de ilk katman girdi katmanı, son katman çıktı katmanı olarak adlandırılırken bu iki katman arasındaki katmanlar da gizli katmanlar olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Holt Linear Trend Yöntemi

Trend içeren bir zaman serisinin analizinde kullanılan yöntemlerden biri Holt lineer trend yöntemidir (Holt, 2004). Holt lineer trend yöntemi ile h adım öngörü için tahmin Eşitlik (1-3) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\hat{x}_{t+h} = \hat{L}_t + h\hat{b}_t \quad (1)$$

$$\hat{L}_t = \lambda_1 x_t + (1 - \lambda_1)\hat{x}_t \quad (2)$$

$$\hat{b}_t = \lambda_2(\hat{L}_t - \hat{L}_{t-1}) + (1 - \lambda_2)\hat{b}_{t-1} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde, \hat{L}_t ve \hat{b}_t serinin seviyesi ve trendinin eğimi için güncelleme denklemlerini ifade etmektedir.

2.3. Damped Holt Yöntemi

Damped Holt yöntemi Holt'un doğrusal trend üstel düzleştirme yöntemine benzetmekle birlikte, Holt Linear Trend yönteminden ek olarak bir dampen parametresi kullanır (Taylor, 2003). Damped Holt yöntemi ile h adım öngörü için tahmin Eşitlik (4-6) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\hat{x}_{t+h} = \hat{L}_t + (\phi + \phi^2 + \phi^h)\hat{b}_t \quad (4)$$

$$\hat{L}_t = \lambda_1 x_t + (1 - \lambda_1)(\hat{L}_{t-1} + \phi\hat{b}_{t-1}) \quad (5)$$

$$\hat{b}_t = \lambda_2(\hat{L}_t - \hat{L}_{t-1}) + (1 - \lambda_2)\phi\hat{b}_{t-1} \quad (6)$$

Bu eşitliklerde “ ϕ ” dampen parametresi olmakla birlikte bu parametre 0 ile 1 arasında değer almaktadır.

2.4. Naive Yöntem

Naive yöntem bir sonraki beklenen tahminin son gözlemlenen değere eşit olduğunu varsayan öngörü yöntemidir. Naive yöntem ile h adım öngörü Eşitlik (7) ile elde edilir.

$$\hat{x}_{t+h} = x_t \quad (7)$$

2.5. Basit Üstel Düzleştirme Yöntemi

Basit üstel düzleştirme yöntemi en basit öngörü yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir. Basit üstel düzleştirme, genellikle zaman serilerinin seviyesinin

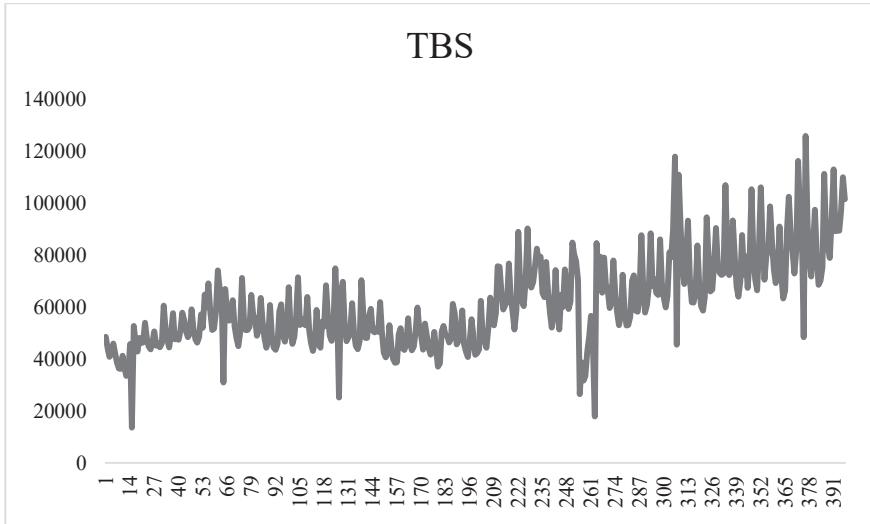
sabit bir seviyede dalgalanması veya zaman içinde yavaşça değişmesi gerektiği önermesine dayanır (Lewis, 1982; Ostertagova & Ostertag, 2012). Basit üstel düzleştirme yöntemi tek değişkenli zaman serisi verileri için kullanılan bir tahmin yöntemi olmakla birlikte bu yöntemde eski gözlemlerin ağırlıkları gitgide azalmakta ve tahminler geçmiş gözlemlerin ağırlıklı ortalamaları şeklinde hesaplanmaktadır. Basit üstel düzleştirme yöntemi ile öngörü Eşitlik (8) ile elde edilir.

$$\hat{x}_{t+1} = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{x}_t \quad (8)$$

Bu eşitlikte “ α ” düzleştirme katsayısı parametresi olmakla birlikte bu parametre 0 ile 1 arasında değer almaktadır.

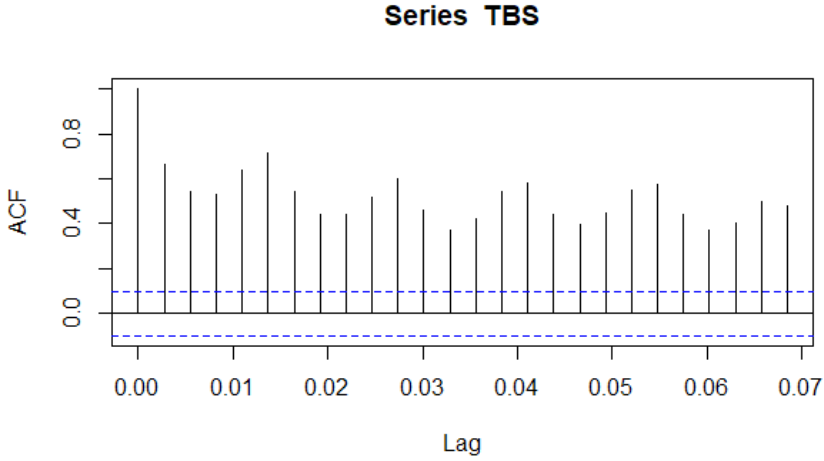
3. Uygulama

Uygulama çalışması için Vakıfbank Genel Müdürlüğünden 27.04.2020-30.11.2021 tarihleri arasında sıramatiklerden temin edilen günlük toplam bilet sayısına (TBS) ilişkin grafik Şekil 2’de verilmiştir.

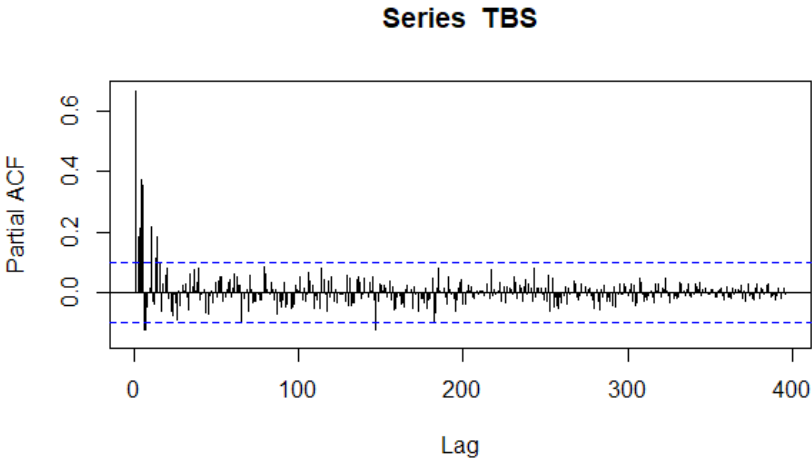


Şekil 2. TBS zaman serisine ait grafik

TBS zaman serisine ait otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon grafikleri ise Şekil 3 ve 4’de verilmiştir.



Şekil 3. TBS zaman serisinin grafiği için otokorelasyon grafiği



Şekil 4. TBS zaman serisinin grafiği için kısmi otokorelasyon grafiği

Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde TBS zaman serisinin trende sahip olduğu görülmektedir. TBS zaman serisinin analizi Basit Üstel Düzleştirme, Holt, Damped Holt, Naive ve ÇKA-YSA yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Analiz aşamasında TBS zaman serisinin son 31 gözlemi test kümesi olarak alınmıştır. Yöntemlerin karşılaştırılması Eşitlik (9) ile yapılmıştır.

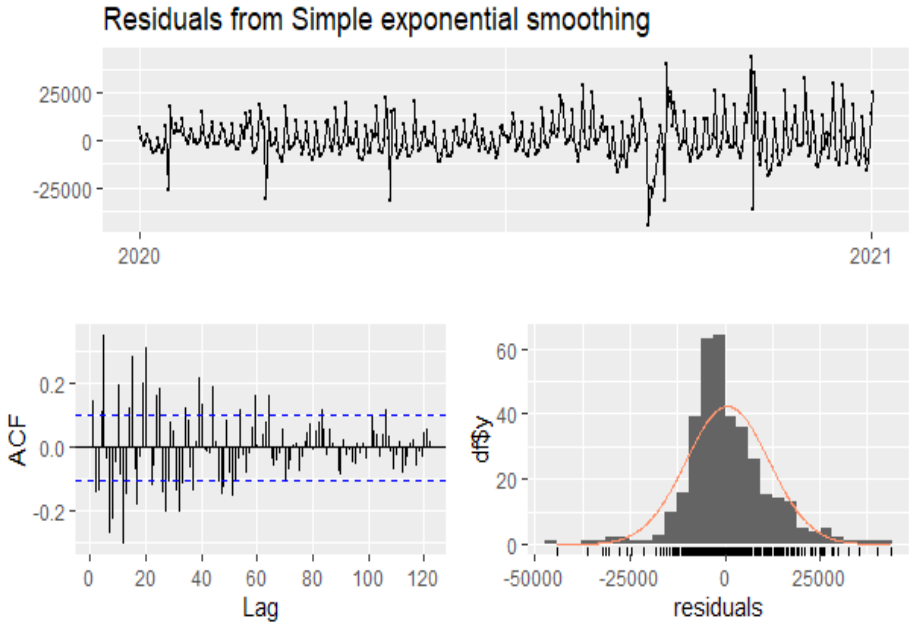
$$HKOK = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \hat{X}_t)^2}{n}} \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da, n, x_t ve \hat{x}_t sırasıyla; öğrenme örneği sayısı, gözlenen değer ve öngörü değerini göstermektedir. Yöntemlere ait HKOK değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yöntemlerin TBS zaman serisi için HKOK değerleri

Yöntem	HKOK
Basit Üstel Düzleştirme	15945.15
Holt	16355.29
Damped Holt	15995.47
Naive	22470.44
ÇKA-YSA	15852.01

Yöntemlere ait artıkların plot grafikleri, histogram grafikleri otokorelasyon katsayıları ve Ljung-Box test istatistiği sonuçları aşağıda verilmiştir.

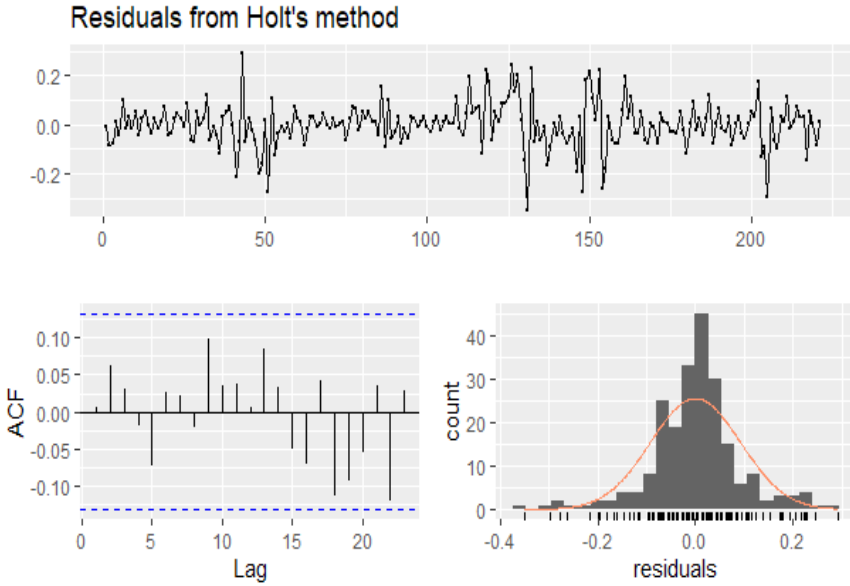


Şekil 5. TBS zaman serisinin Basit Üstel Düzleştirme yöntemi artık analizi grafikleri

Tablo 2. TBS zaman serisinin Basit Üstel Düzleştirme yöntemi ile elde edilen Ljung-Box sonuçları

Ljung-Box test
$Q^* = 534.76$
$df = 71$
$p\text{-value} < 2.2e-16$
Model df: 2.
Total lags used: 73

Tablo 2. Ljung-Box test sonucuna göre $p < 2.2e-16$ olduğu için Basit Üstel Düzleştirme yöntemi, TBS zaman serisi analizi için uygun olmadığı söylenebilir.

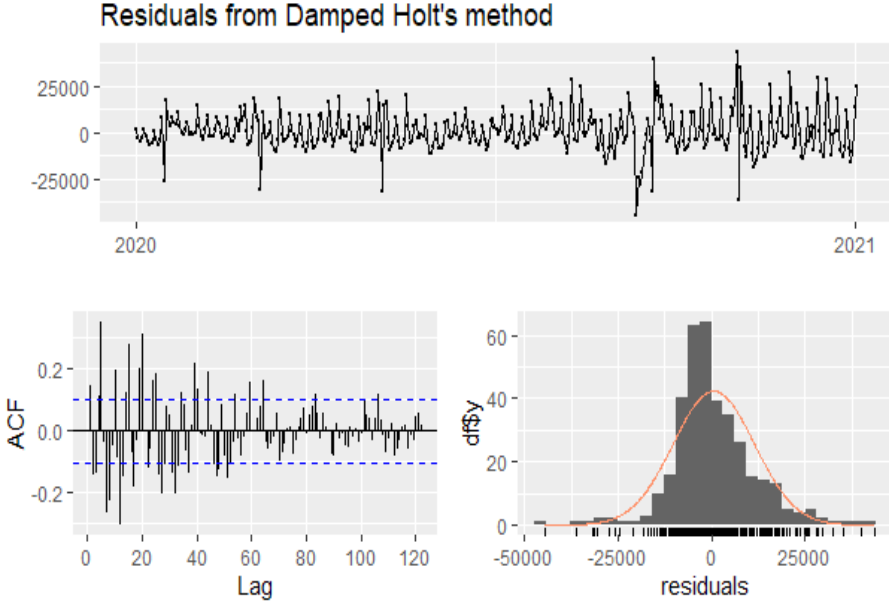


Şekil 6. TBS zaman serisinin Holt yöntemi artık analizi grafikleri

Tablo 3. TBS zaman serisinin Holt yöntemi ile elde edilen Ljung-Box sonuçları

Ljung-Box test
$Q^* = 536.26$
$df = 69$
$p\text{-value} < 2.2e-16$
Model df: 4
Total lags used: 73

Tablo 3. Ljung-Box test sonucuna göre $p < 2.2e-16$ olduğu için Holt yönteminin, TBS zaman serisi analizi için uygun olmadığı söylenebilir.

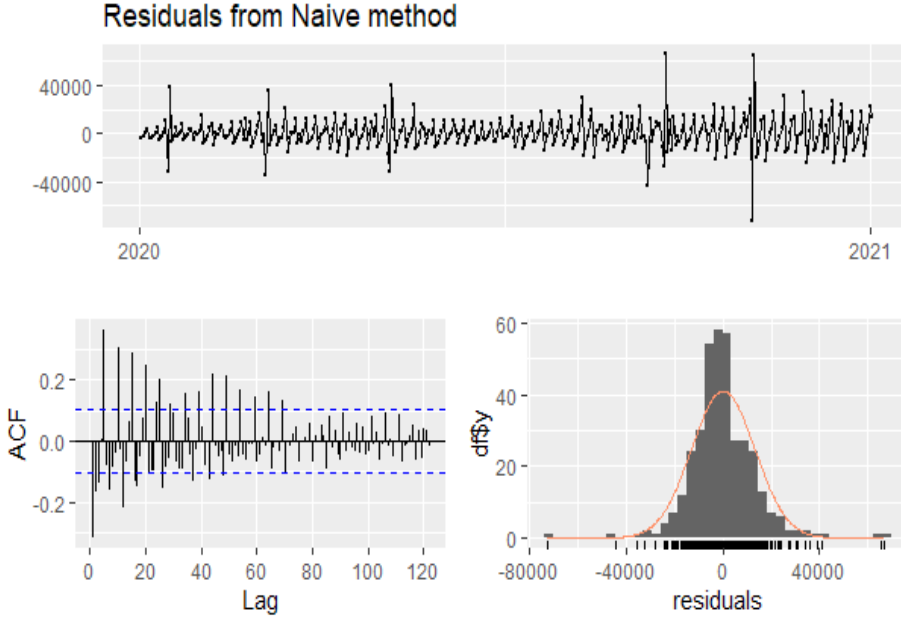


Şekil 7. TBS zaman serisinin Damped Holt yöntemi artık analizi grafikleri

Tablo 4. TBS zaman serisinin Damped Holt yöntemi ile elde edilen Ljung-Box sonuçları

Ljung-Box test
$Q^* = 534.43$
$df = 68$
$p\text{-value} < 2.2e-16$
Model df: 5
Total lags used: 73

Tablo 4. Ljung-Box test sonucuna göre $p < 2.2e-16$ olduğu için Damped Holt yönteminin, TBS zaman serisi analizi için uygun olmadığı söylenebilir.



Şekil 8. TBS zaman serisinin Naive yöntemi artık analizi grafikleri

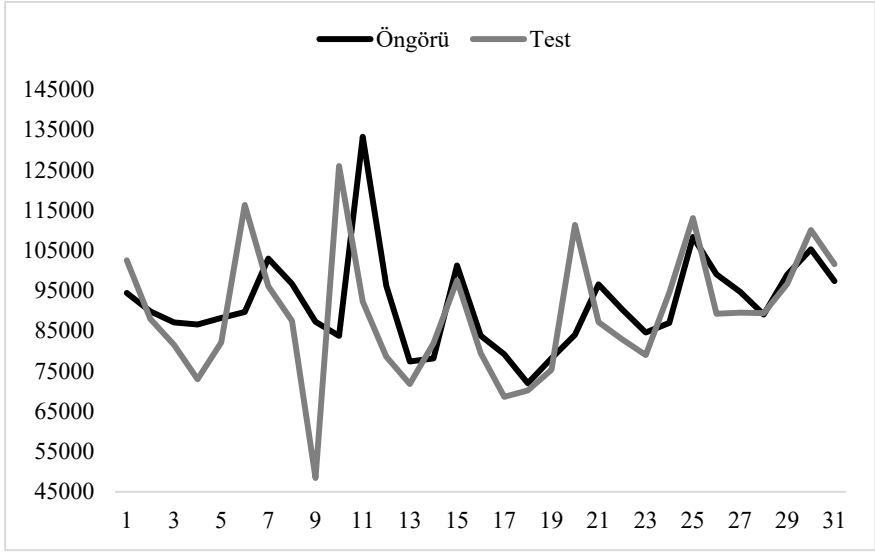
Tablo 5. TBS zaman serisinin Naive yöntemi ile elde edilen Ljung-Box sonuçları

Ljung-Box test
$Q^* = 468.03$
$df = 73$
$p\text{-value} < 2.2e-16$
Model df: 0
Total lags used: 73

Tablo 5. Ljung-Box test sonucuna göre $p < 2.2e-16$ olduğu için Naive yönteminin, TBS zaman serisi analizi için uygun olmadığı söylenebilir.

Bu analizler sonucunda TBS zaman serisinin analizinde kullanılan Basit Üstel Düzleştirme, Holt, Damped Holt, Naive yöntemlerinin analiz için uygun yöntemler olmadığı söylenebilir. Bu nedenle TBS zaman serisinin analizi için bu yöntemlerinin sahip olduğu normallik veya doğrusallık gibi bazı varsayımlara sahip olmayan ÇKA-YSA yöntemi analiz için tercih edilebilir.

ÇKA-YSA yönteminden elde edilen öngörüler ile TBS zaman serisi test kümesine ait gözlemler Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. TBS zaman serisinin test kümesi gözlemleri ile ÇKA-YSA yöntemi ile elde edilen öngörülerin grafiği

Şekil 9. incelendiğinde ÇKA-YSA ile elde edilen öngörülerin, TBS zaman serisi test kümesi gözlem değerleri ile uyum içerisinde hareket ettiği söylenebilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Vakıfbank Genel Müdürlüğünden temin edilen sıramatiklerinden alınan günlük toplam bilet sayısına ait zaman serisi başta ÇKA-YSA olmak üzere analiz edilmiş ve elde edilen analiz sonuçları bazı klasik zaman serisi analizi yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda ilgili zaman serisinin analizi için en iyi yöntemin en düşük hata kriteri değerine sahip yöntem olan ÇKA-YSA olduğu sonucuna varılmıştır.

İleri çalışmalarda, ilgili zaman serisi yüksek dereceli yapay sinir ağıları veya derin yapay sinir ağı modelleri ile analiz edilebilir.

5. Kaynakça

Holt, C. C. (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International journal of forecasting*, 20(1), 5-10.

Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworth-Heinemann.

Ostertagova, E., & Ostertag, O. (2012). Forecasting using simple exponential smoothing method. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 12(3), 62.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088), 533-536.

Taylor, J. W. (2003). Exponential smoothing with a damped multiplicative trend. *International journal of Forecasting*, 19(4), 715-725.

BÖLÜM XIII

ALABALIK (ONCORHYNCHUS MYKISS, WALBAUM,1792) FİLETOLARININ KİMYASAL KALİTESİ ÜZERİNE ALOE VERA JEL KAPLAMANIN ETKİNLİĞİ

*Efficiency of Aloe Vera Gel Coating on The Chemical Quality of
Trout (Oncorhynchus mykiss, Walbaum,1792) Fillets*

Mehmet Zülfü ÇOBAN

(Doç.Dr), Fırat Üniv. Keban MYO. Gıda Teknolojisi,

e-mail: mzcoban@firat.edu.tr

ORCID: 0000-0002-5645-5456

1. Giriş

Balık eti, enzimatik ve mikrobiyal faaliyetler nedeniyle genellikle diğer gıda maddelerinin çoğundan daha çabuk bozulur. Son yıllarda, tüketici sağlığı risklerinden kaçınmak amacıyla balık etinin raf ömrünü uzatmak için güvenilir yöntemler geliştirilmiştir (Al-Dagal ve Bazaraa 1999). Taze balıkların bozulmasını önlemek için yaygın olarak buzda saklama gibi geleneksel yöntemler kullanılsa da bunun yanı sıra çeşitli kimyasal ve doğal antimikrobiyal ajanlar ve polimerler, antioksidanlar ve biyoteknolojik ürünler de geliştirilerek su ürünleri endüstrisinde etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, doğal bitki özleri, özellikle bitki esansiyel yağları ve nisin gibi bakteriyosinler, balık ve balık ürünlerinin korunmasında kullanılmaktadır (Lu vd. 2010). Yeni gelişmeler arasında su ürünlerinin raf ömrünü uzatmak için yenilebilir kaplamaların kullanılmasıdır (Nowzari vd., 2013). Bu yöntemde ince bir yenilebilir, biyoyumlu kaplama, balık etini fiziksel ve kimyasal hasarlara karşı korur, mikrobiyal büyümeyi geciktirir ve güvenliğini artırır. Ayrıca, yöntemin ambalaj atıklarını azaltma ve yeni gıda ürünleri üretme gibi ek avantajları bulunmaktadır (Valverde vd., 2005).

Çevresel kaygılar ve kimyasal koruyucuların insan sağlığı üzerindeki etkilerine ilişkin artan tüketici kaygıları, son araştırmaları doğal antimikrobiyal ve antioksidan özelliklere sahip yenilebilir kaplamalara odaklanmaya teşvik etmiştir. Kitin, kitosan ve türevleri, antibakteriyel ve antioksidan aktivitelerinden dolayı deniz ürünlerinin işlenmesinde yıllardır kullanılmaktadır (Kamil vd., 2002). İçeceklerde ve dondurmada fonksiyonel bir bileşen olarak kullanılan aloe vera, son zamanlarda gıda endüstrisinde sebze ve meyve kalitesini korumak için yenilebilir bir kaplama malzemesi olarak da kullanılmıştır (Mohebbi vd., 2012; Chauhan vd., 2013; Song vd., 2013; İbrahimi ve Rastegar, 2020).

Aloe vera, Hindistan Yarımadası'nda çok çeşitli uygulamalarla yaygın olarak yetiştirilen bir tıbbi bitkidir. %99,3 su ve geri kalan %0,7 aktif bileşenlerden olmaktadır. Aloe vera'da alkaloidler, terpenoidler, flavonoidler, fenolik asitler, vitaminler, enzimler, antrakinonlar, saponinler, salisilik asit vb. gibi yaklaşık 200 aktif bileşik bulunur. Aynı zamanda antioksidan, antidiyabetik, antiinflamatuvar, güneş yanığı giderici, antimikrobiyal ve anti-kanser özellikleri sergilemektedir (Mahendiran vd., 2017; Seifunnisha ve Shanthi, 2021).

Şimdiye kadar, aloe vera jeli (AVJ)'nin balık ürünlerinde kullanılmasına ilişkin araştırmalar çok yaygın değildir. Bu bağlamda, bu çalışmada, farklı oranlarda aloe vera jeli ile yenilebilir kaplamalar (%0, %5 ve %10) hazırlanarak gökkuşaağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum,1792) filetoları kaplanmıştır. Bu kaplamaların gökkuşaağı alabalığı filetoalarının kimyasal kalitesi üzerine etkinliği değerlendirilmiştir.

2. Materyal Ve Metot

2.1. Materyal

Araştırmanın materyalini 250-300 gr ağırlığındaki 25 adet gökkuşaağı alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum,1792) oluşturdu. Balıklar, Elazığ ilinde bulunan bir gökkuşaağı alabalığı yetiştiricilik tesisinden taze olarak temin edildi. Aseptik ve soğuk koşullarda laboratuvara getirilen taze balıkların başları kesilip, iç organları çıkarıldıktan sonra yıkanarak kan ve kir uzaklaştırıldı. Daha sonra kılçık ve kemikleri de alınan bir balıktan iki yarım fileto elde edildi.

Araştırmanın diğer materyali olan aloe vera profesyonel bahçe ürünleri satan ticari bir firmadan (urbangarden) temin edildi. ZnO nanopartikülleri (544906<100nm partikül büyüklüğünde) Sigma-Aldrich'den satın alındı.

2.2. Metot

Aloe vera jeli (AVJ) tozunun hazırlanması

Aloe vera, profesyonel bahçe ürünleri satan ticari bir firmadan (urbangarden) taze olarak temin edildi. Çalışmada toplamda 300 gr aloe vera jeli kullanıldı. Satın alınan aloe vera yaprakları hasat edildikten sonra, musluk suyu ile yıkandı ve 5 dakika boyunca $100 \mu\text{L}^{-1}$ sodyum hipoklorit içine daldırıldı. Jelatinli parankim, dış epidermisi çıkaran paslanmaz çelik bir bıçak vasıtasıyla yapraklardan ayrıldıktan sonra, jel kısım bir ultra-Turrax T25 kullanılarak 5 dakika süreyle 24.500 rpm'de homojenize edildi (Passafiume vd., 2020). Daha sonra lifli kısmı ayırmak için tülbent ile süzüldü ve elde edilen jel 12 saat $45 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de bir fırında kurutuldu. Kurutulmuş saflaştırılmış aloe vera jeli (AVJ) tozu, sonraki deneye kadar kuru bir yerde tutuldu. AVJ bazlı kaplama çözeltileri 2 farklı konsantrasyonda hazırlandı. İlk grup için; 5 g kurutulmuş AVJ tozu 100 ml damıtılmış suya ilave edilerek tamamen çözünene kadar oda sıcaklığında manyetik bir karıştırıcı ile karıştırıldı. Bu karışıma bir plastikleştirici olarak (1 ml/ 100ml) gliserol ilave edildi tekrar oda sıcaklığında 1 saat karıştırıldı. 2 grup kaplama çözeltisi için 10 gr AVJ tozu kullanıldı ve diğer prosedürler aynı şekilde uygulandı. Böylece kaplama solusyonları kullanılmaya hazır hale getirildi.

Filetoların AVJ ile kaplanması ve depolanması

Çalışmada 3 farklı deneysel grup oluşturuldu (Tablo 1). Kontrol grubuna kaplama işlemi uygulanmadı. AVJ ile kaplanacak filetolar 10 sn süreyle farklı oranlarda hazırlanan kaplama solusyonlarına daldırıldı. Daha sonra, fileto üzerindeki kaplamanın kurutulması işlemi için filetolar 10°C 'ye ayarlı soğuk hava üfleme dolapta 1 saat bekletildi. Kurutulan örnekler polistren kutularda paketlenildi ve 4°C 'de muhafazaya alındı. Muhafazanın 0.,3.,6.,9. 12. günlerinde kimyasal kalite bakımından analiz edildi.

Tablo 1. Deneysel dizayn

K	Filetolara kaplama işlemi uygulanmadı, polistren kutularda paketlenildi
AVJ1	Filetolar %5 AVJ tozu ile hazırlanan kaplama solusyonu ile kaplandı sonra polistren kutularda paketlenildi.
AVJ2	Filetolar %10 AVJ tozu ile hazırlanan kaplama solusyonu ile kaplandı sonra polistren kutularda paketlenildi.

2.3. Kimyasal Analizler

Numunelerin besin bileşimleri (nem, ham protein, yağ ve kül içerikleri) AOAC (2005) prosedürlerine göre yapıldı.

pH Tayini

Numunelerin pH değerleri Song ve arkadaşları (2011) tarafından açıklanan yöntemle göre belirlendi.

Toplam uçucu bazik azot (TVB-N) tayini

Toplam uçucu bazik nitrojen (TVB-N) değeri, mikrodifüzyon yöntemiyle (Goulas ve Kontominas, 2005).

Tiyobarbitürik asit sayısı (TBA) tayini

Tiyobarbitürik asit (TBA) Kirk ve Sawyer (1991)'in yöntemine göre belirlendi. TBA içeriği mg malondialdehit (MDA)/kg balık kası olarak ifade edildi.

2.4. İstatistiksel Analiz

Verilerin istatistiksel analizi için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanıldı (SPSS®22 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Ayrıca Duncan'ın çoklu karşılaştırma testi % 5 anlamlı düzeyde gerçekleştirildi. Veriler ortalama \pm standart sapma (SD) olarak verildi.

3. Bulgular Ve Tartışma

Araştırmada, farklı oranlarda AVJ ile hazırlanan yenilebilir kaplamaların gökkuşağı alabalığı filetoalarının soğuk muhafaza sırasındaki kalite değişimlerine (Besin bileşimi, TVB-N,TBA) etkisi incelenmiştir.

3.1. Besin bileşimi

Gökkuşağı alabalığı ve AVJ kaplama uygulanmış filetoaların besin bileşimi analizlerine ait bulgular Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Filetoların besin bileşiminin ortalama değerleri (%)

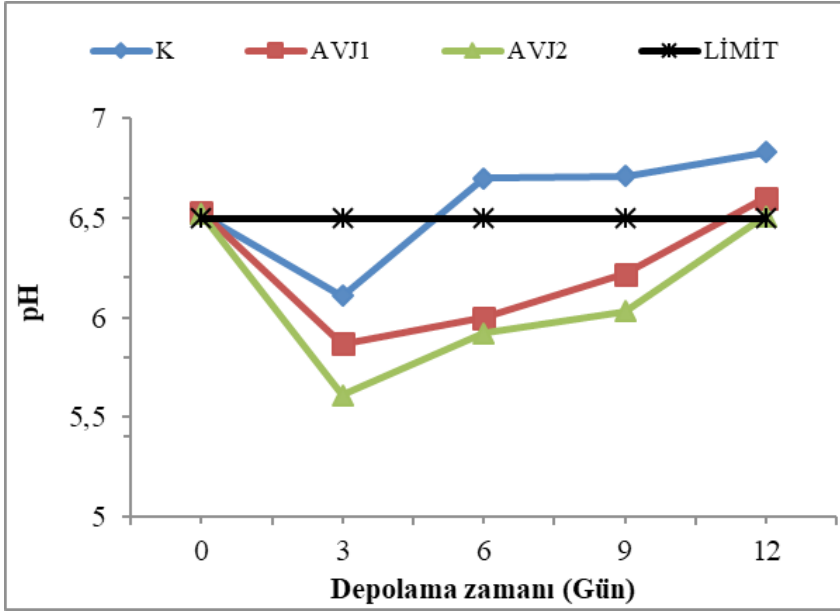
	Nem	Ham Kül	Ham Yağ	Ham Protein
K	70,88±0,01	1,05±0,04 ^c	7,18±0,08	20,09±0,05
AVJ1	70,64±0,22	1,31±0,01 ^b	7,02±0,06	19,96±0,04
AVJ2	71,01±0,01	1,47±0,01 ^a	7,11±0,11	20,11±0,12

K: Kaplama uygulanmadı **AVJ1:** %5 AVJ kaplamalı filetolar **AVJ2:** %10 AVJ kaplamalı filetolar

a,b: Aynı sütundaki değişik harfleri taşıyan ortalamalar arasındaki farklılıklar istatistiksel farklılıkları göstermektedir ($p<0,05$)

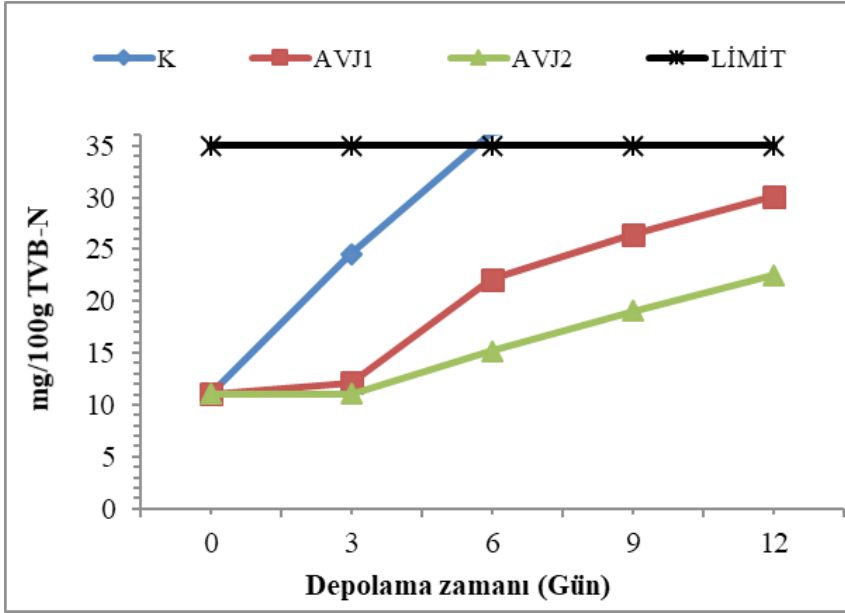
Yapılan analizlere göre kaplamasız filetonun nem oranı %70,88, AVJ1 grubunun %70,64 ve AVJ2 grubunu %71,01 olarak tespit edilmiştir. Bütün grupların % nem, %ham yağ ve %ham protein miktarları arasında da istatistiki olarak önemli bir fark ($p>0,05$) bulunmamıştır. Rostami ve arkadaşlarına (2010) göre peynir altı suyu protein filmi ile kaplanmış ve kaplanmamış Kilka arasında protein içeriğinde önemli bir fark gözlenmemiştir. Gruplar arasında sadece % ham kül oranında önemli fark ($p<0,05$) belirlenmiştir. Bu farklılık uygulanan kaplama materyaline bağlanabilir. Bulgularımızı, Rodriguez-Turienzo ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışmanın sonuçları destekler niteliktedir. Araştırmacılar, kaplama uygulanmamış somonun, kül değerlerinin daha düşük olduğunu bildirmiştir.

Çalışmada kullanılan gökkuşağı alabalığı filetolarının başlangıç pH'ı 6,52 olarak belirlendi (Şekil 1). Bu değer Zargar vd., (2014), Saez vd., (2020) tarafından bildirilen değerlerle uyumluydu . (2009) ancak Oğuzhan Yıldız ve Yangılar (2016), Emir Çoban ve Ergür (2021) tarafından bildirilenden biraz daha yüksek bulunmuştur. Taze balık etinde gözlenen pH farklılıkları genel olarak karbonik asidin ayrışmasından kaynaklanır ve bu da depolama süresi ilerledikçe pH'ın yükselmesine neden olur. Taze balık filetosunun pH'ı hemen hemen nötrdür ancak post-mortem dönemde nitrojenli bileşiklerin ayrışması, depolama sırasında ürünün kalitesini etkileyen pH'ın yükselmesine neden olur; özellikle koku, renk, doku gibi duyuşsal özellikler olumsuz etkilenir. EFSA'ya göre (2009), taze balıkta pH için kabul edilebilirlik sınırı 6,5'tir; bu değer, kontrol filetoları (kaplanmamış) tarafından 3.günden sonra aşılrken, AVJ1 ve AVJ2 ile kaplanmış filetolarda bu değere sırasıyla 9. ve 12. günden sonra ulaşılmıştır. Bulgularımız Fadiloğlu ve Emir Çoban (2018), Öz, (2018) ve Cao vd., (2020) bildirdikleri sonuçlarla paraleldir.



Şekil 1. Depolama sırasında gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) filetolarının pH değişimleri **K:** Kaplama uygulanmadı **AVJ1:** %5 AVJ kaplamalı filetolar **AVJ2:** %10 AVJ kaplamalı filetolar

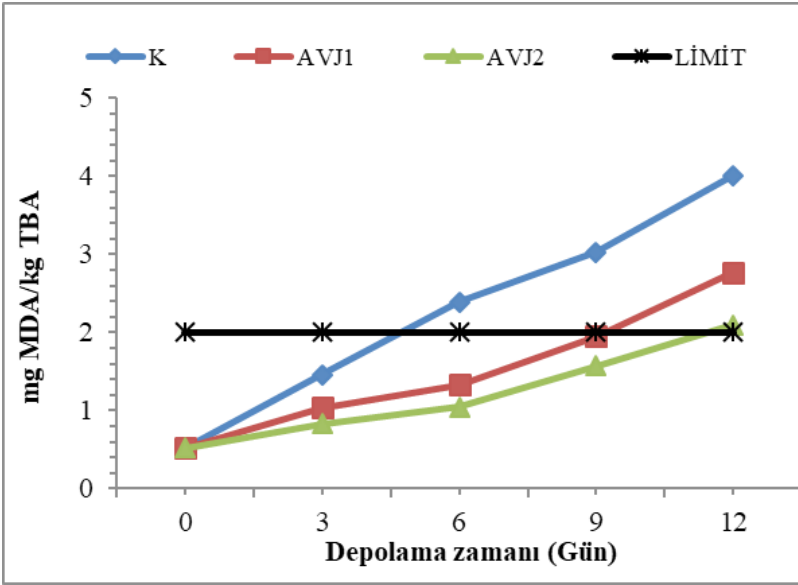
Toplam uçucu baz nitrojen miktarı, balık etinin kalitesini ortaya koyan bir göstergedir. Uçucu baz nitrojen üretimine yol açan reaksiyon, mikroorganizmadaki indirgeyici enzimleri kullanılarak trimetilamin oksitin (TMAO) trimetilamine (TMA) dönüştürülmesini sağlar (Lu 2009). Şekil 2’de 4 °C’de muhafaza edilen farklı aloe vera konsantrasyonları ile kaplanmış gökkuşuğu alabalığının TVB-N değişimleri görülmektedir. Bu çalışmada, gökkuşuğu alabalığının ilk TVB-N değeri 11,06 mg N/100 g olarak tespit edilmiştir ve bu, tavsiye edilen, yeni yakalanan taze balığın içerdiği TVB-N miktarı (5–20 mg/100g), sınır değerleri arasındadır (Huss, 1995). Muhafaza süresince TVB-N değerlerinin bütün gruplarda artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, TVB-N miktarlarındaki artışın AVJ kaplamalı gruplarda kontrol grubuna kıyasla daha az olduğu görülmektedir ($p < 0,05$). Bu etkiler bir şekilde aloe veranın mikrobiyal büyüme üzerindeki inhibitör etkisi ile ilgili olabilir. Bu sonuçlar, Asamenew ve diğerlerinin bulgularıyla uyumludur (2011) çok çeşitli Gram-negatif ve Gram-pozitif bakteri ve mantar suşlarında aloin ve 7-O-metilaloeresin A tarafından güçlü antimikrobiyal aktivite bildirmiştir.



Şekil 2. Depolama sırasında gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) filetolarının TVB-N değişimleri **K**: Kaplama uygulanmadı **AVJ1**: %5 AVJ kaplamalı filetolar **AVJ2**: %10 AVJ kaplamalı filetolar

TBA, aldehitler veya ketonlar gibi ikincil oksidasyon ürünlerini temsil ettiğinden, balık etinde lipid oksidasyonu ile uğraşırken ölçülmesi gereken başka bir ilgili parametredir (Rodriguez-Turienzo vd., 2011; Maan vd., 2021). Connell'e (1990) göre, 2 mg MDA/kg TBA değeri kabul edilebilirlik sınırı olarak kabul edilmektedir. Şekil 3'de gösterildiği gibi, tüm balık fileto örnekleri için TBARS değerleri sıfırıncı günde gerçekten düşüktü (0,52 mg MDA/kg) ve depolamanın 3. gününe kadar ihmal edilebilir düzeydeydi. Ancak 3. günden itibaren bu değerler tüm örneklerde önemli ölçüde arttı. Soğuk depolama sırasında TBA değerindeki bu artış, balıkların kısmi dehidrasyonuna ve doymamış yağ asitlerinin artan oksidasyonuna bağlanabilir (Volpe vd., 2015). Kaplanmamış balık fileto örnekleri 6. günde en yüksek TBA seviyelerine sahipti (2,39 mg MDA/kg), ardından sırasıyla 1,33 ve 1,05 mg MDA/kg ile AVJ1 ve AVJ2 kaplı örnekler geldi. Hem AVJ1 hem de AVJ2 içeren yenilebilir kaplamaların kullanılması, bu çalışmada gökkuşuğu alabalığı fileto örneklerinde lipid oksidasyon oranını azaltan etkili bir stratejydi. Yenilebilir kaplamalar oksijen geçirgenliğini azaltarak lipidlerin ilk oksidasyon hızını ve hidroperoksit

oluşumunu yavaşlatmaya yardımcı olur (Feng vd., 2017; Bharathi vd., 2019). Benzer şekilde, Soltanizadeh ve Mousavinejad (2015) çalışmalarında aloe vera jeli yenilebilir kaplamaların kullanılmasının, kaplanmamış karides filetolarına kıyasla TBA' taki artışı yavaşlattığını bildirmişlerdir. Yapılan araştırmalarda aloe vera jelinin, iyi bir film oluşturucu özelliği ve diğer maddelerle mükemmel uyumlu bildirilmektedir (Seifunnisha ve Shanthi, 2021; Firdöz vd., 2022). Soltanizadeh ve Mousavinejad (2015) aloe vera jeli yenilebilir kaplamaların kullanılmasının, kaplanmamış karides filetolarına kıyasla TBA'taki artışı yavaşlattığını gözlemlediler. Bezer şekilde, yapılan diğer çalışmalarda (Fadıloğlu ve Emir Çoban,2018; Abdulkareem vd., 2019; Cao vd., 2020) da yenilebilir kaplama uygulanan balık filetolarının TBA değerleri düşük bulunmuştur.



Şekil 3. Depolama sırasında gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*) filetolarının TBA değişimleri **K:** Kaplama uygulanmadı **AVJ1:** %5 AVJ kaplamalı filetolar **AVJ2:** %10 AVJ kaplamalı filetolar

4. Sonuç

Mevcut çalışma, aloe vera jeli ile kaplamanın, 4 °C'de 12 gün boyunca muhafaza edilen taze alabalık filetolarının sınırlı lipid oksidasyona sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, pH, TVB-N ve TBA değerini azaltmada kullanılan AVJ konsantrasyonunun önemli olduğunu ve en etkili grubun %10 AVJ ile hazırlanan kaplama solusyonuna ait olduğu belirlenmiştir. Ayrıca

bulgularımız, aloe vera jeli kaplamanın çeşitli gıdaların raf ömrünü uzatmak için kullanılabileceğini de göstermiştir. Hazırlanması ve hedef yüzeye uygulanması oldukça basit olan saf aloe vera jeli kaplamaları çeşitli bozulabilir gıda ürünlerinin güvenliğini ve kalitesini sağlamak için başarı ile uygulanabilir.

AÇIKLAMA

Bu çalışma “Gökkuşuğu alabalığı (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum 1792) filetolarının depolama kalitesi üzerine ZnO nanopartikülleri ile güçlendirilmiş aloe vera jeli bazlı biyokompozit filmlerin etkisi” isimli performans projesinden türetilmiştir ve SDMYO.22.01 Proje numarası ile FÜBAP tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Abdulkareem, M. H., Abdalsalam, A. H., & Bohan, A.J. (2019). Influence of chitosan on the antibacterial activity of composite coating (PEEK/HAP) fabricated by electrophoretic deposition. *Progress in Organic Coatings*, 130, 251–259.

AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (18th ed.). Washington, DC: Author.

Bharathi, D., Ranjithkumar, R., Chandarshekar, B., & Bhuvaneshwari, V. (2019). Preparation of chitosan coated zinc oxide nanocomposite for enhanced antibacterial and photocatalytic activity: As a bionanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 989–996.

Cao X., Islam, M.N., Chitrakar, B., Duan, Z., Xu, W., & Zhong, S. (2020) Effect of combined chlorogenic acid and chitosan coating on antioxidant, antimicrobial, and sensory properties of snakehead fish in cold storage. *Food Sci Nutr*. 8;8(2):973-981

Chauhan, O.P., Nanjappa, C., Ashok, N., Ravi, N., Roopa, N., & Raju, P.S.(2013) .Shellac and Aloe vera gel based surface coating for shelf life extension of tomatoes. *J Food Sci Technol*.

EFSA. (2009). Scientific opinion of the panel on biological hazards on a request from the European Commission on food safety considerations concerning the species-specific welfare aspects of the main systems of stunning and killing of farmed. Seabass and Seabream *EFSA Journal*, 1010 pp. 1-52.

Emir Çoban, Ö. & Ergür, N. (2021). Chia musilage coating: Applications with gojiberry extract for shelf life extension of *Oncorhynchus mykiss* and its antibacterial and oxidative effects. *J Food Process Preserv*. 45:e15114.

Fadıloğlu, E. E., & Emir Çoban, Ö. (2018). Effects of chitosan edible coatings enriched with sumac on the quality and the shelf life of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) fillets. *Journal of Food Safety*, 38, e12545

Feng, X., Ng, V.K., Mikš-Krajnik, M., & Yang, H. (2017). Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage. *Food and Bioprocess Technology*, 10(1), 89–102.

Firdous, N., Khan, M.R., Butt, B.S., Ali, M., Shabbir, M.A., Din, A., Hussain, A., Siddeeg, A., & Manzoor, M.S. (2022). Effect of Aloe vera gel-based edible coating on microbiological safety and quality of tomato, CyTA - *Journal of Food*, 20:1, 355-365,

Goulas, A.E., & Kontominas, M.G. (2005). Effect of salting and smoking-method on the keeping quality of chub mackerel (*Scomber japonicus*): Biochemical and sensory attributes. *Food Chem.*, 93: 511–520.

Huss, H. H. (1995). *Quality and Quality Changes in Fresh Fish*. FAO Fisheries Technical Paper- 348, Rome, S.172

İbrahimi, F., & Rastegar, S. 2020. Mango meyvesinin ortam sıcaklığında depolama sırasında spirulina platensis ve aloe vera özünü ile zenginleştirilmiş guar bazlı yenilebilir kaplamalarla korunması . *bilim Hortik.* 2020 , 265 , 109258.

Maan, A.S.A., Ahmed, Z.F.R., Khan, M.K.I., Riaz, A., & Nazir, A. (2021). Aloe vera gel, an excellent base material for edible films and coatings, *Trends in Food Science & Technology*, 116, 329-341.

Mahendiran, D., Subash, G., Arumai Selvan, D., Rehana, D., Senthil, R., Kumar, A., & Rahiman, K. (2017). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using plant extracts of Aloe vera and Hibiscus sabdariffa: phytochemical, antibacterial, antioxidant and anti-proliferative studies . *Bionanoscience*, 7 (3), 530-545.

Mohebbi, M., Ansarifard, E., Hasanpour, N., & Amiryousefi, M.R. (2012). Suitability of aloe vera and gum tragacanth as edible coatings for extending the shelf life of button mushroom. *Food Bioprocess Tech.* 5:3193–3202.

Öz, M. (2018). Effects of garlic (*Allium sativum*) supplemented fish diet on sensory, chemical and microbiological properties of rainbow trout during storage at –18°C. *LWT - Food Science and Technology*, 92, 155–160.

Rodriguez-Turienzo, L., Cobos, A., Moreno, V., Caride, A., Vieites, J.M., & Diaz, O. (2011). Whey Protein-Based Coatings on Frozen Atlantic Salmon

(*Salmo Salar*): Influence of the Plasticiser and the Moment of Coating on Quality Preservation. Food Chemistry. 128, 187–194.

Rostami, H., Motallebi, A., Khanipour, A.A., Soltani, A.A., & Khanedan, M. (2010). Effect of Whey Protein Coating on Physico-Chemical Properties of Guttled Kilka During Frozen Storage. Iranian Journal of Fisheries Sciences. 9, 412–421.

Sález, M.I., Suárez, M.D., & Martínez, T.F. (2020). Effects of alginate coating enriched with tannins on shelf life of cultured rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets, LWT,118,108767

Seifunnisha, O., & Shanthi, J. (2021). Influence of Aloe vera and PEG on the evaluation of photocatalytic degradation of MG dye under UV light and visible light irradiation of ZnO nanomaterials, Optik, 248, 168064.

Soltanizadeh, N., & Mousavinejad, MS. (2015). The effects of aloe vera (*Aloe barbadensis*) coating on the quality of shrimp during cold storage. J Food Sci Technol., 52(10):6647-54.

Song, H.Y., Jo, W.S., Song, N.B., Min, S.C., & Song, K.B. (2013). Quality change of apple slices coated with Aloe vera gel during storage. J Food Sci., 78:C817–C822.

Song, Y., Liu, L., Shen, H., You, J., & Luo, Y. (2011). Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*). Food Control 22: 608–615.

Zargar, M., Yeganeh, S., Razavi, S.H., & Ojagh, S.M. (2014). Effects of sodium caseinate edible coating on quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during storage in refrigerator temperature. FSCT .11 (44) :71-81

