



Artvin Çoruh Üniversitesi

Mühendislik ve
Fen Bilimleri Dergisi
Artvin Çoruh University
Journal of Engineering
and Sciences ACUJES

Artvin Çoruh University

Mühendislik ve
Fen Bilimleri Dergisi
Artvin Çoruh University
Journal of Engineering
and Sciences ACUJES

Cilt/Volume:2

Sayı/Issue:2

Yıl/Year:2024

Sahibi / Owner
Artvin Çoruh Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Adına
Prof. Dr. Özgür EMİNAĞAOĞLU

Baş Editör / Editor in Chief
Prof.Dr. Ayla BİLGİN

Yardımcı Editör / Associate Editor
Dr. Öğr.Üyesi Haluk KELEŞ

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor
Doç. Dr. Ömer KASAR

Alan Editörleri / Field Editors

Prof.Dr.Necmi ALTIN (Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye)

Prof. Dr. Yaşar KOBYA (Fizik, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

Prof. Dr. Selim LATİF SANİN (Çevre Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi, Türkiye)

Prof. Dr. Ayla BİLGİN (Çevre Mühendisliği, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

Prof. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP (Harita Mühendisliği, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr.Murat MAYDA (Makine Mühendisliği, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr.Nazish SHAHİD (Matematik, Forman Christian College, A Chartered University, Pakistan)

Prof Dr. Özgür EMİNAĞAOĞLU(Orman Mühendisliği, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

ProfDr. Temel GÖKTÜRK (Orman Mühendisliği, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

Doç. Dr. Ömer KASAR (Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye)

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof.Dr. Bülent YILMAZ (Matematik, Marmara Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr. Çetin KURNAZ (Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr.Güleda ENGİN (Çevre Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr.Hakan DİLİPAK (Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr.Halil AKINCI (Harita Mühendisliği Bölümü, Artvin Çoruh Üniversitesi, Türkiye)

Prof.Dr. Meriç ALBAY (Su Ürünleri Temel Bilimleri Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Türkiye)

Yabancı Dil Editörü / Language Editor

Dr. Öğr. Üyesi Serkan BİÇİCİ

Mizanpaj/ Layout

Dr. Öğr.Üyesi. Ali KAYA

Dr. Öğr.Üyesi Haluk KELEŞ

Arş. Gör. Bekir BERKCAN

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ RESEARCH ARTICLES

- Yumurta ve Dairesel Enkesit Geometrisine Sahip Atıksu Boru Modeli İçerisindeki Akışın Hidrodinamik Açından Karşılaştırmalı Sayısal Analizi
Comparative Hydrodynamic Numerical Analysis of Flow in Wastewater Pipe Model with Egg and Circular Cross-Section Geometry
Esin Acar80-89
- Uludağ Göknaarı Odununda Farklı Vernik Türlerinin Uygulanması ve Renk Parametrelerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Araştırma
A Study on the Application of Different Varnish Types on Uludağ Fir Wood and Comparison of Color Parameters
Hüseyin Peker, Ümit Ayata90- 99
- Design and Performance Optimization of Double-Pipe Type Heat Exchangers Based on CFD and Economic Analyses-A Numerical Study
Çift Borulu Tip Eşanjörlerin Tasarım ve Performans Optimizasyonu CFD ve Ekonomik Analizlere Dayalı Sayısal Bir Çalışma
Abdullah Sadık Tazegül, Mesut Bitkin, Ayşe Nur Öztekin , Ömer Sinan Şahin, Osman Babayigit100-110
- Gofret Pişirme Kalıplarının Tasarım İyileştirilmesi: Termo-mekanik Yaklaşım
Design Improvement of Wafer Baking Molds: A Thermo-mechanical Approach
Ayşe Nur Öztekin, Anıl Korkmaz111-129

DERLEME MAKALELERİ REVIEW ARTICLES

- Plastik Kirliliğinin Önlenmesinde Biyodegradasyon Sürecinin Yeri
The Role of Biodegradation In The Preventing Plastic Pollution
İlknur Erkinç, Tuba Artan Onat130 –149

Araştırma Makalesi / Research Article

Yumurta ve Dairesel Enkesit Geometrisine Sahip Atıksu Boru Modeli İçerisindeki Akışın Hidrodinamik Açından Karşılaştırmalı Sayısal Analizi

Esin ACAR^{1*}

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin, TÜRKİYE
esin.acar@artvin.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 28.05.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 27.10.2024

Özet: Çalışmada atık su boru sistemlerinde yaygın olarak kullanılan dairesel kesitli boru hatlarına alternatif olarak yumurta kesitlerin kullanılmasının hidrolik açıdan değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kapsamda eşdeğer kesit alanına sahip 750 mm dairesel kesitli ve 600mmx900mm yumurta kesitli beton boru hatları kullanılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı olan Star CCM⁺ ile hidrolik açıdan tek fazlı (su) olarak değerlendirilmiş ve yumurta kesitli boru hattının ortalama hız değerlerinin daha yüksek, basınç değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda yumurta kesitli boru hatlarının kullanımının özellikle taban tortu birikiminin önüne geçeceği ve boru içi basınç düşüklüğünden dolayı daha ekonomik kullanım ömrü sunacağı için daha uzun vadeli bir çözüm yöntemi olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık su boru sistemleri, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Yumurta kesitli borular

Comparative Hydrodynamic Numerical Analysis of Flow in Wastewater Pipe Model with Egg and Circular Cross-Section Geometry

Abstract: In this study, the hydraulic evaluation and comparison of the use of egg sections as an alternative to circular section pipelines, which are widely used in wastewater piping systems, was carried out. In this context, 750 mm circular section and 600mmx900mm egg section concrete pipelines with equivalent cross-sectional area were used. They were hydraulically evaluated as single phase (water) with Star CCM⁺, a computational fluid dynamics (CFD) program, and it was determined that the average velocity values of the egg section pipeline were higher and the pressure values were lower. In this context, it is thought that the use of egg section pipelines will be a longer-term solution method, especially since it will prevent bottom sediment accumulation and offer a more economical lifetime due to the lower in-pipe pressure.

Keywords: Waste water piping systems, Computational fluid dynamics, Egg section pipes

1. Giriş

Atıksu boru sistemleri kullanılırken en yaygın kesit dairesel kesitler olarak görülmektedir. Birçok proje sistemleri dairesel kesitlerden oluşmakta ve üretim alanları da oldukça geniştir. Fakat yumurta kesitli atıksu sistemlerinin kullanımı ülkemizde çok yaygın olmasa da yurtdışında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Üretimleri ülkemizde artmaya başlayan bu kesitlerin hidrolik avantajlarının belirlenmesi projelendirme aşamalarına da ışık tutacaktır.

Bu çalışma ile dairesel ve yumurta kesitli atıksu sistemlerinin hidrolik karşılaştırmaları yapılarak, uzun yıllar kullanımları bakımından öncelikleri belirlenmiştir. Atıksu sistemleri yerleşim yerlerinin altyapı çalışmalarında önemli bir rol oynamakta olup, projelendirilme kriterlerine göre en optimum sonuçlar göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılmaktadır. Gök ve Fırat (2022)'ye göre atıksu sistemleri, insan ve çevre sağlığı açısından en önemli alt yapı elemanlarından biridir. İçme ve kullanma suyu temin eden sistemlerin abonelere dağıttığı sular kullanıldıktan sonra modern yöntemler ile toplanması ve çevreye zararsız hale getirilmesi gerekmektedir Ayrıca kullanılmış sular

ile birlikte kar ve yağmur sularının toplanıp, yerleşim bölgelerinden uzaklaştırılmasını sağlayan sistemlerin kanalizasyon sistemleri olduğu belirtilmektedir. Gerger (2021)'e göre kanalizasyon sistemleri yerleşim bölgelerinde bulunan her türlü binalardan, sanayi kuruluşlarından sokak ve caddelerden gelen sıvı ve atık suları toplamaya, uzaklaştırmaya ve arıtma tesislerine iletmeye yarayan, yer altına döşenen birbirleri ile bağlantısı olan kanal sistemidir.

Ağaçkaya (2024)'ün yaptığı bir tanımlamada, kanalizasyon sistemleri, evsel ve endüstriyel kullanım sonucunda kirlenmiş atık suların hidrolik esaslar göz önünde bulundurularak kanallar vasıtasıyla belirlenmiş deşarj noktasına ulaştırılmasını sağlayan sistemler bütünü olduğu şeklindedir. Dünder (2024), yerleşim bölgelerindeki yoğunluğun artmasıyla kanalizasyon şebekesi taşıma kapasitesinin sınırlara ulaştığını ve taşma riskinin oluştuğunu ifade etmektedir.

Metcalf & Eddy Inc. vd. (2013) ve Dünder (2024), geleneksel sistemlerde atık suyun, yerçekimi etkisi ile taşındığı, bu sistemlerin tasarımında boru eğimi ve uygun boru boyutunun belirlenerek boru içinde akımın serbest yüzeyli olması ve bileşim noktalarında taşkınların önlendiğini belirtmişlerdir. Dikici (2021), kanalizasyon sistemlerinin performansının atık suyun ve selin hidrolik dengelerini bozmadan ilemesine bağlı olduğunu ifade etmektedir. Sistemin minimum ekolojik hasar ile iyi bir yapısal kararlılık göstermesi gerektiğini de belirtmektedir. Tan vd. (2020), kanalizasyon sistemlerinin maliyetli tasarımlar olduğunu ifade etmekte ve maliyetlerdeki düşüşün ekonomik olarak tasarruf getireceğine değinmektedir. Bu sebeple ilk yatırım maliyetlerinin hidrolik ve işletme kısıtlarına göre minimize edilmesini, hem ekonomik hem de hidrolik açıdan dengeli bir atıksu sisteminin oluşturulması gerekliliğini savunmuşlardır.

Kanalizasyon sistemlerinde kesit şekilleri dışında farklı malzeme türleri de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizdeki kanalizasyon sistemlerinde çoğunlukla beton/betonarme borular, koruge borular, cam takviyeli plastik borular ve polivinil klorür (pvc) borular tercih edilmektedir (Ağaçkaya, 2024).

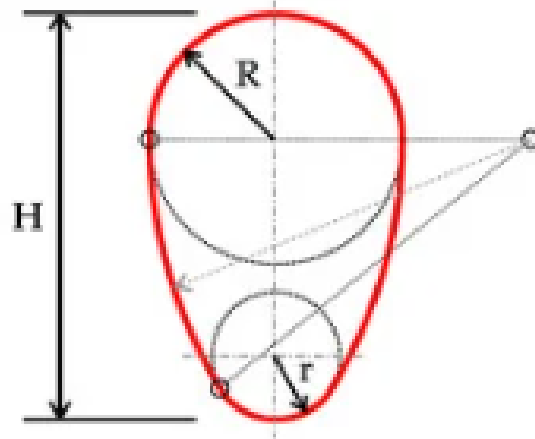
Regueiro-Picallo (2016) çalışmasında yumurta şeklindeki borunun hidrolik özelliklerini incelemek amacıyla, yumurta şeklindeki profilin eşdeğer alana sahip dairesel bir kesitle karşılaştırılabilmesi için bir CFD modeli geliştirmiştir. CFD modeli, yumurta biçimli kesitli bir metal boruda yapılan bir dizi deneyle doğrulanmıştır. Lamsal (2023), bir borudaki akışı ve parametreleri değiştirdikten sonraki etkiyi analiz etmek için bir hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çalışması ile CFD simülasyonları gerçekleştirilerek, laminer ve türbülanslı akışların, hız profillerinin ve basınç dağılımlarının kapsamlı bir araştırmasını yapmıştır. Yavuz ve Çavdar (2021) çalışmalarında, Newtonyen olmayan bir akışkan modelini ele almış ve akış geometrisi için bir CFD çözümü sunmuştur. Boru içindeki akışın farklı parametreleri için hız, basınç, dinamik viskozite ve hücre Reynolds sayısı üzerindeki etkilerini tartışmıştır.

Atıksu sistemlerinde boru hatlarının tıkanması istenmeyen bir durum olduğu için alternatif boru enkesit şekilleri ve bunların kullanımının araştırılması gerekliliği doğmuştur. Bu sebeple çalışmanın amacı atıksu sistemlerinde ülkemizde yaygın kullanıma sahip dairesel kesitlere alternatif yumurta kesitlerin hidrolik açıdan avantajlarının belirlenmesine yöneliktir.

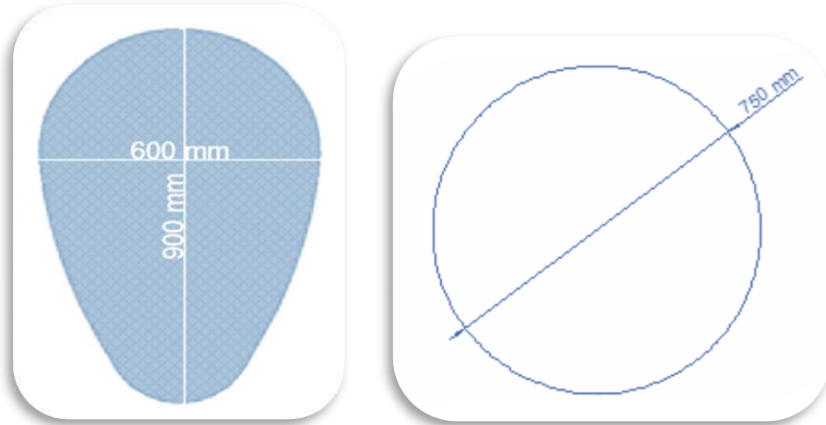
2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada dairesel ve yumurta kesitler (Şekil 1) için HAD programı olan Star CCM⁺ programı ile çalışılmış olup, öncelikle uygun kesit çapları belirlenmiş ve bu çapların kesit alanlarının birbiri ile yakın olmasına özen gösterilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından kesit alanı değerleri en önemli kriter olarak alınarak, hidrolik hesaplamalar bu kapsamda yapılmıştır. Çalışmada öncelikle 600 mm × 900 mm ebatlarındaki yumurta kesit ile 750 mm boyutunda dairesel kesit (Şekil 2) alınmıştır. Kesit alanı değerleri yumurta kesit için 0.413 m², dairesel kesit için 0.441 m² olup, yakın

değerlerdedir. Hesaplamalarda kararlı (zamana bağlı değişmeyen) çözüm yöntemi ve boru hattı içinde ilerleyebilecek akışkanın minimum hız değeri kullanılmıştır. Yumurta kesit çap seçimi yapılırken üretimi yaygın olarak devam eden bir boru kesiti olmasına dikkat edilmiştir. Boru malzemesi beton seçilmiş olup n pürüzlülük değeri 0.013 alınmıştır. Hidrolik hesaplamalarda kesit malzemesi olan betonun tanımlanabilmesi amacıyla aşağıda yer alan Manning-Strickler denkleminde (1) yararlanılmıştır;



Şekil 1. Yumurta Kesitli boru görünümü (Regueiro-Picallo, 2016)



Şekil 2. 600 mm × 900 mm yumurta kesiti ve 750 mm dairesel kesit

Dairesel kesitli ve dairesel kesitli olmayan akımlar için tam dolu veya kısmi dolu olmasına bakılmaksızın, akış hızı Manning denklemi kullanılarak şu formülle hesaplanır (URL-1):

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} J_E^{1/2} \quad (1)$$

Burada,

- n Manning katsayısı
- R_H hidrolik yarıçap (m)
- J_E piyezometre çizgisinin eğimi (hidrolik gradyen)

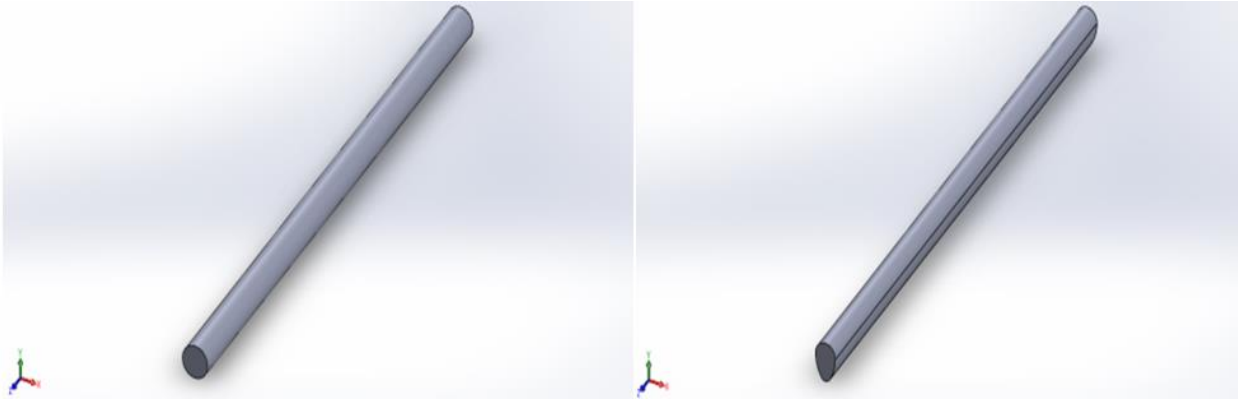
Çalışmada dairesel ve yumurta kesit akış dağılımları incelenmiştir. Değerlendirme yapabilmek amacı ile 750 mm çaplı dairesel kesit ile 600 mm × 900 mm boyutlarında yumurta kesit boru hattı CAD programı Solidworks ile 15 m uzunluğunda, sıfır eğimli ve 3 boyutlu olarak çizilerek ve HAD programına aktarılarak hesaplamaları yapılmıştır.

Hesaplamalarda;

- Kararlı akım
- Tek fazlı sıvı
- K-epsilon türbülans modeli
- Giriş ortalama hızı 0.41 m/s

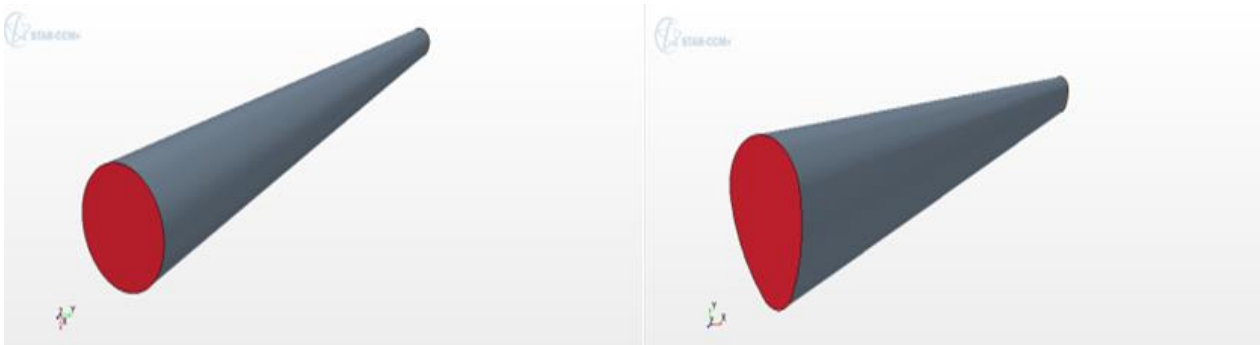
olarak girilmiştir.

Çalışmada öncelikle dairesel kesitli 750 mm çapında ve 600 mm × 900 mm ebatlarında yumurta kesitli 15 m uzunluğunda boru hattı Solidworks programında oluşturulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Boru hatlarına ait Solidworks görüntüleri

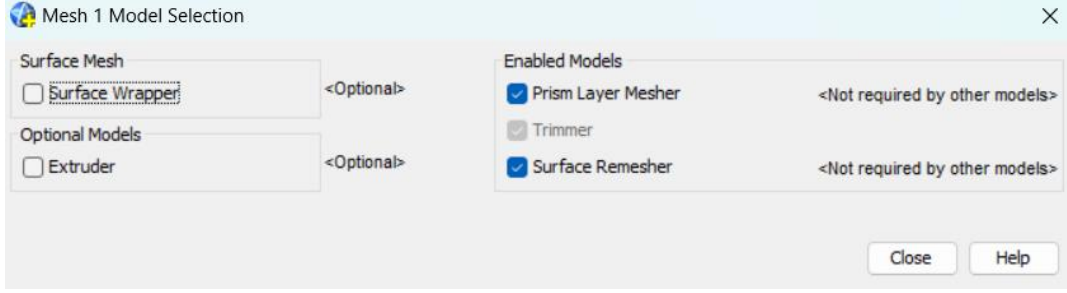
CAD programında çizilen geometri dairesel ve yumurta kesitli olmak üzere Star CCM⁺ programına aktarılarak çalışmaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 4).



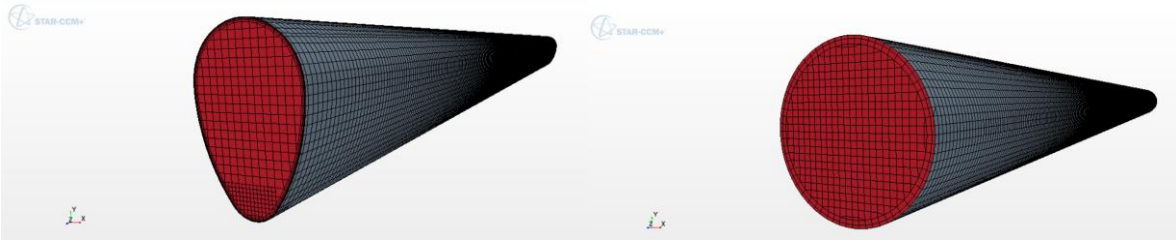
Şekil 4. Star CCM⁺ programı boru görüntüleri

Star CCM⁺ programında boru hatlarının meshleme işlemleri yapılmış olup, Şekil 5'te mesh model seçimi gösterilmiştir. Mesh özellikleri seçilerek, kenar yüzeyleri tanımlama, daha sık meshleme ile kenar ve köşelerin düzgün şekil alması sağlanmıştır. Burada yüzeylerde minimum 1 cm, maksimum 5 cm'lik meshler oluşturularak, kenar yüzeylerde yüzeyin tanımlanabilmesi amacıyla sınır tabakasında 5 sıra mesh yapılması ve düzgün olmayan yüzeylerde ise %20'ye kadar mesh boyutlarının değiştirilebilmesi kriterleri seçilerek mesh işlemi gerçekleştirilmiştir. Mesh tipi olarak

hexahedra kullanılmış olup, yumurta kesitte toplam 246 824 hücre, dairesel kesitte ise 218 204 hücre oluşmuştur (Şekil 6).

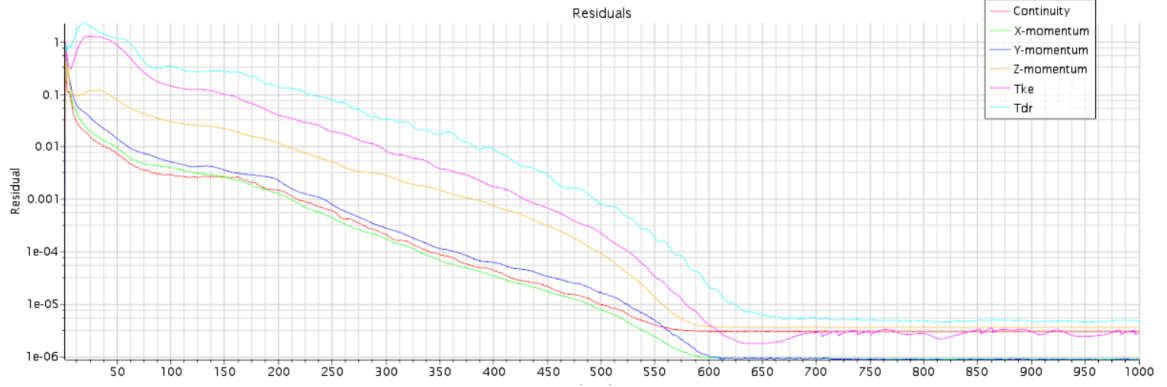


Şekil 5. Mesh model seçimi

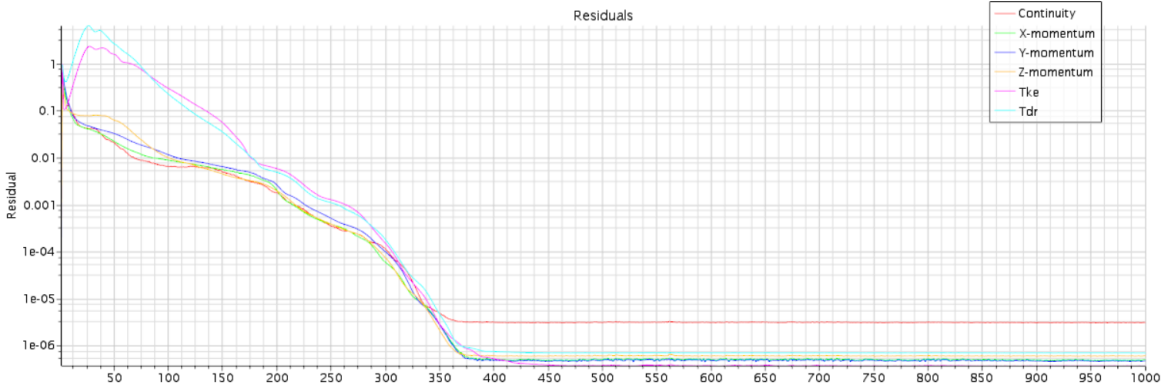


Şekil 6. Boru hatlarının Mesh görünüşleri

Fizik değerleri olarak kararlı akım, tek fazlı sıvı, türbülanslı akış, k-epsilon türbülans modeli ve akışın ortalama hızı girilerek de HAD programında işletme çalışması yapılmıştır. Yapılan işletme programı için 1000 adet iterasyon uygun yakınsama değerlerine ulaştığı için yapılmış olup, yakınsama değerleri yaklaşık olarak 10^{-5} civarında olduğundan (Şekil 7) işletme sonlandırılmıştır.



(a)

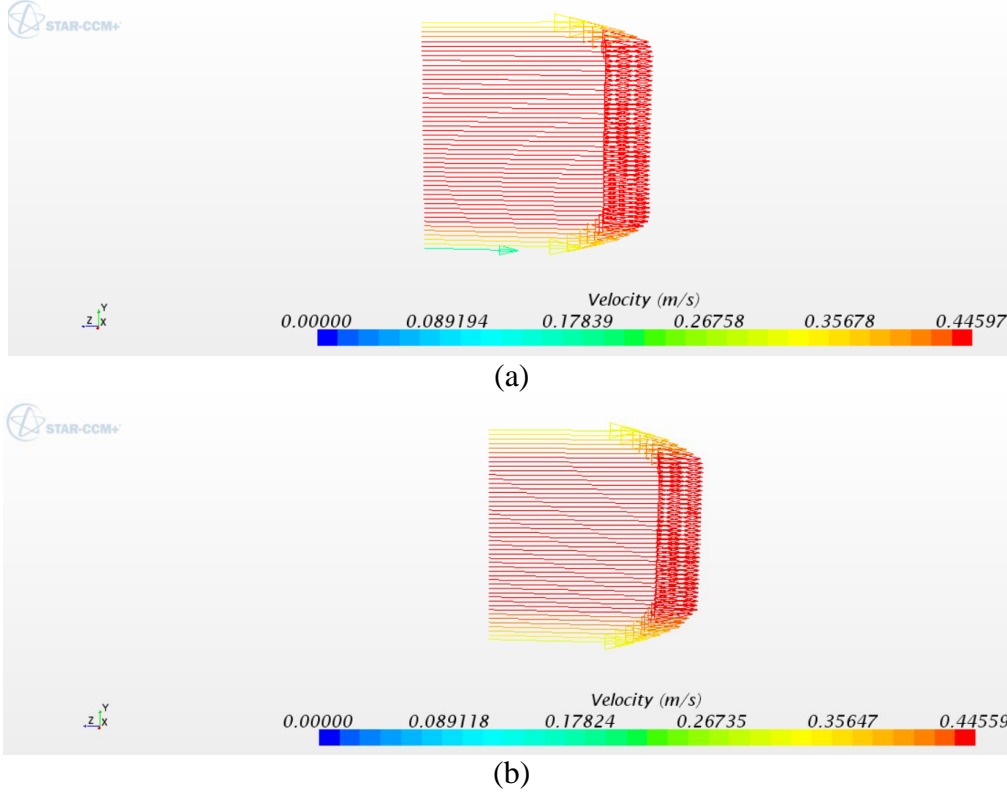


(b)

Şekil 7. (a) Yumurta kesitli, (b) Dairesel kesitli işletme çalışması yakınsama değerleri

3. Bulgular ve Tartışma

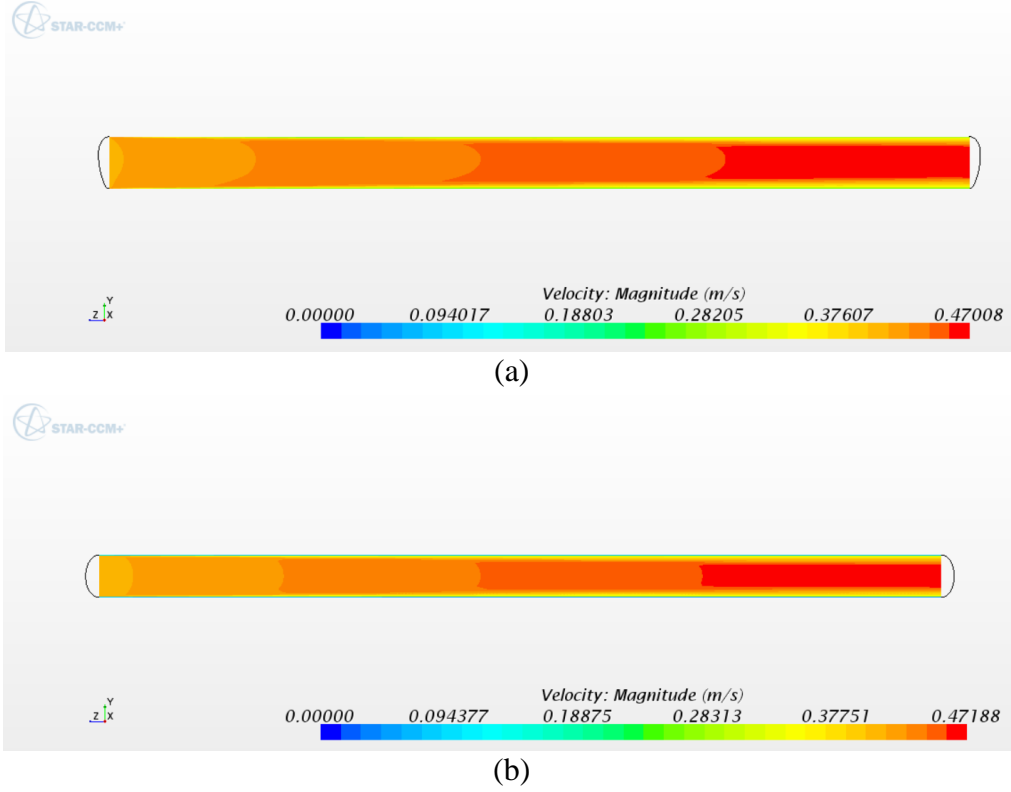
Çalışmada farklı kesit özelliklerine sahip iki boru hattının aynı fiziksel girdi değerlerine göre karşılaştırılması sağlanmıştır. Çalışmada türbülanslı akış kullanılmış olup yumurta ve dairesel kesitli boru hattının 7.50 m mesafesindeki hız profilleri Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. (a) Yumurta kesitli, (b) Dairesel kesitli boru hattının orta noktasındaki hız profilleri

Yumurta kesitli boru hattı ile dairesel kesitli boru hattının akış özellikleri karşılaştırılarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kapsamda girilen fizik değerlerine göre HAD işletme çalışması yapılmış, 0-3-6-9-12 ve 15 m mesafelerde hız değerleri m/s olarak verilmiştir. Şekil 9’da sırasıyla yumurta ve dairesel kesitlerin ortalama hız değerlerinin program çıktısı görüntüleri yer almaktadır.

Her iki kesite göre boru içindeki hız değerlerine ait değişimler ile kesitler arasındaki hidrolik farklılıkların ortaya koyulması sağlamıştır. Eşit fiziki şartlarda oluşturulan sistemin işletme çıktıları değerlendirilerek karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Çalışmada boru hatları için elde edilen 0-3-6-9-12 ve 15 m mesafelerdeki hız değerleri, boru hattı ortasında ve tabandan yaklaşık 0.001 m kadar yukarıda olmak üzere ölçülerek Tablo 1’de verilmiştir.



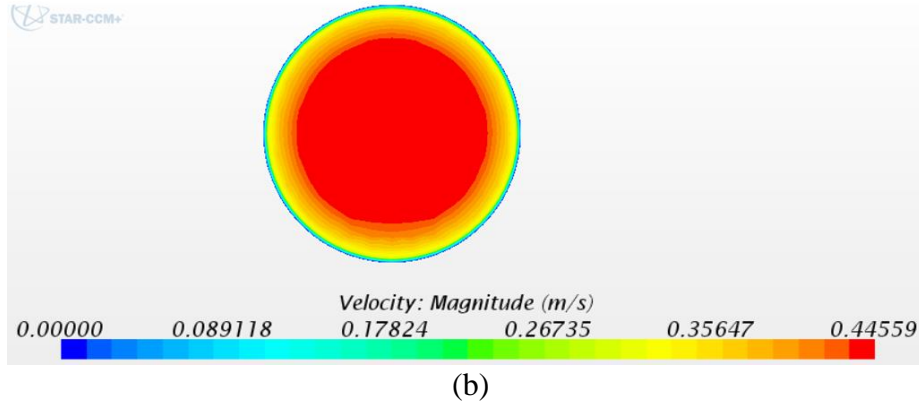
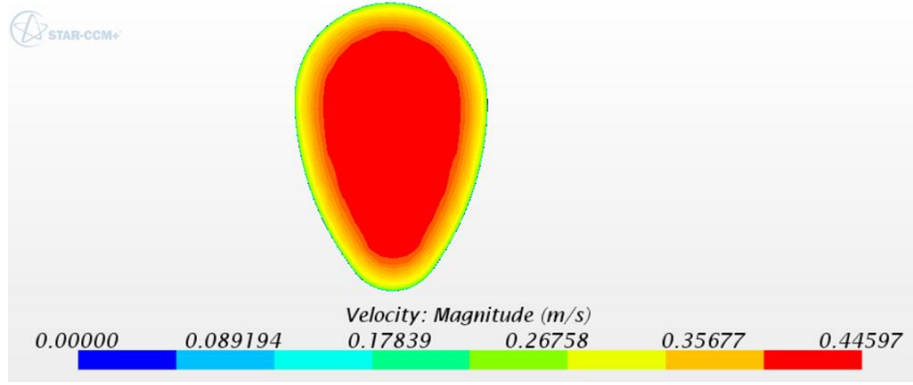
Şekil 9. (a) 600 mm × 900 mm yumurta kesitli, (b) 750 mm dairesel kesitli boru hatlarına ait ortalama hız değerleri

Tablo 1. 750 mm dairesel kesit ve 600 mm × 900 mm yumurta kesit karşılaştırma tablosu

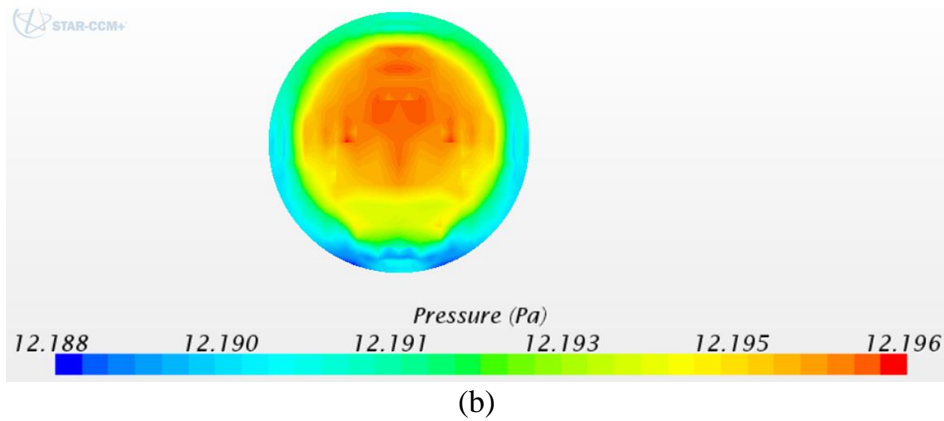
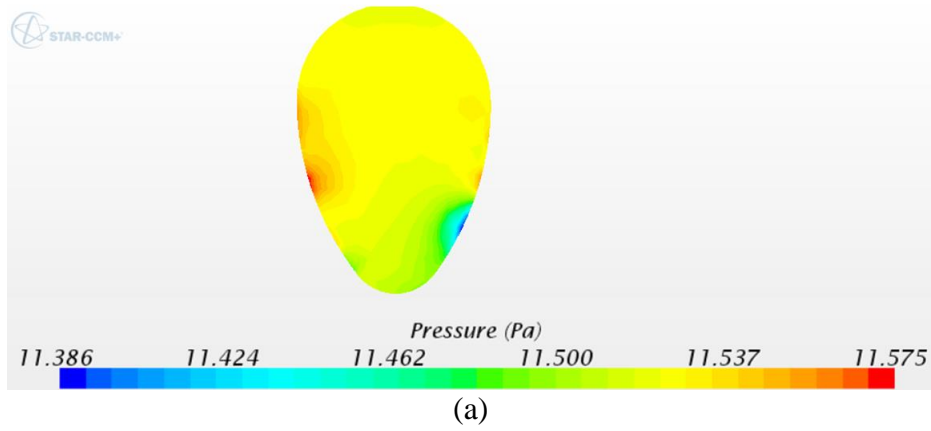
	Boru Hattı ortasındaki hız değerleri (m/s)					
L (m)	0 m	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
750 mm	0.410	0.426	0.440	0.451	0.462	0.471
600x900 mm	0.410	0.428	0.441	0.453	0.464	0.472
	Boru Hattı tabanındaki hız değerleri (m/s)					
L (m)	0 m	3 m	6 m	9 m	12 m	15 m
750 mm	0.410	0.426	0.439	0.450	0.461	0.471
600x900 mm	0.410	0.431	0.444	0.451	0.463	0.472

Boru hatlarının hız en kesitlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla boru hattının tam orta noktası olan 7.50 m mesafesindeki alınan enine kesite göre hız değerleri Şekil 10'da ve basınç değerleri ise Şekil 11'de verilmiştir.

Her iki kesit değerlendirildiğinde hız değerlerinin benzer fakat yumurta kesitin tabanında hızın daha yüksek olduğu ve basınç değerlerinde de dairesel kesite etkiyen basıncın daha yüksek, yumurta kesitte daha düşük olduğu görülmektedir. Yumurta kesitte taban hızının yüksek oluşu sürüntü maddesinin birikmesini engellemekte ve basıncın daha düşük olması da yumurta kesitin daha uzun vadeli kullanımına olanak sağladığı şeklinde değerlendirilmesi mümkündür.



Şekil 10. (a) Yumurta kesitli, (b) Dairesel kesitli boru hattının hız en kesiti



Şekil 11. (a) Yumurta kesitli, (b) Dairesel kesitli boru hattının basınç en kesiti

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı (ÇSGB) Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Müdürlüğü tarafından, galeri sistemlerinin tasarımında, boru sistemlerinde yumurta kesite geçilebileceği (betonun içine kalıpla yumurta kesit dökülmesi şeklinde), kesit daraldıkça akış hızının artacağı ve kokunun oluşmayacağı belirtilmiştir (URL-2).

En yaygın kullanılan kanal, dairesel kesit tipidir. Gerek hidrolik bakımdan, gerekse inşa bakımından en uygun olanıdır. Yalnız karışık sistemde bilhassa kurak havalarda tabanın eğimi az olduğundan çamur ve buna benzer maddeler kolaylıkla dibe çöker ve kalırlar. Elverişli olmayan hızlar bu çökelti maddelerini sürükleyemezler. Normal yumurta kesitli kanallar küçük su derinliklerinde diğer tip profilli kanallara nazaran daha büyük debi geçirirler. Bu sebeple kendi kendini yıkama özelliği vardır. Buna bağlı olarak tabanda yığıntı tehlikesi azdır (Erdemgil vd., 1976).

4. Sonuçlar ve Öneriler

Yumurta kesitli borular, eşdeğer dairesel borulara göre daha düşük giriş hızlarında daha iyi hız karakteristiğine sahiptir. Bazı kanalizasyon sistemlerinde dairesel kesitlere göre pompalamaya gerek kalmadan döşenebileceği için daha düşük işletme maliyetleri bulunmaktadır. Yüksek hız kapasitesine sahip olduğu için kendi kendini temizleme özelliği de büyük bir avantaj olup, daha az tıkanma riski vardır.

Yumurta ve dairesel kesitli 15 m uzunluğunda boru hatları ile çalışılmış olup; tek fazlı (su), kararlı akım ve $V=0.41$ m/s ortalama hız hesaplamalarındaki HAD sonuçlarına göre;

- 1- Yumurta kesitli boru hattındaki ortalama hız değeri dairesel kesite göre kesit ortasında %0.50, kesit tabanında ise %1 daha fazla olduğu görülmektedir.
- 2- Her iki kesitte de ortalama giriş hızları 0 m mesafesinde eşit iken boru orta mesafesi olan 7.50 m mesafesinde %7 ve boru sonunda %15 civarında artış göstermektedir.
- 3- Basınç değerleri incelendiğinde yumurta kesitteki basınç dağılım değerlerinin ortalama dairesel kesite göre %5 ila %7 arasında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma ile ortaya konan sonuçlar değerlendirildiğinde, yumurta kesitli boruların özellikle taban hızlarının yüksek olması katı madde birikimini önleyeceği için hem ekonomik hem de hidrolik açıdan daha verimli bir atık su hattı sağlayacaktır. Boru içi basınç değerlerinde de dairesel kesitli borulardaki basıncın yüksekliği uzun vadeli kullanımlarda boruların tahrip olmasına ve ekonomik ömrünün azalmasına neden olacaktır.

Bu değerlendirmelere göre düşük hız değeri olan $V=0.41$ m/s ile çalışılmış olup, düşük hızlarda kesit tipi karşılaştırması yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda farklı hız değerlerine göre çalışılması önerilmektedir.

Yumurta kesitlerin ilk yapım ve kazı maliyetleri dairesel kesitlere göre biraz daha yüksek olsa da uzun vadeli işletme sağlandığında katı madde birikimi daha az olacağı için bakım maliyetleri ve katı malzemeden kaynaklı tıkanmaları önlemesi optimum sonuçlar doğurmaktadır. Bu sebeple günümüzde daha yaygın kullanımı hem üretim maliyetlerini azaltacak, hem deneyim kazanılmasını sağlayarak uzun vadeli güvenli sonuçlar sunacaktır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Ağaçkaya, Ç. (2024). 2011 Van depremi sonrasında Erciş ilçesindeki kanalizasyon hatlarında meydana gelen hasarların incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, Türkiye.

Dikici, M. (2021). Büyükşehirlerin Kanalizasyon Hatlarının Etkili İşletmesi ve İstanbul Örneği. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 29-43. <https://doi.org/10.46740/alku.841422>

Dündar, O. (2024). Kanalizasyon ve yağmur suyu toplama şebekesi bacalarının hidrolik etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye.

Erdemgil, N., Sırma, M. & Yavuz, M. (1976). Su Getirme ve Kanalizasyon, Birsen Kitabevi Yayınları, Ankara, Türkiye.

Gerger, R., Tulpar, H., Toplamacı, M. M. & Gerger E. (2021). Kanalizasyon Şebekelerinde Kullanılan Boruların Hidrolik ve Maliyet Açısından Değerlendirilmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 6(2), 91-101. <https://doi.org/10.46578/humder.890819>

Gök, S. & Fırat, M. (2021). Analysis of Faults in Sewage Systems with Geographical Information Systems, *4th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism (ICCAUA-2021)*, 786-797, 20-21 Mayıs 2021, Alanya, Antalya, Türkiye. <https://doi.org/10.38027/ICCAUA2021TR0050N9>

Lamsal, A. (2023). Analyzing Pipe Flow Scenarios using Computational Fluid Dynamics (CFD), *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 8(3), 162-166.

Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Tsuchihashi, R & Stensel, H.D. (2013). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery, 5th edition. McGraw-Hill Education, ISBN:9780073401188, New York, ABD.

Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Puertas, J., & Suárez, J. (2016). Experimental and Numerical Analysis of Egg-Shaped Sewer Pipes Flow Performance. *Water*, 8(12), 587. <https://doi.org/10.3390/w8120587>

Tan, E., Sadak, D., & Ayvaz, M. T. (2020). Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Optimum Tasarımı. *Teknik Dergi*, 31(5), 10229-10250. <https://doi.org/10.18400/tekderg.541507>

URL-1, (2024). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/altyapi/icerikler/ekler-20180215122652.pdf>, 22.05.2024

URL-2, (2017). https://webdosya.csb.gov.tr/db/altyapi/editordosya/file/TOPLANTI%20NOTU-22_09_2017.pdf, 27.05.2024

Yavuz, M., & Çavdar, P. (2021). CFD Modelling of Non-Newtonian Fluid Flow in a Pipe Including Obstacle. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2), 129-136. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.865261>

Araştırma Makalesi / Research Article

Uludağ Göknarı Odununda Farklı Vernik Türlerinin Uygulanması ve Renk Parametrelerinin Karşılaştırılması Üzerine Bir Araştırma

Hüseyin PEKER^{1*} Ümit AYATA^{2*}

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstrisi Mühendisliği Bölümü, Artvin, TÜRKİYE

² Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Bayburt, TÜRKİYE
peker100@artvin.edu.tr, umitayata@bayburt.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 09.09.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 17.12.2024

Özet: Bu çalışmada, Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf.) odununda farklı vernik türlerinin (yat verniği, solvent bazlı yarı örtücü ahşap verniği ve taş verniği) uygulanması sonrasında elde edilen verniklenmiş yüzeyler üzerinde renk parametreleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, ΔE^* değerleri yat verniği için 5.61, taş verniği için 7.06 ve yarı örtücü vernik için 13.20 olarak hesaplanmıştır. Varyans analizlerinde bütün renk parametreleri için vernik türü anlamlı olarak tespit edilmiştir. Verniklerin ahşap malzeme yüzeylerine uygulanması sonrasında kontrol örneklerine kıyasla, L^* ve h^o değerlerinde azalışlar belirlenirken, C^* , b^* ve a^* parametrelerinde artışlar bulunmuştur. Bütün vernik türlerinde ΔL^* değerleri negatif olarak elde edilirken, Δa^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri ise pozitif olarak tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan vernikler ile ahşap malzemenin renginde değişikliklerin elde edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Renk, Solvent bazlı vernik, Taş verniği, Uludağ göknarı, Yat verniği

A Study on the Application of Different Varnish Types on Uludağ Fir Wood and Comparison of Color Parameters

Abstract: In this study, color parameters of varnished surfaces were obtained after applying different types (yacht varnish, solvent-based semi-covering wood varnish and stone varnish) of varnishes to Uludağ fir (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf.) wood were compared. According to the results, ΔE^* values were calculated as 5.61 for yacht varnish, 7.06 for stone varnish, and 13.20 for semi-covering varnish. Variance analyses revealed that varnish type was significant for all color parameters. After applying the varnishes to the wood surfaces, decreases in L^* and h^o values were observed compared to the control samples, while increases in C^* , b^* , and a^* parameters were found. For all varnish types, ΔL^* values were obtained as negative, while Δa^* , Δb^* , and ΔC^* values were found to be positive. The study showed that changes in the color of the wood material were achieved with the varnishes used.

Keywords: Color, Solvent-based varnish, Stone varnish, Uludağ fir, Yacht varnish

1. Giriş

Ahşap, insanlık tarihinin başlangıcından bu yana en çok kullanılan malzemelerden biri olup hem çok yönlülüğü hem de yüksek performansı nedeniyle medeniyetin gelişiminde önemli bir rol oynamıştır. Enerji, inşaat, selüloz ve kâğıt üretimi, mobilya ve panel imalatı gibi birçok sektörde önemli bir kaynak olarak günlük hayatın vazgeçilmez bir parçasıdır (Hermida de Paula vd., 2023). Odun, yoğunluk, renk, dayanıklılık ve mukavemet açısından farklılık gösteren bir malzemedir. Ana yenilenebilir kaynak olarak ahşap, döngüsel ekosistem dönüşümlerinin bir parçasıdır. Biyobozunma, bu süreçte önemli bir faktördür. Doğal bir kompozit olan ahşap, aynı zamanda neme karşı oldukça hassastır. Değişen nem rejimlerinde kararsızlık, biyobozunabilirliğin yanında ahşabın diğer malzemelere kıyasla ikinci büyük dezavantajı olarak kabul edilir. Hızlı büyüyen ağaç türlerinin çoğu, biyolojik ve fiziksel etkiler altında hızla bozulma eğilimindedir (Homan ve Jorissen, 2004).

Ahşap alt yüzeyin hazırlanması, kaplama öncesinde önemli süreçlerden biridir ve kaplamanın yüzey özellikleri (renk, parlaklık ve pürüzlülük) ile kaplamanın alt yüzeye yapışma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Genellikle bu işlem planlama, yüzey frezesi ve zımparalama gibi yöntemlerle gerçekleştirilir (De Hernandez ve Cool, 2008; Bekhta vd., 2022).

Herhangi bir ahşaba ait yüzeyinin işlenmesi, seçilen anilin boyalar, vernikler, dolgular, macunlar, yağlar, emaye boyalar, boyalar ve balmumu cilaları ile kaplanmasıdır. Bu malzemeler daldırma, silme, püskürtme, fırça ile sürme ve düşürme metotları ile kaplanabilir. Üst yüzey işlemleri çeşitli amaçlarla yapılabilmektedir. Bazı üst yüzey işlemleri mantar ve haşerelere karşı ahşabı korurlar. Bazı üst yüzey gereçleri de yangına ve kimyasal maddelere karşı dirençlidirler (Hammond vd., 1969).

Vernikler, aynı zamanda dolgu vernikleri olarak da bilinir, ahşap hazırlık işleminden sonra ilk kat olarak uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Üst kaplama vernikleri ile uyumlu olmaları gerekir ve nihai sonucu tehlikeye atmayan sertlik özelliklerine sahip olmalıdırlar. Üst kaplama vernikleri, kullanım ve kişisel tercihe göre daha az veya daha fazla sert olabilir, daha az veya daha fazla parlaklık gösterebilmektedir. Genellikle, vernikler parlak, yarı parlak veya mat olarak adlandırılır. Vernikler tek komponent olabilir, yani uygulanmadan önce hazırlık gerektirmeyen veya iki bileşenli olabilir (Sousa, 2008).

Literatürde göknar odununa uygulanmış çeşitli vernik çalışmaları bulunmaktadır [örneğin: selülozik vernik (Özdemir vd., 2015), su bazlı vernik (Ulay, 2018), teflon koruyucu verniği ve süper parlak emaye (Mihailă vd., 2021)]. Ama literatürde göknar odunu yüzeylerinde solvent bazlı yarı örtücü ahşap verniğinin, taş verniğinin ve yat verniğinin kullanılmasına yönelik herhangi bir uygulamanın yapılmadığı görülmüştür.

Bu ağaç hakkında kısaca bilgi vermek gerekirse; Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *nordmanniana*), 40 ila 60 metre yüksekliğe kadar büyüyen ve gövde çapı 2 metreye kadar ulaşabilen büyük bir iğne yapraklı ağaçtır. İğne yapısı düzleşmiş olup, 1.8- 3.5 cm uzunluğunda ve 2 mm genişliğindedir. Yaprakların üst yüzeyi koyu yeşildir. Yaprak uçları genellikle küt bir yapıya sahiptir (Bercu vd., 2010).

Göknar odunu mikro organizmalar ve böcekler vasıtası ile kolayca yıkımlanmaktadır. Olgun odunlu bir ağaçtır. Yıllık halkaları geniştir. İç odunu sarımsı açık kahverengi ve dış odunu sarımsı beyazdır. Isı yalıtımı ve ses özellikleri bakımından üstün özelliklere sahiptir. Kolay yarılr (Şanıvar ve Zorlu, 1980). Göknar odunu, sahne dekorasyonu, kaplama levhası yapımında, kafes ambalajı, bidon, kereste imalatında, sandık kapı, kutu yapımında, kürek, kalıp, iç dekorasyon, boya fırçası, tahta eşya yapımında ve kâğıt odunu üretiminde kullanılmaktadır (Hammond vd., 1969).

Göknar odununda, ısı iletkenlik 0.110 W/m.K (Çavuş vd., 2019), selüloz %51.78 (Temiz, 2006), kül miktarı %0.56, lignin %30.02, holoselüloz %69.85, pentozan %80.03 (Tank 1964), fırın kurusu durumda işlenmiş özgül ağırlığı 0.492 g/cm³ (Gündüz vd., 2008), çivi tutma direnci teğet yüzey için 6.05 N/mm² (Bal vd., 2018), hava kurusu yoğunluğu 0,475 g/cm³, alev kaynaklı yanma 693°C, kendi kendine yanma 532°C, kor hali yanma 327°C, yanmada ağırlık kaybı %83.10 (Çalışımşek, 2019), tam kuru yoğunluğu 0.371 gr/cm³, denge rutubet miktarı 10.70, 48 saat sonraki su alma oranları %113.42, hacimsel şişme %13.81, statik eğilme direnci 60.14 N/mm² ve elastikiyet modülü 7381.67 N/mm² (Özkan, 2013) olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf.) odununda farklı vernik türleri uygulandıktan sonra elde edilen vernik yüzeyler üzerinde renk parametreleri belirlemiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma, göknar odununun estetik görünümünü iyileştirme üzerine yapılmıştır. Elde edilen sonuçların hem bu ağaç türüne hem de çalışmada kullanılan vernik türlerine bağlı olarak oluşan farklılıkları değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Ahşap Malzeme

Uludağ göknar (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf.) odununa ait deney örnekleri bir kereste satıcısından satın alınma yolu ile temin edilip 100 mm x 100 mm x 20 mm boyutlarında hazırlanmıştır (grup başına 10'ar adet). Numuneler üzerinde iklimlendirme uygulamaları yapılmıştır (20±2°C ile %65 bağıl nem) (ISO 554, 1976).

2.1.2. Vernikler

Kontrol örnekler vernik uygulaması yapılmamış olarak tanımlanmıştır. Çalışmada tek komponentli olarak 3 farklı vernik türü kullanılmış olup, bu vernikler farklı firmalardan satın alınma yoluyla temin edilmiştir. Bu verniklere ait açıklamalar aşağıda belirtilmiştir.

2.1.2.1. Yat Verniği

Yüksek sertlik özelliğine sahip ve suya karşı çok dirençli olan solvent bazlı yat verniği kullanılmıştır (yağlı alkid reçine içerikli %60-70, katı madde miktarı: %50, yoğunluğu: 0.87-0.92 g/ml, 14-16 m²/lt).

2.1.2.2. Solvent Bazlı Yarı Örtücü Ahşap Verniği

Dış mekân ahşap kaplamaları için formüle edilmiş doğal yağlar, balmumları ve reçinelerin bir karışımı olan vernik (yoğunluk: 0.87 gr/cm³, uygulama: 16-20 m²/lt, ilk kat kuruma süresi: 6-8 saat, tam kuruma süresi 24-48 saat) kullanılmıştır.

2.1.2.3. Taş Verniği (İç ve Dış Mekân)

Taş verniği (mat, solvent bazlı, akrilik reçine esaslı, dokunma kuruluğu: 6-8 saat, yoğunluk: 0.95 gr/cm³, viskozite: 24 saniye, tam sertleşme: en az 24 saat, katı madde miktarı: %27, 200-250 gr/m²) kullanılmıştır.

2.1.3. Zımparalar

80, 100 ve 120 kum zımparalar ahşap malzeme yüzeylerinin zımparalama işlemlerinde kullanılması için satın alınma yoluyla elde edilmiştir.

2.2. Metot

2.2.1. Ahşap Yüzeylerin Zımparalanması

Bir titreşim zımpara makinesi ve 80, 100 ile 120 kum zımparaların kullanılması ile ahşap malzeme yüzeylerinde zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra zımparalama işlemleri görmüş olan yüzeyler bir kompresör yardımıyla temizlenmiştir.

2.2.2. Verniklerin Ahşap Malzeme Yüzeylerine Uygulanması

Bir fırça yardımıyla bütün vernikler ahşap malzeme yüzeylerine endüstriyel uygulamalara göre 2 kat olarak uygulanmıştır. Vernikleme işlemi ASTM D3023-98, (2017) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Renk Özelliklerinin Belirlenmesi

CS-10 cihazı (Şekil 1A) kullanılarak renk değişimleri belirlenmiştir (ASTM D 2244-3, 2007). ΔC^* : kroma kısmı veya doygunluk farkı ve ΔH^* : ton bölümü veya gölge farkı olarak tanımlanmıştır (Lange, 1999). Aşağıdaki formüller ile toplam renk farklılıkları belirlenmiştir.

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*) \quad (2)$$

$$\Delta C^* = (C^*_{\text{vernikleme işlemi görmüş ahşap malzeme}} - C^*_{\text{vernikleme işlemi görmemiş ahşap malzeme}}) \quad (3)$$

$$\Delta a^* = (a^*_{\text{vernikleme işlemi görmüş ahşap malzeme}} - a^*_{\text{vernikleme işlemi görmemiş ahşap malzeme}}) \quad (4)$$

$$\Delta L^* = (L^*_{\text{vernikleme işlemi görmüş ahşap malzeme}} - L^*_{\text{vernikleme işlemi görmemiş ahşap malzeme}}) \quad (5)$$

$$\Delta b^* = (b^*_{\text{vernikleme işlemi görmüş ahşap malzeme}} - b^*_{\text{vernikleme işlemi görmemiş ahşap malzeme}}) \quad (6)$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (7)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (8)$$



Şekil 1. Renk ölçüm cihazı (A) ve CIELAB renk uzayının şematik gösterimi (Cheung, 2016) (B)

Δa^* , ΔL^* , Δb^* ve ΔC^* değerlerine ait bazı önemli bilgiler (Lange, 1999) Tablo 1’de ve ΔE^* değerlendirmesi için kriterler (DIN 5033, 1979) Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 1. ΔL^* , Δa^* , Δb^* ve ΔC^* değerlerine ait bazı önemli bilgiler (Lange, 1999)

Negatif durumda	Parametre	Pozitif durumda
Referanstan daha koyu	$\blacktriangleleft \Delta L^* \blacktriangleright$	Referanstan daha açık
Referanstan daha yeşil	$\blacktriangleleft \Delta a^* \blacktriangleright$	Referanstan daha kırmızı
Referanstan daha mavi	$\blacktriangleleft \Delta b^* \blacktriangleright$	Referanstan daha sarı
Mat, referanstan daha bulanık	$\blacktriangleleft \Delta C^* \blacktriangleright$	Referanstan daha net, daha parlak

Tablo 2. DIN 5033, (1979) standardına göre ΔE^* için kriterler

ΔE^*	Görsel fark	ΔE^*	Görsel fark
<0.20	Algılanamaz	3.00 ila 6.00	Çok belirgin
0.20 ila 0.50	Çok zayıf	6.00 ila 12.00	Güçlü
0.50 ila 1.50	Zayıf	> 12.00	Çok güçlü
1.50 ila 3.00	Belirgin		

2.3. İstatistiksel Analiz

Bir istatistik programı ile yüzde (%) değişim (azalış veya artış) oranları, standart sapmaları, ortalama değerleri, maksimum ve minimum değerleri, homojenlik grupları ve varyans analizleri hesaplanmıştır (One-Way-ANOVA ve Duncan testleri).

3. Bulgular ve Tartışma

Renk parametrelerine ilişkin varyans analizi sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. SPSS programında belirlenmiş olan varyans analizi sonuçlarına göre h° (ton açısı), L^* (ışıklılık), b^* (sarı renk tonu), a^* (kırmızı renk tonu) ve C^* (kroma) değerleri için vernik türü anlamlı olarak bulunmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. Renk parametrelerine [h° (ton açısı), L^* (ışıklılık), b^* (sarı renk tonu), a^* (kırmızı renk tonu) ve C^* (kroma)] ilişkin varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Test	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Vernik Türü	L^* : Işıklılık	226.394	3	75.465	449.070	0.000*
	a^* : Kırmızı renk tonu	62.099	3	20.700	659.224	0.000*
	b^* : Sarı renk tonu	612.252	3	204.084	2731.257	0.000*
	C^* : Kroma	668.412	3	222.804	2483.271	0.000*
	h° : Ton açısı	53.021	3	17.674	135.463	0.000*
Hata	L^* : Işıklılık	6.050	36	0.168		
	a^* : Kırmızı renk tonu	1.130	36	0.031		
	b^* : Sarı renk tonu	2.690	36	0.075		
	C^* : Kroma	3.230	36	0.090		
	h° : Ton açısı	4.697	36	0.130		
Toplam	L^* : Işıklılık	237928.666	40			
	a^* : Kırmızı renk tonu	1622.481	40			
	b^* : Sarı renk tonu	21274.694	40			
	C^* : Kroma	22908.997	40			
	h° : Ton açısı	223215.006	40			
Düzeltilmiş Toplam	L^* : Işıklılık	232.443	39			
	a^* : Kırmızı renk tonu	63.229	39			
	b^* : Sarı renk tonu	614.942	39			
	C^* : Kroma	671.642	39			
	h° : Ton açısı	57.717	39			

$\alpha \leq 0.05$ sütunu için *: anlamlı sonucu göstermektedir.

Renk ölçüm cihazı kullanılarak vernik uygulanmış ve uygulanmamış malzemeler üzerinden alınan renk parametrelerine [b^* (sarı renk tonu), h° (ton açısı), L^* (ışıklılık), a^* (kırmızı renk tonu) ve C^* (kroma)] ait ölçüm sonuçları Tablo 4'te ve bu sonuçlara ait grafik Şekil 2'de verilmektedir.

L^* değerinde bütün vernik türlerinin ahşap malzeme yüzeylerine uygulanması ile azalmalar tespit edilmiştir (taş verniği: %5.16, yat vernik: %2.67 ve yarı örtücü vernik: %8.00). L^* testinde ölçülmüş olan en yüksek sonuç kontrol (vernik uygulaması yapılmamış) deney örneğinde (80.26) belirlenirken,

bunu küçüğe doğru yat verniği (78.12), taş verniği (76.12) ve yarı örtücü verniği (73.84) izlemiştir (Tablo 4 ve Şekil 2).

Tablo 4. Renk parametrelerine [b^* (sarı renk tonu), h° (ton açısı), L^* (ışıklılık), a^* (kırmızı renk tonu) ve C^* (kroma)] ait ölçüm sonuçları

Test	Vernik Türü	Ortalama	Değişim Oranı (%)	Homojenlik Grubu	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	Varyasyon Katsayısı
L^*	Kontrol	80.26	-	A*	0.31	79.60	80.66	0.39
	Taş verniği	76.12	↓5.16	C	0.37	75.20	76.46	0.48
	Yat verniği	78.12	↓2.67	B	0.55	77.35	78.87	0.71
	Yarı örtücü	73.84	↓8.00	D**	0.36	73.39	74.28	0.49
a^*	Kontrol	4.43	-	D**	0.17	4.08	4.74	3.93
	Taş verniği	6.99	↑57.79	B	0.08	6.84	7.13	1.16
	Yat verniği	5.83	↑31.60	C	0.26	5.42	6.28	4.38
	Yarı örtücü	7.72	↑74.27	A*	0.15	7.47	7.89	1.98
b^*	Kontrol	17.44	-	C**	0.14	17.09	17.60	0.82
	Taş verniği	22.56	↑29.36	B	0.22	22.25	22.87	0.98
	Yat verniği	22.43	↑28.61	B	0.44	21.74	23.10	1.95
	Yarı örtücü	28.48	↑63.30	A*	0.20	28.24	28.72	0.69
C^*	Kontrol	17.99	-	D**	0.15	17.65	18.15	0.86
	Taş verniği	23.62	↑31.30	B	0.23	23.29	23.96	0.96
	Yat verniği	23.17	↑28.79	C	0.48	22.47	23.94	2.06
	Yarı örtücü	29.53	↑64.15	A*	0.24	29.22	29.78	0.80
h°	Kontrol	75.75	-	A*	0.52	74.87	76.76	0.69
	Taş verniği	72.78	↓3.92	D**	0.14	72.63	73.03	0.20
	Yat verniği	75.42	↓0.44	B	0.44	74.78	76.14	0.58
	Yarı örtücü	74.82	↓1.23	C	0.20	74.64	75.18	0.26

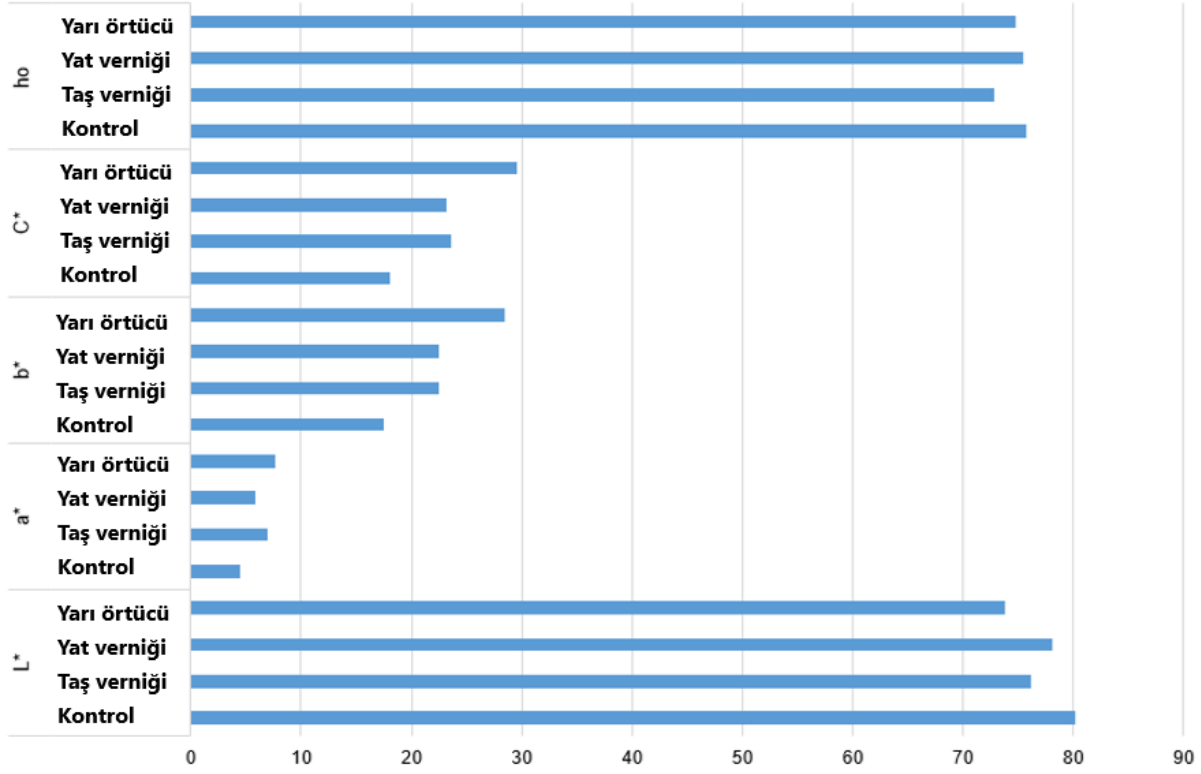
Gruplara ait alınan her renk parametresi için ölçüm sayısı 10 olmaktadır (toplam 200 adet ölçüm)
Homojenlik Grubu sütunu için *: en yüksek değeri ve **: en düşük değeri göstermektedir

a^* parametresinde bütün vernik türlerinin ahşap malzeme yüzeylerine uygulanması ile artışlar tespit edilmiştir (taş vernik: %57.79, yat vernik: %31.60 ve yarı örtücü vernik: %74.27). a^* değerinde en düşük sonuç kontrol deney örneklerinde (4.43) tespit edilirken, bunu yükseğe doğru yat verniği (5.83), taş verniği (6.99) ve yarı örtücü vernik (7.72) takip etmiştir (Tablo 4 ve Şekil 2).

b^* değerinde ölçülmüş olan en düşük sonuç kontrol deney örneklerinde (17.44) ait grupta belirlenirken, bunu yükseğe doğru yat verniği (22.43), taş verniği (22.56) ve yarı örtücü vernik (28.48) izlemiştir. Çalışmada kullanılan 3 farklı vernik türlerinin ahşap malzeme yüzeylerine verniklenmesi ile b^* parametresinde artışlar gözlemlenmiştir (taş vernik: %29.36, yat vernik: %28.61 ve yarı örtücü vernik: %63.30) (Tablo 4 ve Şekil 2).

C^* parametresinde bütün vernik türlerinin ahşap malzeme yüzeylerine uygulanması ile artışlar belirlenmiştir (taş vernik: %31.30, yat vernik: %28.79 ve yarı örtücü vernik: %64.15). C^* testinde belirlenmiş olan en düşük sonuç kontrol deney örneklerine (17.99) ait grupta bulunurken, bunu yükseğe doğru yat verniği (23.17), taş verniği (23.62) ve yarı örtücü vernik (29.53) takip etmiştir (Tablo 4 ve Şekil 2).

h° parametresinde bütün vernik türlerinin ahşap malzeme yüzeylerine uygulanması ile azalmalar elde edilmiştir (taş vernik: %3.92, yat vernik: %0.44 ve yarı örtücü vernik: %1.23). h° değerleri için tespit edilmiş olan en yüksek sonuç kontrol (vernik uygulaması yapılmamış) deney örneğinde (80.26) belirlenirken, bunu küçüğe doğru yat verniği (75.42), yarı örtücü verniği (74.82) ve taş verniği (72.58) takip etmiştir (Tablo 4 ve Şekil 2).



Şekil 2. Renk parametrelerine [b^* (sarı renk tonu), h° (ton açısı), L^* (ışıklılık), a^* (kırmızı renk tonu) ve C^* (kroma)] ilişkin varyans analizi sonuçlarının grafiksel gösterimi

Vernik işlemi görmüş ve görmemiş deney örnekleri kullanılarak renk formülleri yardımıyla hesaplanmış olan toplam renk farklılıklarına [ΔL^* , ΔH^* , Δa^* , Δb^* , ΔC^* ve ΔE^*] ait sonuçlar Tablo 5'te gösterilmiştir.

ΔH^* değerleri sadece taş verniğinde hesaplanabilmiş olup, 1.05 olarak elde edilmiştir. Renk değiştirme kriterleri (DIN 5033, 1979) kriterleri açısından yat verniği “çok belirgin (3.00 ila 6.00)”, taş verniği “güçlü (6.00 ila 12.00)” ve yarı örtücü vernik ise “çok güçlü (> 12.00)” kriterlerine denk geldikleri belirlenmiştir (Tablo 5).

ΔE^* değerleri yat verniği için 5.61, taş verniği için 7.06 ve yarı örtücü vernik için 13.20 olarak tespit edilmiştir. Bütün vernik türlerinde ΔL^* değerleri negatif (referanstan daha koyu) olarak bulunurken, Δa^* (referanstan daha kırmızı), Δb^* (referanstan daha sarı) ve ΔC^* (referanstan daha net, daha parlak) değerleri pozitif olarak bulunmuştur. En yüksek Δa^* , Δb^* , ΔC^* ve ΔE^* değerleri yarı örtücü vernik uygulaması ile elde edilmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Toplam renk farklılıklarına ait sonuçlar [ΔL^* , ΔH^* , Δa^* , Δb^* , ΔC^* ve ΔE^*]

Vernik Türü	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE^*	Renk Değiştirme Kriterleri (DIN 5033, 1979)
Yat verniği	-2.14	1.41	4.99	5.18	-	5.61	Çok belirgin (3.00 ila 6.00)
Taş verniği	-4.14	2.56	5.12	5.62	1.05	7.06	Güçlü (6.00 ila 12.00)
Yarı örtücü	-6.43	3.30	11.05	11.54	-	13.20	Çok güçlü (> 12.00)

Her vernik türü farklı kimyasal bileşenler içermektedir. Bu bileşenler, ahşabın rengini ve dokusunu etkileyebilir, buna ek olarak, farklı renk parametrelerine ait sonuçlar yaratabilir. Bu bulgular, vernik türlerinin göknar odunu üzerindeki farklı etkilerini açıkça ortaya koymaktadır.

Literatürde farklı vernik türleri üzerine yapılan çalışmalarda da farklı sonuçların elde edildikleri rapor edilmiştir (Ayata vd., 2024a,b; Ulay, 2018; Ayata ve Bal, 2024; Çamlıbel ve Ayata, 2024).

4. Sonuçlar

C^* , b^* ve a^* parametrelerinde artışlar görülürken, L^* ve h^0 değerlerinde azalışlar elde edilmiştir. Bütün vernik türlerinde Δa^* , Δb^* ve ΔC^* değerleri ise pozitif olarak belirlenirken, L^* değerleri negatif olarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan vernikler ahşap malzemenin rengini değiştirmiştir.

Çalışmada kullanılan verniklerin farklı bileşimlere sahip olması nedeniyle ahşap yüzeyinde oluşturduğu renk değişimlerinin vernik türüne bağlı olarak çeşitlilik gösterdiği gözlemlenmiştir. ΔE^* değerlerinin artış göstermesi, vernik uygulamalarının göknar odununda belirgin bir toplam renk farkı oluşturduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, elde dilen verniklenmiş deney örnekleri üzerinde farklı yaşlandırma (yapay veya doğal, tuzlu sis korozyon, otoklav, vb.) testlerinin yapılması önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

ASTM D 2244-3, (2007). Standard practice for calculation or color tolerances and color, differences from instrumentally measured color coordinates, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D 3023-98, (2017). Standard practice for determination of resistance of factory-applied coatings on wood products to stains and reagents. ASTM International.

Ayata, Ü. & Bal, B.C. (2024). İsveç çamı (*Pinus contorta*) ahşabında bazı vernik türlerinin uygulanması, *Avrasya 10. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 2-5 Mayıs 2024, Tiflis, Gürcistan, 106-113.

Ayata, Ü., Bilginer, E.H., Çamlıbel, O. & Ayata, A. (2024a). Sipo (*Entandrophragma utile*) ve maun (*Swietenia mahagoni* L.) odunlarında yat verniği uygulamasının renk değişikliği üzerine etkisinin araştırılması. *Technological Applied Sciences*, 19 (2), 16-22. DOI: 10.12739/NWSA.2024.19.2.2A0197.

Ayata, Ü., Bilginer, E.H., Çamlıbel, O. & Kaplan, Ş. (2024b). Yalancı akasya (*Robinia pseudoacacia* L.) ahşabı yüzeylerine uygulanmış solvent bazlı yat verniği katmanlarında bazı yüzey özellikleri üzerine kat sayısının etkileri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1), 41-49.

Bal, B.C., Ayata, Ü., Çavuş, V. & Efe, F.T. (2018). Dişbudak, doğu kayını, göknar ve Avrupa melezi ağaç türlerinde çivi tutma direncinin belirlenmesi, 5. *Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi*, 02-03 Kasım, Antalya, Türkiye, 1 (1), 397-406.

Bekhta, P., Krystofiak, T., Lis, B. & Bekhta, N. (2022). The impact of sanding and thermal compression of wood, varnish type and artificial aging in indoor conditions on the varnished surface color. *Forests*, 13 (2), 300. DOI: 10.3390/f13020300.

Bercu, R., Broasca, L. & Popoviciu, R. (2010). Comparative anatomical study of some gymnospermae species leaves. *Botanica Serbica*, 34 (1), 21-28.

Çalışımşek, Ü. (2019). Tanalith-E ile emprenye edilen bazı ağaç malzemelerin yanma özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE.

Çamlıbel, O. & Ayata, Ü. (2024). Keranji, niové, rubber, keruing ve berangan odunlarında solvent bazlı akrilik reçine esaslı mat verniğin uygulanması ve renk parametrelerinin karşılaştırılması, *Latin Amerika 8. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, 1-5 Mayıs 2024, Havana, Küba, 756-763.

- Çavuş, V., Sahin, S., Esteves, B., & Ayata, U. (2019). Determination of thermal conductivity properties in some wood species obtained from Turkey. *Bioresources*, 14 (3), 6709-6715. DOI: 10.15376/biores.14.3.6709-6715.
- Cheung, T.L.V. (2016). Uniform Color Spaces, Chen, J., Cranton, W., and Fihn, M., (2016). Handbook of visual display technology, Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- De Hernandez, R.E. & Cool, J. (2008). Evaluation of three surfacing methods on paper birch wood relation to water and solvent borne coatings performance. *Wood and Fiber Science*, 40 (3), 459-469.
- DIN 5033, (1979). Deutsche Normen, Farbmessung. Normenausschuß Farbe (FNF) im DIN Deutsches Institut für Normung eV, Beuth, Berlin März.
- Gündüz, G., Niemi, P. & Aydemir, D. (2008). Specific gravity and equilibrium of moisture content changes in heat treated fir (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmülleriana* Mattf.) wood. *Drying Technology*, 26 (9), 1135-1139. DOI: 10.1080/07373930802266207.
- Hammond, J.J., Donnelly, E.T., Harrod, W.F., Rayner, N.A. & Özden, F. (1969). Ağaç işleri teknolojisi, Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, Editör: İrfan Zorlu, Ajans Türk Matbaacılık Sanayi, 554 sayfa.
- Hermida de Paula, M., Gonçalez, J.C., Ananías, R.A. & Janin, G. (2023). Effect of heat treatment on physical, mechanical and chemical properties of angelim wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 25, 1-12. DOI: 10.4067/s0718-221x2023000100410.
- Homan, W.J. & Jorissen, A.J. (2004). Wood modification developments. *Heron*, 49 (4), 361-385.
- ISO 554, (1976). Standard atmospheres for conditioning and/or testing, International Standardization Organization, Geneva, Switzerland.
- Lange, D.R. (1999). Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e. DR Lange: New York, NY, USA.
- Mihăilă, A., Lisa, C., Mămăligă, I. & Lisa, G. (2021). Evaluation of the drying process of some varnishes and paints applied on fir wood. *Buletinul Institutului Politehnic, Gheorghe Asachi*, 67 (71), 2:63-72.
- Özdemir, T., Hızıroglu, S. & Kocapınar, M. (2015). Adhesion strength of cellulosic varnish coated wood species as function of their surface roughness. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015 (1), 525496. DOI: 10.1155/2015/525496.
- Özkan, O.E. (2013). Isıl işleme muamele edilmiş göknar odununun biyolojik, mekanik, fiziksel ve dış ortam dayanımı özellikleri, Kastamonu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu, Türkiye.
- Sousa, F.R.D.R. (2008). Estudo do envernizamento de madeiras exóticas com vernizes aquosos, Master's Thesis, Universidade do Porto, PORTUGAL.
- Şarıvar, N. & Zorlu, İ. (1980). Ağaç işleri gereç bilgisi temel ders kitabı, Mesleki ve Teknik Öğretim Kitapları, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, Etüd ve Programlama Dairesi Yayınları No: 43, 472 sayfa.
- Tank, T. (1964). Türkiye göknar türlerinin kimyasal bileşimleri ve selüloz endüstrisinde değerlendirilme imkânları. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 14 (3), 71-123.
- Temiz, S. (2006). Kraft-NaBH₄ yöntemiyle Uludağ göknarı (*Abies bornmuelleriana* Mattf.) ve kızılçam (*Pinus Brutia* Ten.) odunlarından kâğıt hamuru üretim koşullarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Düzce, Türkiye.

Ulay, G. (2018). Yat ve tekne mobilyalarında kullanılan bazı ağaç türlerine uygulanan termal modifikasyon ve UV yaşlandırma işlemlerinin vernik katman performansları üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.

Araştırma Makalesi / Research Article

Design and Performance Optimization of Double-Pipe Type Heat Exchangers Based on CFD and Economic Analyses-A Numerical Study

Abdullah Sadık TAZEGÜL¹, Mesut BİTKİN¹, Ayşe Nur ÖZTEKİN^{2*}, Anıl KORKMAZ², Ömer Sinan ŞAHİN³, Osman BABAYİĞİT⁴

¹Bita Energy and Software Technology Company, İstanbul, TÜRKİYE

²Tüfekçioğulları Machine Company R&D Center, Karaman, TÜRKİYE

³Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Mechanical Engineering, Konya, TÜRKİYE

⁴Karamanoğlu Mehmet Bey University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, Karaman, TÜRKİYE

sadik.tazegul@bitaenergy.com, mesut.bitkin@bitaenergy.com, aysenur.o@nefamak.com.tr,
anilkorkmaz1508@gmail.com, ossahin@ktun.edu.tr, obyigit@gmail.com

Received/Geliş Tarihi: 01.10.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 30.11.2024

Abstract: In this study, Double-Pipe Type Heat Exchangers design and performance optimization were examined. Dimensionless parameters were suggested for the heat exchanger design and the experimental design was made using these parameters through response surface methodology. Numerical models were created using the obtained design of experiments parameters and the models were solved using computational fluid dynamics software. Quadratic models have been proposed to estimate the outlet temperature and pressure drop values of Double-Pipe Type Heat Exchangers using various design parameters. The effect of each dimensionless design parameter on outlet temperature and pressure drop was evaluated and an optimum design for maximum heat transfer with minimum pressure loss is presented.

Keywords: Computational fluid Dynamics, Double pipe, Heat exchanger, Response-surface optimization, Statistical optimization

Çift Borulu Tip Eşanjörlerin Tasarım ve Performans Optimizasyonu CFD ve Ekonomik Analizlere Dayalı Sayısal Bir Çalışma

Özet: Bu çalışmada çift boru tip ısı eşanjörü tasarımı için boyutsuz parametreler önerilmiş ve bu parametreler kullanılarak yanıt yüzeyi metodolojisi ile deneysel tasarım yapılmıştır. Elde edilen deney tasarım parametreleri kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuş ve modeller Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Çeşitli tasarım parametreleri kullanılarak Çift Borulu Tip Isı Değiştiricilerin çıkış sıcaklığı ve basınç düşüşü değerlerini tahmin etmek için kuadratik modeller önerilmiştir. Her bir boyutsuz tasarım parametresinin çıkış sıcaklığı ve basınç düşüşü üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve minimum basınç kaybı ile maksimum ısı transferi için optimum bir tasarım sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Çift boru, Isı eşanjörü, Tepki yüzeyi optimizasyonu, İstatistiksel optimizasyon

1. Introduction

Energy saving is of great importance today due to the increasing energy need and limited energy resources. In particular, a production bakery that produces snacks can efficiently use 35% of the energy it consumes (Mukherjee et al., 2019). It may be possible to achieve energy efficiency by replacing existing machines with new machines with lower energy consumption or by using heat exchangers in existing machines. The first suggestion presented, purchasing new machinery with lower energy consumption, means high investment costs. By incorporating a heat exchanger into existing machines, it is possible to have much lower investment costs or to recover a large portion of the unused and wasted energy (Cengel and Ghajar, 2015).

It is known that there are many types of heat exchangers and these types are classified in many different ways (Cengel and Ghajar, 2015; Omidi et al., 2017). The performance of heat exchangers is measured by heat transfer efficiency. The performance of heat exchangers depends on the exchanger design, fluid properties and operating conditions. Heat transfer improvement methods are divided into three main groups: active method, passive method and combined method. Briefly, the active method aims to increase the heat transfer rate by using an external force (piston pumps, flow- disturbing magnetic, etc.) (Omidi et al., 2017). Briefly, the passive method aims to increase the heat transfer rate by using different geometric designs or flow-disturbing geometries (different flow surfaces, geometric turbulators, different material types, different nanofluids, etc.). In short, the combined method aims to increase the heat transfer rate by using both active and passive methods together (Omidi et al., 2017). Recent studies on heat exchangers seem to focus on increasing heat transfer efficiency and economic comparisons (Du et al., 2022; Ya et al., 2015). In this context, the easiest to apply heat exchangers are the intertwined tubes or also known as double tubes (Omidi et al., 2017). Double-pipe heat exchangers are used in the food industry, oil industry, chemical industry and gas industries. In double-pipe heat exchangers, cold and hot fluids generally transfer heat by moving parallel to each other, in the same direction or in opposite directions (Ya et al., 2015).

Söylemez (2004) made optimization based on both experimental and numerical results, depending on the geometry and dimensions of some double-pipe heat exchangers available on the market. It has determined the optimization goal to achieve maximum waste heat recovery in the most economical way with the most suitable pipe diameters and lengths. The dimensions obtained as a result of optimization were checked by comparing some data in the catalogs of heat exchanger manufacturers. As a result, it has been reported that the optimization formulation found will be more useful for double-pipe heat exchanger designers and manufacturers (Söylemez, 2004). Sunu et al. (2016.) changed the volumetric flow rate of cold and hot water in order to see the effect of the corrugations on the temperature in the rectangular corrugated double-pipe heat exchanger. They found that the corrugated heat exchanger reduced the temperature difference between cold water and hot water by 37.9% compared to the corrugated one. At the same time, they stated that the grooves improve the inner tube thermal surface and reduce the overall weight of the heat exchanger (Sunu et al., 2016). Venkatesh et al. (2023.) aimed to make an efficient heat exchanger with increased thermal efficiency by collecting the data used in optimization studies on double-pipe counter-flow heat exchangers. They used the Taguchi method to find the parameter that most affects the thermal efficiency of the heat exchanger. They stated that using a genetic algorithm in the optimization phase will give the most efficient results (Venkatesh et al., 2023). Taghilou et al. (2014) planned to minimize entropy formation in heat exchangers of different lengths by using Brent's optimization algorithm in a double-pipe cylindrical fin heat exchanger. They calculated the optimum Reynolds Number that provides the least entropy formation. Based on these, they calculated the optimum length for each heat exchanger. As a result, they stated that by reducing the Reynolds Number, the number of cylindrical vanes used was also reduced, which allowed the pump power to decrease (Taghilou et al., 2014). Moloodpoor et al. (2021) in their study, an interactive search algorithm was integrated with the developed fly-back method for thermo-economic optimization of the double-pipe heat exchanger and they used the compound ISA-IFB method. The main goal was to achieve cost minimization without reducing the thermal performance of the double-pipe heat exchanger too much. The results obtained using the ISA-IFB method were compared with the results obtained by the selected methods given in the literature. They found that the proposed ISA-IFB method provides a numerical approach for solving both constrained and unconstrained optimization problems. They stated that this method can start from a random point in the search space, regardless of the initial conditions of the process. Therefore, they stated that it would not require the user to have any prior knowledge about the optimization workflow (Moloodpoor et al., 2021).

In his study, Sridharan (2022) utilized gray relational analysis (GRA) to optimize the output parameters of a counterflow double-pipe heat exchanger, specifically the cold water outlet temperature (t_2), hot water outlet temperature (T_2), and efficiency (ϵ). Through both experimental work and GRA analysis, the optimal input parameters for the heat exchanger were determined, along with the corresponding performance values (Sridharan, 2022). Dalkılıç et al. (2021) investigated the impact of various geometric modifications and the use of different nanofluids on the heat transfer, cost reduction, and extended service life of double-pipe heat exchangers, both with and without plates. Their findings revealed that nanofluids with high thermal conductivity and low-cost particles yielded the lowest total costs. For instance, mixtures containing graphene or carbon nanotubes (CNTs) as nanoparticles demonstrated the best heat transfer properties while remaining cost-effective. Conversely, Ti and TiO₂ nanoparticles showed the worst performance due to their lower thermal conductivity and higher costs. The study also compared plated and plateless designs, finding that the plated design exhibited slightly higher contamination and a lower cleaning factor. In the plateless design, the cleanliness factor did not significantly affect the overall costs. However, in the plated design, contamination led to increased costs across all categories. The authors pointed out that fouling, which increases both pressure drop and cost, negatively impacts heat transfer. Furthermore, they observed that the plated design, which had fewer pipes, resulted in lower pressure compared to the plateless design. Based on these findings, they concluded that the plated designs were more cost-effective (Dalkılıç et al., 2021).

Esfandyari et al. (2023) conducted an optimization study on a double-pipe heat exchanger using Artificial Neural Networks (ANNs), Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), and Particle Swarm Optimization (PSO) methods to optimize the heat transfer rate, Nusselt number, and number of transfer units (NTU). They validated their results by comparing them with experimental data and concluded that the ANN-PSO model slightly outperformed the ANFIS-PSO model (Esfandyari et al., 2023). Dastmalchi et al. (2017) performed an optimization study on a double-pipe heat exchanger with three micro-finned tubes, each having different inner diameters and Reynolds numbers. They proposed new correlations for determining the optimum micro-fin height and helix angle, which are dependent on the inner tube diameters and Reynolds number. The PSO algorithm was used to optimize the micro-finned tubes under turbulent fluid flow conditions, aiming to maximize heat transfer while minimizing pressure drop. Their findings showed that the optimum micro-fin height increased with an increase in the Reynolds number. However, they observed an opposite trend for the optimum helix angle (Dastmalchi et al., 2017).

Han et al. (2015) aimed to achieve an optimal geometric design for double-pipe heat exchangers with internal corrugated pipes through a multi-objective optimization approach using Response Surface Methodology (RSM). They integrated a three-dimensional heat transfer and flow model and applied various optimization models. The results from each model were compared by evaluating their respective accuracy percentages (Han et al., 2015). Colaço et al. (2022) focused on determining the efficiency parameters of double-pipe heat exchangers and sought to achieve an optimal geometric design with minimal pressure losses and improved heat transfer efficiency, represented by the thermal performance index (TPI), as well as energy savings. The team employed a multi-objective non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-RL) to maximize both the TPI and Nusselt number while minimizing the Fanning friction factor. Their findings showed that in a split-pipe double-pipe heat exchanger, the Nusselt number increased by approximately 7.93-8.25 times, while the friction factor increased by 6.5-9.75 times compared to a straight-tube heat exchanger. Based on these results, they concluded that heat transfer was significantly enhanced (Colaço et al., 2022). Zamani et al. (2023) conducted a study on a double-pipe heat exchanger using phase change materials (PCMs) for energy storage. The analysis was carried out using Ansys Fluent CFD software. Their optimization process utilized a genetic algorithm to maximize the energy stored or minimize the exergy destruction within

the heat exchanger. The system used 70°C hot water as the working fluid. Following the optimization, they observed that the hot water returned at a temperature of 8°C. The results indicated that the stored energy was a function of adiabatic time and reached a peak of 25.312 J during an adiabatic time interval of 2150 seconds (over 1 hour) (Zamani et al., 2023).

Kumar et al. (2018) used a passive technique to examine the effect of thermal parameters on the improvement of heat transfer in a double-pipe heat exchanger. The input parameters were bandwidth, band gap and mass flow rate, and the output variables were Nusselt number (Nu) and pressure difference (ΔP). They accepted. The effects of input parameters, Nu (increasing the Nusselt number) and ΔP (decreasing the pressure difference) were investigated by ANOVA analysis, and Response Surface methodology (RSM) was used to provide optimum conditions. They found that for Nu, the mass flow rate was the main factor affecting the bandgap, and similarly, for ΔP , the mass flow rate and the bandwidth were the main factor affecting the bandgap. As a result of RSM, they found that the combination of a mass flow rate of 0.037 kg/s, a band gap of 20 mm and a band width of 3.8 mm gave optimum values of Nu 48.4 and ΔP 895.2 Pa (Kumar et al., 2018). Kola et al. (2021) used the Response Surface Method in their study to maximize the heat transfer of cut twisted tapes of varying cross-sections placed in a double-pipe heat exchanger and to find optimum values to minimize the friction factor. The input parameters were taken as mass flow rate, cutting radius and cutting angle, and the effect of the parameters on the response variables was analyzed using ANOVA. The results showed optimum values giving higher HTC and less friction factor at mass flow rate of 0.05 kg/s, cutting radius of 5.464 mm and cutting angle of 45° (Kola et al., 2021). Arjmandi et al. (2020) numerically examined the effect of band-shaped twisted vortex generators and nanofluid (Al₂O₃-H₂O) placed in a double-pipe heat exchanger on the thermal performance of the exchanger. They used the response surface method (RSM) to optimize the vortex generator geometry and twisted band turbulator geometry to provide the maximum Nusselt number and minimum friction factor. It has been observed that parameters such as the number of vortex generators (decreasing the number of blades) and the angle of the vortex generator increase Re and, as a result, increase the heat transfer efficiency. They also stated that the vortex generators positively affected the pitch ratio, Nusselt number and friction factor, resulting in five times more efficiency compared to the original version. They found the optimum result that provides the most effective thermal efficiency by applying the optimum vortex generator geometry and the spacing ratio of the vortex generator ($Pi/l = 0.18, 0.5235$ (rad) angle and $Re = 20000$) (Arimandi et al., 2020).

Majidi et al. (2018) experimentally studied the overall heat transfer coefficient (OHTC) of air in a double-pipe heat exchanger. To enhance the heat transfer rate, they attached a copper wire to the outer surface of the inner tube. In addition, they proposed a novel method to calculate the heat transfer coefficients for both the inner tube and the annular section of double-pipe helical heat exchangers. This method combines two previously established approaches with subsequent modifications, such as replacing the hydraulic diameter with the equivalent diameter. The study also examined the influence of both the hot and cold mass flow rates on the OHTC, along with the impact of the fin installed in the annular section on the heat transfer coefficient. The results demonstrated the effectiveness of the proposed correlation, showing an increase in OHTC due to the presence of the fin inside the annulus. A comparison of the theoretical results from the proposed correlation with the experimental data revealed a closer match between the two. Additionally, the study found that increasing one of the flow velocities—while maintaining constant inlet temperatures—led to a rise in the Reynolds number and a corresponding increase in the OHTC. The effects of both the mass flow velocities (hot and cold) and the temperature on the OHTC were also discussed. Finally, the analysis of the soldered wire fin revealed that its presence significantly improved the heat transfer coefficient of the annular section, leading to a higher overall heat transfer rate (Majidi et al., 2018).

El Maakoul et al. (2020) used numerical simulations to evaluate the thermo-fluid performance of double-pipe heat exchangers equipped with split longitudinal fins. The performance of configurations featuring split longitudinal fins is compared with that of traditional longitudinal fins, focusing on heat transfer capacity, pressure drop, and overall efficiency. Additionally, the impact of the fin split interval and mass flow rate on the thermo-fluid performance is examined. They found that for the same mass flow rate and pumping power, the heat transfer rate with split longitudinal fins is higher than that of conventional longitudinal fins, ranging from 31% to 48% higher. In general, the thermo-fluid performance of double-pipe heat exchangers improves with the use of split longitudinal fins, as the increase in pressure loss is compensated by the enhanced heat transfer efficiency (Maakoul et al., 2020). Poongavanam et al. (2021) conducted an analytical study on the pressure loss and thermal performance of a double-pipe heat exchanger with shot peening. The thermal performance improvement of the proposed design was 1.19 times greater than that of the previous model (Poongavanam et al., 2021). Ishaq et al. (2021) carried out a study to evaluate the thermal performance efficiency of a double-pipe heat exchanger (DPHX) with diamond-shaped fins in the annular region. Their proposed design was examined with the aim of optimizing thermal efficiency and enhancing energy conservation (Ishaq et al., 2021). Ashraf et al. (2024) conducted an innovative design featuring extended arrow fins optimized for high-performance heat transfer in a double-pipe heat exchanger. These arrow fins are integrated into a trapezoidal fin structure to reduce material usage, weight, and cost, while enhancing the energy efficiency of the double-pipe heat exchangers. The results are analyzed in terms of the friction factor (fRe), Nusselt number, and j-factor. The findings suggest that specific geometric configurations of arrow fins lead to a significant increase in the Nusselt number. For instance, an 80% fin height is recommended when the number of arrow fins ranges from 6 to 24, and a 20% fin height is suggested for 30 arrow fins, particularly when the radii ratio is small Ashraf et al. (2024).

Zhang et al. (2023) introduced novel double-pipe heat exchangers featuring different serpentine channel designs to induce chaotic advection. The hydrothermal performance of these proposed configurations is numerically analyzed under laminar flow conditions. Compared to the conventional double-pipe heat exchanger, the suggested designs show a significant improvement in heat transfer, except for the twisted in-phase and twisted out-of-phase configurations. The performance evaluation criterion and the compactness factor are used as the key metrics to compare the performance of these geometries across different Reynolds numbers. Among the designs, the enhanced C-shaped double-pipe heat exchanger outperforms the others in both performance evaluation and compactness. At a Reynolds number of 500, the performance evaluation criterion and compactness factor of the enhanced C-shaped design are 1.3–197% and 22.3–736% higher than those of the other configurations, respectively (Zhang et al., 2023).

Gandjalikhan Nassab et al. (2023) emphasized the significant role of combining the radiant gas effect with circumferential ribs in the inner tube of a double-pipe heat exchanger to improve thermal performance by recovering waste heat for air heating. They proposed that a notable performance enhancement could be achieved by increasing the heat transfer rate from the hot exhaust gas to the cold air flow, utilizing the radiative properties of the gases. This concept was demonstrated and validated through the numerical solution of the radiative transfer equation, integrated with a set of energy, momentum, and continuity conservation equations under steady-state conditions. The turbulent forced convection was modeled using the widely recognized k- ϵ model to calculate turbulent stress and heat flow. All calculations were carried out using COMSOL Multiphysics software, considering a broad range of gas radiation properties in double-pipe heat exchangers with and without ribs. The numerical results indicated that the contributions of the ribs and the gas radiation effect to improving the heat exchanger's efficiency were 21% and 45%, respectively.

Additionally, when ribs were added to the heat exchanger configuration, pressure drops of 1.76 Pa and 0.71 Pa were observed for the gas and air flows, respectively (Gandjalikhan Nassab et al., 2023). In this study, the effects of pipe diameter ratio and diameter/length ratio on heat exchanger performance in a double-pipe heat exchanger system were numerically examined. The analyzes were modeled with CFD software using incompressible air. Using the obtained results, the parameters that yield the most heat change in the constant flow condition were statistically determined and optimized. The accuracy of the regression model was questioned by re-analysis on the optimized geometry. This study will provide insights for future research on the design of heat exchangers with optimal length and diameter.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

In this study, CFD analyzes were applied on the counterflow heat exchanger geometry shown schematically in Figure 1. In the analyses, the diameter of the inner pipe was assumed to be a constant 400 mm. The diameter of the outer tube and the length of the tubes were determined according to the response surface test methodology. The created geometry was solved as a steady state in the Solidworks Flow Simulation program and the results were evaluated statistically.

For parametric analyses, inner diameter (D_i), outer diameter (D_o) and pipe length (L) are varied so that L/D_o obtain as seen in Table 1.

Table 1. Design of experiments parameters in accordance with response surface method ($D_i= 400$ mm, Inlet temperature= 30 °C)

	Min	Max
L (mm)	1208	2792
D_o (mm)	602	998
L/D_o	1.304904	4.316832
D_o/D_i	1.505	2.495

Total number of runs= 100

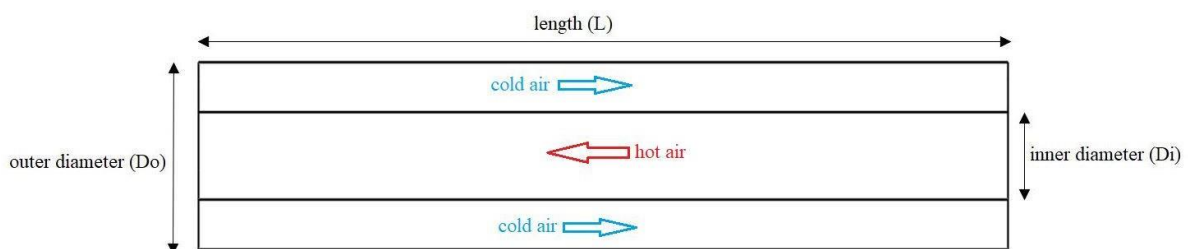


Figure 1. Topology of proposed heat exchanger and dimensions

In CFD analyses, a regression model was created by determining heat transfer efficiency and pressure loss values in heat exchangers with different geometric dimensions under constant flow rate. On the obtained model, the parameters where the lowest pressure loss and the highest heat transfer occurred for cold air flow were determined by the response surface optimization method.

The material of all designs created was determined as AISI 304 stainless steel. The mechanical properties of AISI 304 stainless steel are given as density 8000 kg/m^3 , heat conduction coefficient 16

W/m.K and specific heat 500 J/kg.K (Kola et al., 2021). In SolidWorks Flow Simulation CFD software, two designs were analyzed as internal flow analysis by having the same geometric structure (except for their internal designs) and the same initial conditions were determined. The material of all solids was determined as AISI 304 and the initial temperature of all solids was entered as 20.05 °C and the initial static pressure was entered as 101325.00 Pa. The fluid was determined as air and the initial temperature of the fluid was entered as 30 °C. Air at 185 °C is defined as the second fluid that will heat the inlet air. Allowing heat conduction in solids, the flow type was chosen exclusively laminar. The heat transfer coefficient was chosen as the external wall thermal condition, and the air heat transfer coefficient was determined as 17 W/m².K as the external effect fluid and the external effect air temperature was determined as 28 °C. In the analysis, the software was asked to automatically determine the flow type by selecting flow characteristics, turbulence and laminar for hot and cold air flow. Turbulence parameters were entered as turbulence intensity 2% and turbulence length 0.00072 m. Analyzes were solved using Navier-Stokes equations as steady state (Arimandi et al., 2020). The turbulence conservation law of homogeneous fluids followed by laminar, turbulent and transitional flows is given in the $k-\epsilon$ turbulence model with damping function realized by Lam-Bremhorst (Majidi et al., 2018). The constants in $k-\epsilon$ model are chosen as $C_\mu = 0.009$, $C_{s1} = 1.44$, $C_{s2} = 1.92$, and empirical constant in Turbulence model are chosen as $\sigma_k = 1$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $\sigma_B = 0.9$ and $C_B = 1$, for $P_B > 0$ and $C_B = 0$ for $P_B < 0$ respectively.

3. Results and Discussions

Figures 2-3 show the variation of average outlet temperature of the cold air versus dimensionless parameters L/D_o and D_o/D_i . As seen in these figures outlet temperature increases with increasing L/D_o ratio while it decreases with increasing D_o/D_i ratio. The increase of L/D_o ratio enables the fluid for heat transfer for longer durations. On the other hand, increasing D_o/D_i ratio, causes the ratio of the part of the fluid in contact with the heat transfer surface to decrease.

Figures 4-5 show the variation of pressure loss of the cold air versus dimensionless parameters L/D_o and D_o/D_i . As seen in these figures, pressure loss increases with increasing L/D_o ratio as expected. The pressure loss shows considerable variation with increasing D_o/D_i ratio. It is concluded that the increased turbulence has result in this variation.

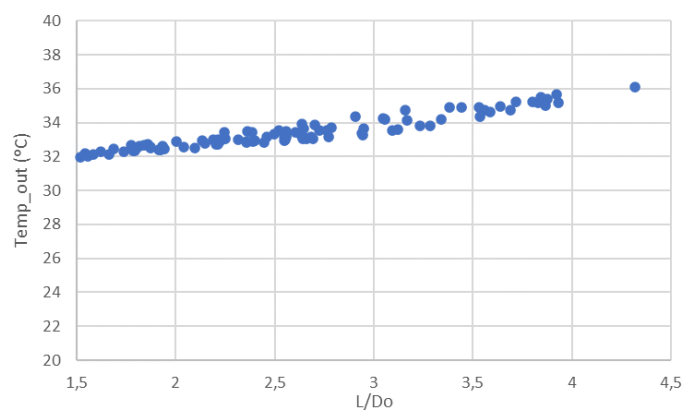


Figure 2. Variation of outlet temperature of the cold air versus L/D_o ratio (Inlet temperature=30 °C, $D_i=400$ mm)

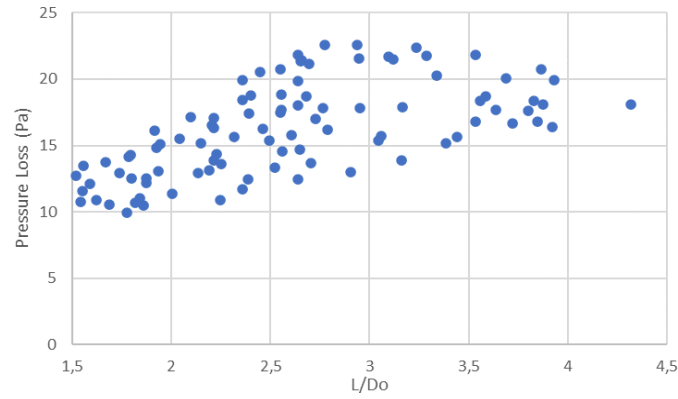


Figure 3. Variation of outlet temperature of the cold air versus D_o/D_i ratio (Inlet temperature=30°C, $D_i=400$ mm)

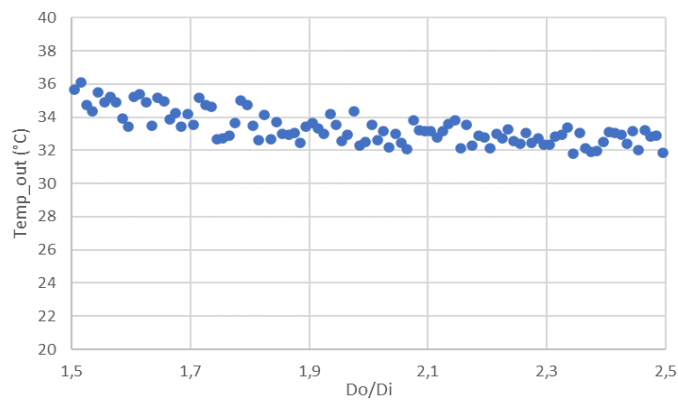


Figure 4. Variation of pressure loss of the cold air versus L/D_o ratio (Inlet temperature=30 °C, $D_i=400$ mm)

For further evaluations, quadratic models were proposed for both outlet temperatures and pressure loss as follows ;

$$T_{out} = A. P_1 + B. P_2 + C. P^2 + D. P^2 + E. P_1. P_2 \tag{1}$$

1→2

$$\Delta P = A. P_1 + B. P_2 + C. P^2 + D. P^2 + E. P_1. P_2 \tag{2}$$

1→2

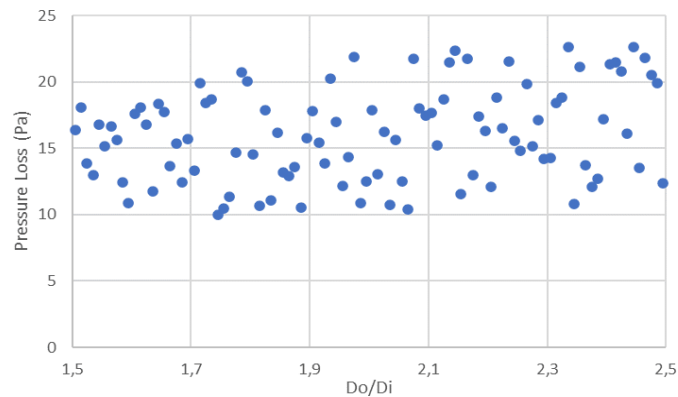


Figure 5. Variation of pressure loss of the cold air versus D_o/D_i ratio (Inlet temperature=30°C, $D_i=400$ mm)

Where P1 and P2 are L/D_o and D_o/D_i respectively. The curve fitting coefficients are presented in Table 2. As can be seen in Table 2, the correlation coefficient is satisfactory for both models. According to the results obtained, the parameters P1 and P2 have approximately similar effects in the outlet temperature prediction model. However, it is seen that the cross interaction of the parameters has a negative effect on the outlet temperature. On the other hand, in the pressure drop model, the P1 parameter acts in the direction of decrease, while the parameter P2 acts in the direction of increase. It has also been concluded that cross interactions are much more effective in this model.

Table 2. Curve fitting parameters for proposed models

	Outlet Temperature Model	Pressure loss Model
A=	14.307	-1.854
B=	15.049	1.0757
C=	-1.079	-0.0748
D=	-1.580	-0.2650
E=	-3.853	4.0462
R2=	0.8579	0.999

A heat exchanger should provide the lowest pressure loss and maximum heat transfer. In this study, when evaluating the performance of the heat exchanger, both the amount of heat transfer and the pressure loss were considered to be of equal importance and the parameters where the greatest heat transfer and the lowest pressure loss occurred were determined. According to this, $L/D_o = 2.773$ and $D_o/D_i = 2.445$ yields the most heat transfer with minimum pressure loss. By using these parameters, the outlet temperature and pressure loss is estimated with error of $0.536\text{ }^\circ\text{C}$ and 0.16 Pa . This result shows that the accuracy and reliability of proposed models are satisfactory.

5. Conclusions

This study presents a design optimization approach for Double-Pipe Type Heat Exchangers. For this aim, dimensionless parameters were proposed and determined in accordance with response surface methodology. Subsequently, CAD models were solved by using CFD.

The obtained results showed that outlet temperatures of the cold air increase with increasing L/D_o ratio while it decreases with increasing D_o/D_i ratio. It is also showed that pressure loss of the cold air increases with increasing L/D_o ratio as expected.

It is concluded that proposed quadratic models for estimation of outlet temperatures and pressure losses are satisfactory. It is also concluded that the parameters P1 and P2 have approximately similar effects in the outlet temperature prediction model while the cross interaction of the parameters has a negative effect on the outlet temperature. It was observed that the P1 parameter acts in the direction of decrease, while the parameter P2 acts in the direction of increase in the pressure drop model. It has also been concluded that cross interactions are much more effective in this model.

It is concluded that proposed models estimates the maximum temperatures with minimum pressure loss to be obtained where $L/D_o = 2.773$ and $D_o/D_i = 2.445$ with a minimum error. So, it is concluded that the proposed models are successful for further estimations and designs.

Acknowledgement

The authors would like to thank Tüfekçiogulları Machinery R&D Center and The Scientific and Technological Research Council of Türkiye under grant number 1501-3221347 for their support in the implementation part of the project.

Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest between the authors.

References

- Arjmandi, H., Amiri, P., & Pour, M. S. (2020). Geometric optimization of a double pipe heat exchanger with combined vortex generator and twisted tape: A CFD and response surface methodology (RSM) study. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18, 100514.
- Ashraf, G., Bilal, S., Ishaq, M., Saifullah, S. K., Alqahtani, A. S., & Malik, M. Y. (2024). Thermodynamic optimization in laminar and fully developed flow in double pipe heat exchanger with arrow-shaped extended surfaces: a novel design. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 103947.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Introduction and basic concepts. In *Heat and Mass Transfer Fundamental and Applications* (pp. 7-10). McGraw-Hill Education.
- Colaço, A. B., Mariani, V. C., Salem, M. R., & dos Santos Coelho, L. (2022). Maximizing the thermal performance index applying evolutionary multi-objective optimization approaches for double pipe heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118504.
- Dalkılıç, A. S., Mercan, H., Özçelik, G., & Wongwises, S. (2021). Optimization of the finned double-pipe heat exchanger using nanofluids as working fluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143, 859-878.
- Dastmalchi, M., Sheikzadeh, G. A., & Arefmanesh, A. (2017). Optimization of micro-finned tubes in double pipe heat exchangers using particle swarm algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 119, 1-9.
- Du, Y., Hu, C., Yang, C., Wang, H., & Dong, W. (2022). Size optimization of heat exchanger and thermo economic assessment for supercritical CO₂ recompression Brayton cycle applied in marine. *Energy*, 239, 122306.
- El Maakoul, A., Feddi, K., Saadeddine, S., Ben Abdellah, A., & El Metoui, M. (2020). Performance enhancement of finned annulus using surface interruptions in double-pipe heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 210, 112710.
- Esfandyari, M., Delouei, A. A., & Jalai, A. (2023). Optimization of ultrasonic-excited double-pipe heat exchanger with machine learning and PSO. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 147, 106985.
- Gandjalikhan Nassab, S. A., Ansari, A. B., & Javaran, E. J. (2023). Waste heat recovery of exhaust gas in a ribbed double-pipe heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*, 44(15), 1372-1390.
- Han, H. Z., Li, B. X., Wu, H., & Shao, W. (2015). Multi-objective shape optimization of double pipe heat exchanger with inner corrugated tube using RSM method. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 173-186.
- Ishaq, M., Ali, A., Amjad, M., Syed, K. S., & Iqbal, Z. (2021). Diamond-shaped extended fins for heat

transfer enhancement in a double-pipe heat exchanger: An innovative design. *Applied Sciences*, 11 (13), 5954.

Kola, P. V. K. V., Pisipaty, S. K., Mendu, S. S., & Ghosh, R. (2021). Optimization of performance parameters of a double pipe heat exchanger with cut twisted tapes using CFD and RSM. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 163, 108362.

Kumar, S., & Dinesha, P. (2018). Optimization of thermal parameters in a double pipe heat exchanger with a twisted tape using response surface methodology. *Soft Computing*, 22, 6261-6270.

Majidi, D., Alighardashi, H., & Farhadi, F. (2018). Experimental studies of heat transfer of air in a double-pipe helical heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 133, 276-282.

Mukherjee, S., Asthana, A., Howarth, M., Mcneill, R., & Frisby, B. (2019). Achieving operational excellence for industrial baking ovens. *Energy Procedia*, 161, 395-402.

Moloodpoor, M., Mortazavi, A., & Özbalta, N. (2021). Thermo-economic optimization of double- pipe heat exchanger using a compound swarm intelligence. *Heat Transfer Research*, 52(6).

Omidi, M., Farhadi, M., & Jafari, M. (2017). A comprehensive review on double pipe heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1075-1090.

Poongavanam, G., & Kim, S. C. (2021). Effect of shot peening on augmenting the thermo-fluid characteristic of a concentric tube water-to-air counter flow heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100887.

Söylemez, M. S. (2004). Thermoeconomical optimization of double-pipe heat exchanger for waste heat recovery. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 18(4), 559-563.

Sridharan, M. (2022). Performance optimization of counter flow double pipe heat exchanger using grey relational analysis. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 5318-5326.

Sunu, P. W., Anakottapary, D. S., & Santika, W. G. (2016). Temperature approach optimization in the double pipe heat exchanger with groove. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 58, p. 04006). EDP Sciences

Taghilou, M., Ghadimi, B., & Seyyedvalilu, M. H. (2014). Optimization of double pipe fin-pin heat exchanger using entropy generation minimization. *International Journal of Engineering*, 27(9), 1431- 1438.

Venkatesh, B., Khan, M., Alabdullah, B., Kiran, A., Babu, J. C., Bhargavi, B., & Alhayan, F. (2023). Design Optimization of Counter-Flow Double-Pipe Heat Exchanger Using Hybrid Optimization Algorithm. *Processes*, 11(6), 1674.

Ya, C., Ghajar, A., & Ma, H. (2015). *Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications*. McGraw-Hill.

Zamani, J., & Keshavarz, A. (2023). Genetic algorithm optimization for double pipe heat exchanger PCM storage system during charging and discharging processes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 146, 106904.

Zhang, Y., Hangi, M., Wang, X., & Rahbari, A. (2023). A comparative evaluation of double-pipe heat exchangers with enhanced mixing. *Applied Thermal Engineering*, 230, 120793.

Araştırma Makalesi / Research Article

Gofret Pişirme Kalıplarının Tasarım İyileştirilmesi: Termo-mekanik Yaklaşım

Ayşe Nur ÖZTEKİN^{1*}, Anıl KORKMAZ²

¹ Tüfekçioğlu Gıda Makinaları A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Karaman, TÜRKİYE
aysenur.o@nefamak.com.tr, anilkorkmaz1508@gmail.com

Received/Geliş Tarihi: 04.11.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 06.12.2024

Özet: Bu çalışmada, gıda sektöründe gofret pişirme fırınlarında kullanılan farklı geometrilere sahip üç pişirme maşasının ısıl gerilme analizleri yapılacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak her bir maşanın ısı dağılımı ve malzeme deformasyonu incelenecek, bu işlem sırasında meydana gelen ısıl gerilme etkileri karşılaştırılacaktır. Elde edilen sonuçların maşa tasarımının optimizasyonu, üretim verimliliğinin artırılması ve ürün kalitesinin iyileştirilmesi için önemli veriler sağlaması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Gofret pişirme maşası, Tasarım geliştirme, Termo-mekanik gerilme

Design Improvement of Wafer Baking Molds: A Thermo-mechanical Approach

Abstract: In this study, thermal stress analyses of three cooking molds with different geometries used in wafer baking ovens in the food sector will be conducted. Using the finite element method, the heat distribution and material deformation of each mold will be examined, and the effects of thermal stresses occurring during this process will be compared. The results obtained aim to provide important data for the optimization of mold design, enhancing production efficiency and improving product quality.

Keywords: Wafer baking die, Design enhancement, Thermo-mechanical stress

1. Giriş

Gıda endüstrisi, gelişen teknolojiler ve değişen tüketici talepleri doğrultusunda sürekli olarak yenilikçi üretim yöntemleri aramaktadır (Galanakis, 2024). Özellikle gofret üretimi, yüksek sıcaklık ve hassas kontrol gerektiren bir süreç olarak öne çıkmaktadır. Popüler bir atıştırmalık olan gofretler, özellikle çocuklar ve gençler arasında yaygın olarak tüketilen bir ürün haline gelmiştir. Bu talep, üretim sürecinin verimliliğini ve ürünün kalitesini artırma gerekliliğini de beraberinde getirmektedir (Sundara, 2012).

Gofret pişiriminde kullanılan maşaların geometrik yapısı, üretim sürecinin verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Maşaların tasarımı, ısı dağılımını, malzeme deformasyonunu ve nihayetinde ürün kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Bu işlem sırasında, malzemelerdeki sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan termal gerilmeler maşada iç gerilime yol açmaktadır. Isı uygulandığında malzeme genişler ve soğutma sırasında büzülerek maşa içinde gerilme oluşturmaktadır. Farklı maşa geometrileri ısı transfer özelliklerini etkileyerek pişirme sürecinde farklı sonuçlara yol açabilmektedir.

Termal gerilme oluşumu birkaç temel nedene dayanmaktadır. Bunlar arasında malzemenin ısıl iletkenliği, sıcaklık farklılıkları ve maşa geometrisinin etkileri yer almaktadır. Örneğin, malzemenin çeşitli bölgelerindeki sıcaklık farklılıkları gerilme dağılımının eşit olmamasına neden olabilmektedir. Ayrıca, malzemenin fiziksel özellikleri deformasyon davranışını etkileyerek aşırı gerilme oluşumuna

yol açabilmektedir. Bu nedenle, termal gerilme analizleri maşa tasarımını optimize etmek için kritik öneme sahiptir (Boley ve Weiner, 2012).

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık geometrileri ve malzeme özelliklerini değerlendirmek için etkili bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yöntem, yapıların ve malzemelerin davranışını simüle etmek için mühendislikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Termal analizde, bu teknik sıcaklık dağılımının ve ortaya çıkan gerilme değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktadır. Gıda mühendisliği bağlamında, maşa tasarımını optimize etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmak enerji tüketimini azaltabilmekte ve ürün kalitesini artırabilmektedir.

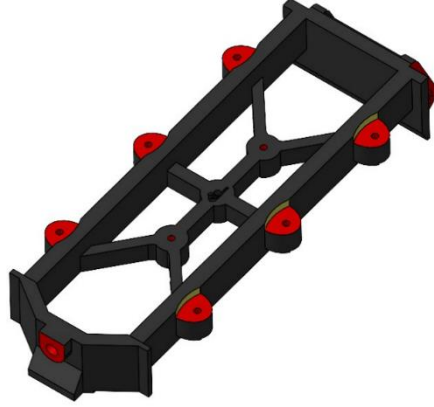
Literatürde, aynı veya farklı tasarımlara ait aynı veya farklı malzemeler kullanılarak üretilen parçaların sonlu elemanlar analizi kullanılarak karşılaştırılmasına dair literatürde birçok çalışma vardır. Steinbach vd. (2023), gofret pişirme fırınlarında kullanılan pişirme plakaları için sonlu elemanlar modeli türeterek tasarım optimizasyonu yapmışlar ve optimum pişirme plakası kalınlığını bulmuşlardır. Tazegül ve Mayda (2020), gofret fırını şaseleri üzerine gelen yükleri sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek ağırlık hafifletme çalışması gerçekleştirmiştir. Mevcut şase tasarımı üzerinde yapılan analizler sonucunda gerilmenin az olduğu fazla bölgelerde tasarım değişikliği yaparak, mevcut şasenin kütlesini %29.6 azaltmışlardır. Şahin vd. (2020), gofret pişirme fırınlarında kullanılacak farklı döküm malzemelerden (EN-GJS-400, EN-GJS-450, EN-GJL-25, EN-GJV-350) yapılmış gofret pişirme kalıplarının pişirme yüzeylerinde pişirme işlemi sırasında oluşan mekanik gerilmeleri ve pişirme yüzeylerindeki sıcaklık dağılımlarını sayısal olarak incelemişlerdir (Tazegül ve Mayda, 2020). Vijayalakshmi vd. (2012), implant üzerine oblik ve dikey yönlerde ortodontik ve ortopedik kuvvet uygulayarak kemikteki değişiklikleri analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Carzino vd. (2022), daha az ısı ile daha kısa sürede ve daha kaliteli gofret yaprağı üretmek için gofret pişirme plakalarının pişirme yüzeylerinin termal tasarımı ile ilgili sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çalışma yapmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre 17 lamelli pişirme plakasının, 3 lamelli pişirme plakasına kıyasla daha iyi bir ısı dağılımı ve 20 °C'lik bir artış sağladığı, böylelikle %10'luk toplam kazanç sağladığını gözlemlemişlerdir (Carzino vd., 2022). Sonlu elemanlar yöntemi, literatürden de görüldüğü üzere birçok mühendislik alanında uygulamaları olan kabul görmüş bir sayısal yöntemdir.

Bu çalışma, gofret pişirme fırınlarında kullanılan üç farklı maşa geometrisinin termal gerilme davranışlarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Her bir maşa için belirlenen geometrik özellikler, üretim sürecindeki sıcaklık dağılımını ve malzeme deformasyonunu etkileyerek farklı sonuçlara yol açacaktır. Çalışma sonunda elde edilen veriler, gıda mühendisliği uygulamalarında maşa tasarımı için önemli bir referans oluşturacak, sektördeki üretim süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu araştırma, gofret üretiminde maşa geometrisinin önemini vurgulamakta ve termal gerilme analizlerinin üretim verimliliği üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Geliştirilen yöntem ve bulgular, sektördeki maşa tasarım süreçlerine yeni bir bakış açısı sunacak ve gelecekteki çalışmalara zemin hazırlayacaktır. Bu bağlamda, gıda mühendisliği alanındaki yenilikçi yaklaşımların hem maliyetlerin düşürülmesi hem de ürün kalitesinin artırılması için önemli fırsatlar sunması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

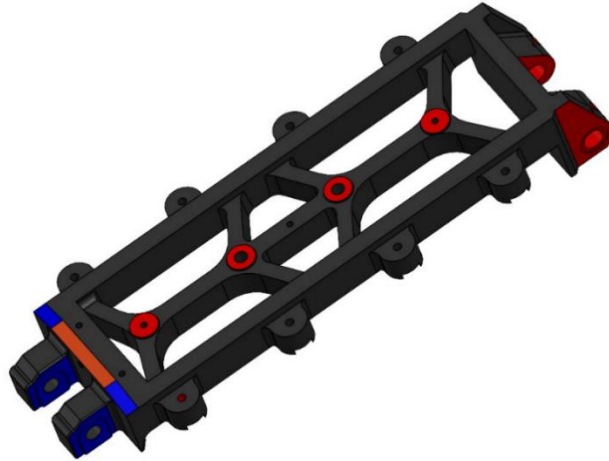
Bu çalışmada, üç farklı geometriye sahip gofret pişirme takımının maşasının mekanik yükler altındaki davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan maşaların geometri görselleri aşağıda verilmiştir (Şekil 1, Şekil 2, ve Şekil 3).



Şekil 1. Model-1 kalıp maşa tasarım geometrisi



Şekil 2. Model-2 kalıp maşa tasarım geometrisi



Şekil 3. Model-3 tip kalıp maşa tasarım geometrisi

Şekil 1, 2 ve 3'te verilen üç farklı geometrinin GGG-45 ve GGG-60 malzemeleri için ağırlıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Maşaların GGG-45 ve GGG-60 malzemeleri için kütle özellikleri

Geometri	Malzeme	Ağırlık (kg)
Model-1 kalıp maşa tasarımı	GGG-60	59.77
	GGG-45	59.77
Model-2 kalıp maşa tasarımı	GGG-60	68.86
	GGG-45	68.86
Model-3 kalıp maşa tasarımı	GGG-60	68.86
	GGG-45	68.86

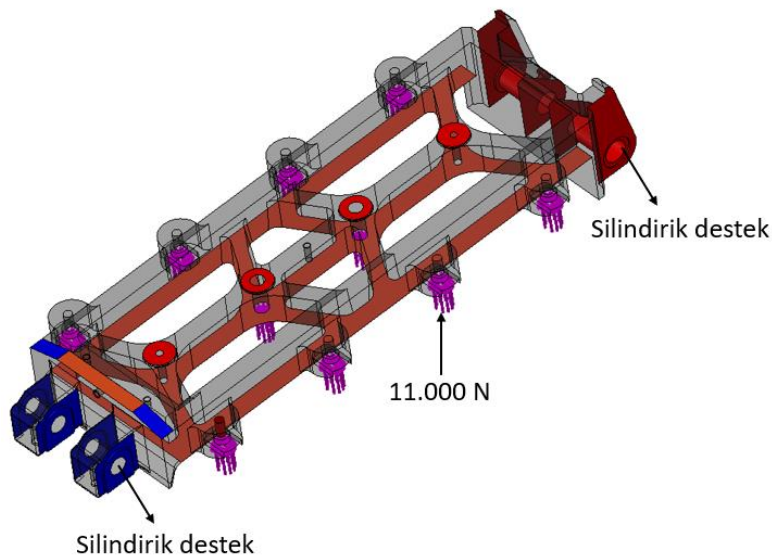
Çalışmada GGG45 VE GGG60 olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. GGG-45 ve GGG-60 malzemelerinin mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. GGG-45 ve GGG-60 malzemelerinin mekanik özellikleri

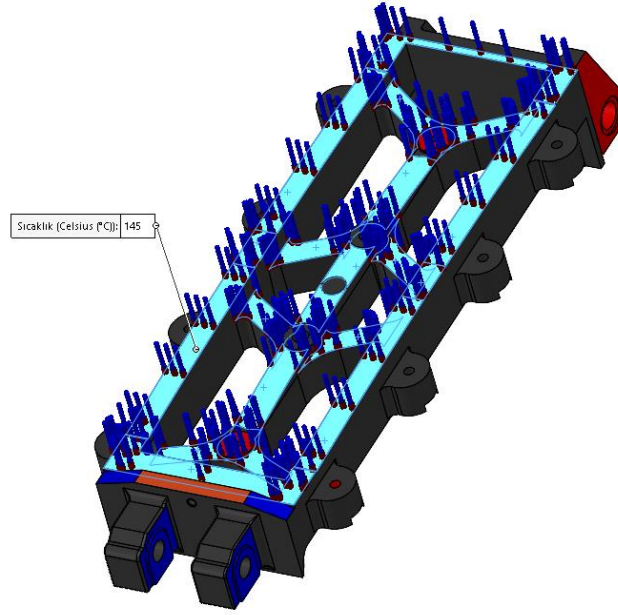
Özellik	Birim	GGG-45	GGG-60
Isı iletim katsayısı	W/(m.K)	36.2	58
Yorulma sınırı	MPa	220	662
Esneklik katsayısı	GPa	169	174
Çekme mukavemeti	MPa	450	600
Akma mukavemeti	MPa	310	370
Isıl genişleme katsayısı	$10^{-6}(1/^{\circ}\text{C})$	12.5	12
Özgül ısı	J/(kg.K)	494	460
Poisson oranı	-	0.28	0.26
Yoğunluk	kg/m ³	7250	7250

Üç farklı gofret pişirme kalıp maşasının üç boyutlu tasarımlarının sonlu elemanlar analizinde sabit bölgeleri, ankastre menteşe bölgeleri, kuvvet değerleri ve bölgeleri belirlenerek sınır koşulları tanımlanmıştır.

Gofret pişirme maşasının pişirme plakasına civata bağlantı noktalarına maşa yüzeylerinde oluşan 1.5 bar’lık maksimum basınç nedeniyle oluşan kuvvete karşılık gelen 11.000 N kuvvet uygulanmıştır. Gofret pişirme maşasına uygulanan yük ve sınır koşulları Şekil 4’te gösterilmiştir.

**Şekil 4.** Uygulanan yük ve sınır koşullarının gösterimi

Gofret pişirme maşasının dış yüzeyinin fırın içerisinde alevlere temas etmesi nedeniyle, maşanın Şekil 5’te gösterilen dış yüzeylerine 145 °C sıcaklık yükü uygulanmıştır.



Şekil 5. Sıcaklık yükü uygulanan yerin gösterimi

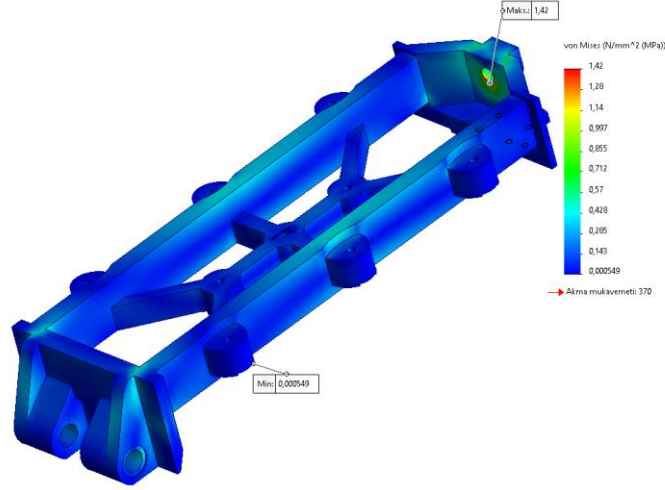
Sonlu elemanlar analiz yazılımında (SolidWorks Simulation) her bir tasarım için yapılan her analizde karışık eğrilik tabanlı mesh kullanılmıştır. Gofret pişirme kalıp iskeletinin düğüm sayısı 249.993, ağ-desen kalitesi yüksek ve toplam eleman sayısı 160.835 olacak şekilde mesh yapısı oluşturulmuştur.

3. Sonuç ve Tartışma

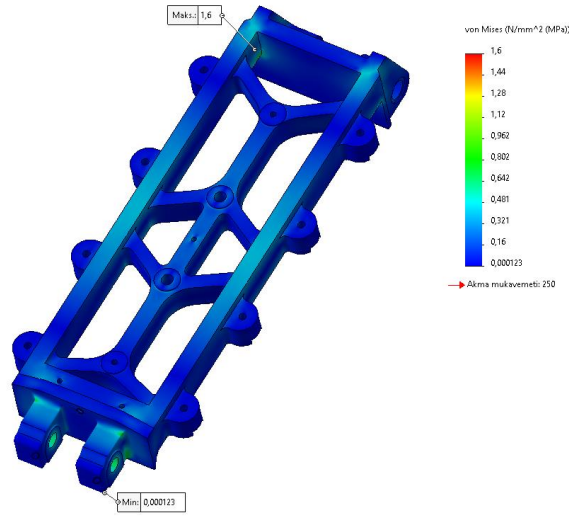
Aynı sınır koşullarına sahip üç farklı fırın kalıp maşasının yapısal analizi sonucunda maksimum eşlenik gerilme (Von-misses) ve yer değiştirme (mm) değerleri elde edilmiştir.

Model-1, Model-2 ve Model-3 maşa tasarımlarının yapısal analizi için ilk olarak sadece ağırlık dahil edilerek analiz yapılmıştır. Daha sonrasında hem ağırlık hem de gofret pişirme maşasının pişirme plakasına bağlantı noktasında oluşturduğu basınç uygulanarak analiz yenilenmiştir. Son olarak, gofret pişirme maşasının fırın içerisinde maruz kaldığı sıcaklık da dahil edilerek analiz yapılmıştır. Tüm sonuçlar kaydedilerek ağırlığın, basıncın ve sıcaklığın kalıp üzerindeki etkisi incelenmiştir.

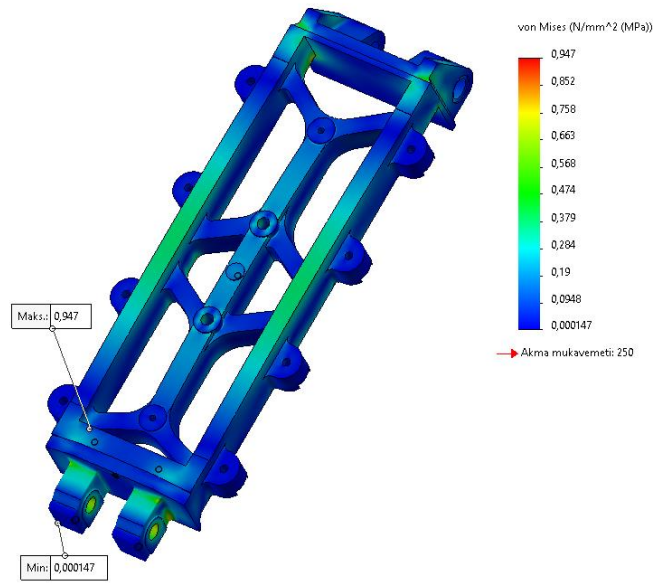
Model-1, Model-2 ve Model-3 maşa tasarımlarının sadece ağırlık dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum eşlenik gerilme değerleri GGG-60 ve GGG-45 malzemeleri için sırasıyla 1.42 MPa, 1.6 MPa ve 0.947 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8). Farklı kullanılması durumunda da eşlenik gerilme sonucunu etkilenmemiş ve her iki malzemede de eşlenik gerilme değeri aynı bulunmuştur.



Şekil 6. Model-1 maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

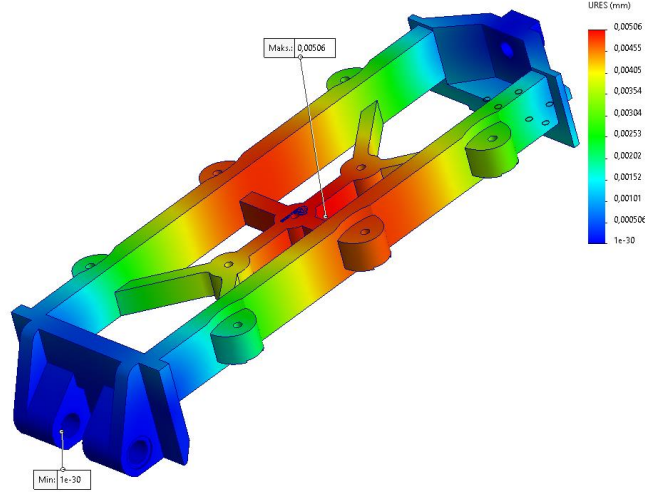


Şekil 7. Model-2 maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

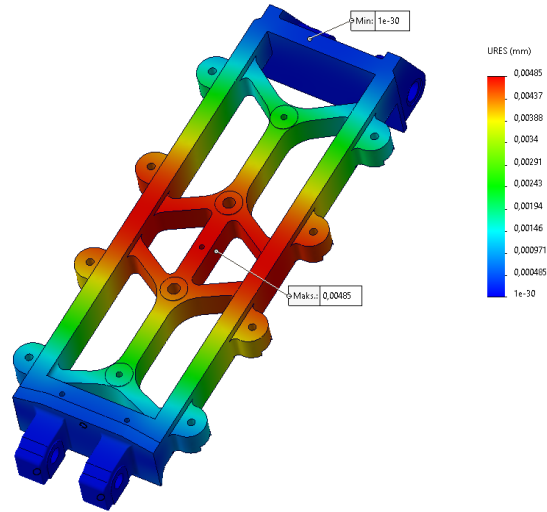


Şekil 8. Model-3 maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

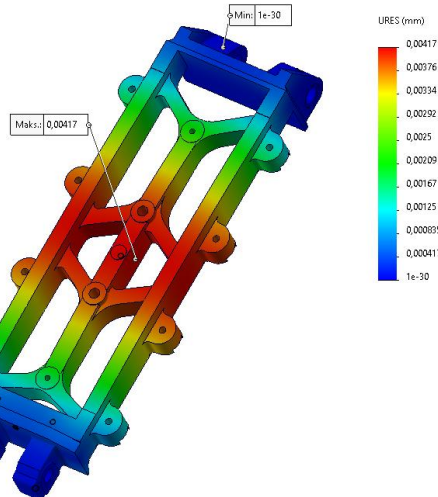
Şekil 9, 10 ve 11’de üç farklı kalıp maşa tasarımının sadece ağırlık dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda GGG-45 malzemesi için elde edilen yer değiştirme analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 9. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



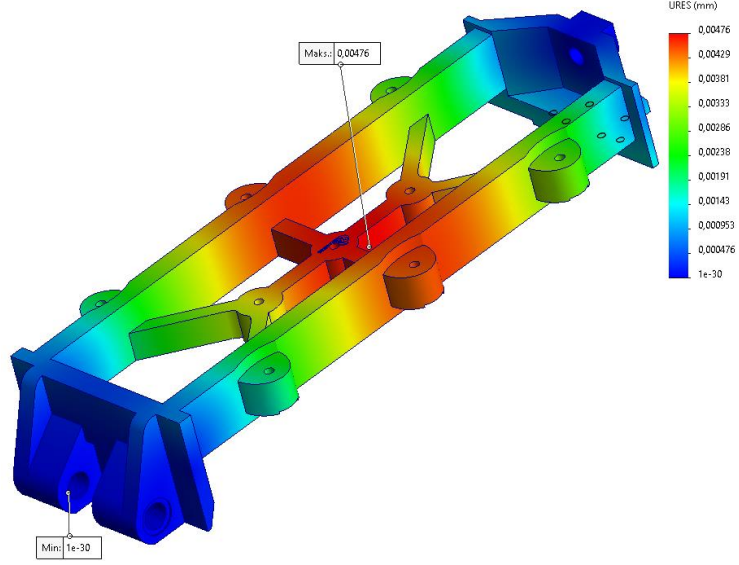
Şekil 10. Model-2 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



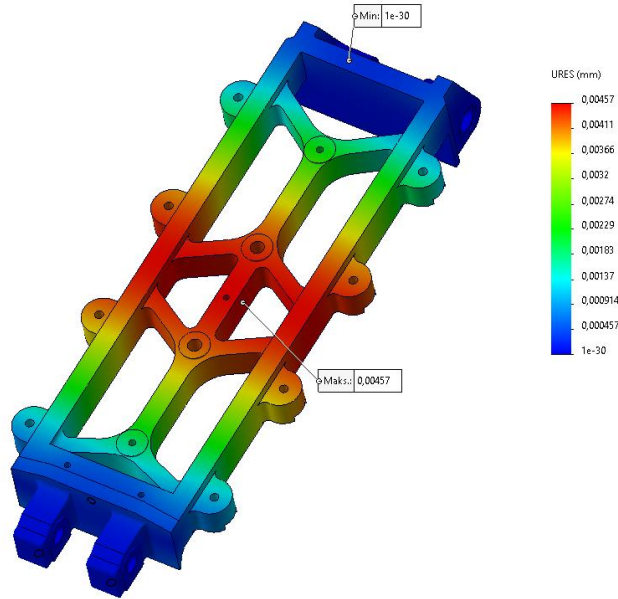
Şekil 11. Model-3 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının GGG-45 malzemesi için maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.00506 mm, 0.00485 mm ve 0.00417 mm olarak bulunmuştur (Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11).

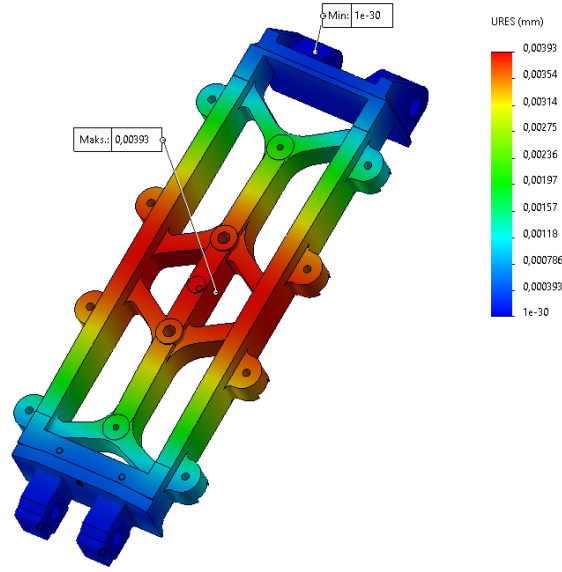
Şekil 12, 13 ve 14'te üç farklı kalıp maşa tasarımının sadece ağırlık dahil edilerek GGG-60 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme sonuçları verilmiştir.



Şekil 12. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



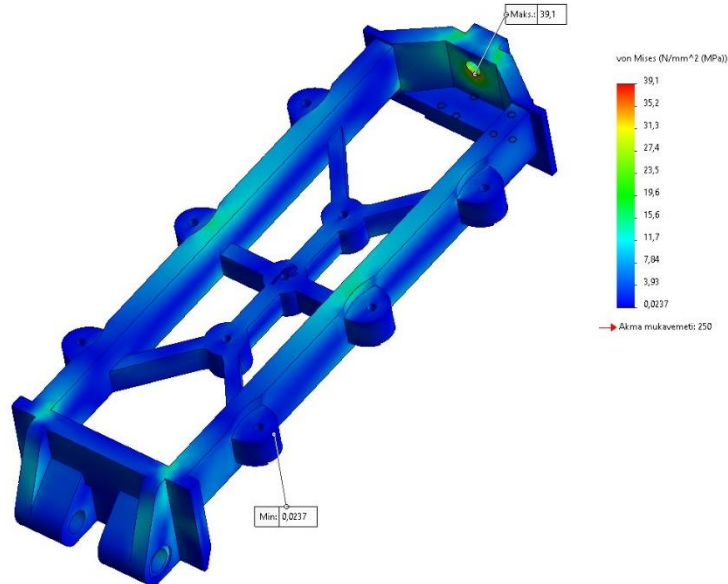
Şekil 13. Model-2 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)



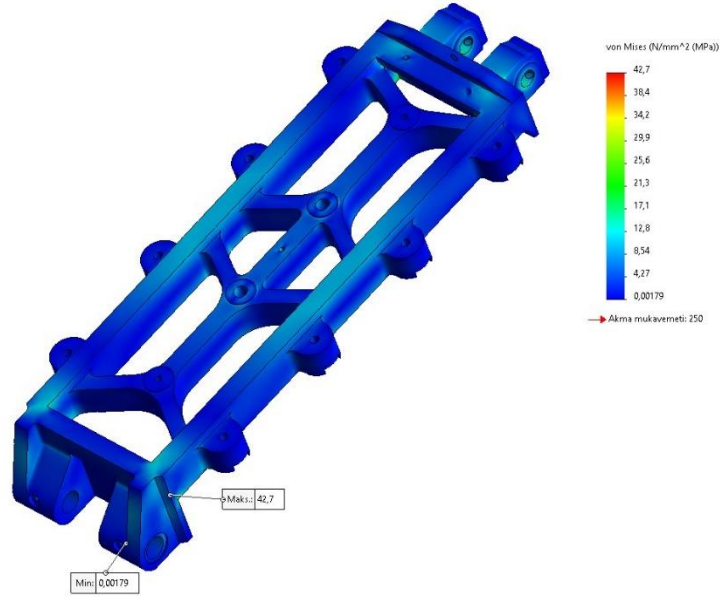
Şekil 14. Model-3 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının GGG-60 malzemesi için maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.00476 mm, 0.00457 mm ve 0.00393 mm olarak bulunmuştur (Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14).

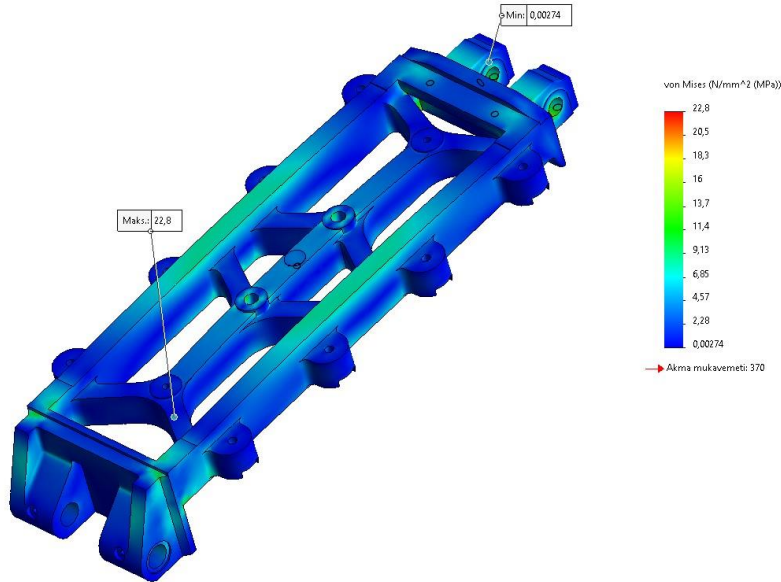
Model-1, Model-2 ve Model-3 maşa tasarımlarının hem ağırlık hem de basınç dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum eşlenik gerilme değerleri GGG-60 malzemesi için sırasıyla 39.1 MPa, 42.7 MPa ve 22.8 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17). Malzeme olarak GGG-45 kullanılması durumunda da eşlenik gerilme sonucunu etkilememiş ve her iki malzemede de eşlenik gerilme değeri aynı bulunmuştur.



Şekil 15. Model-1 maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

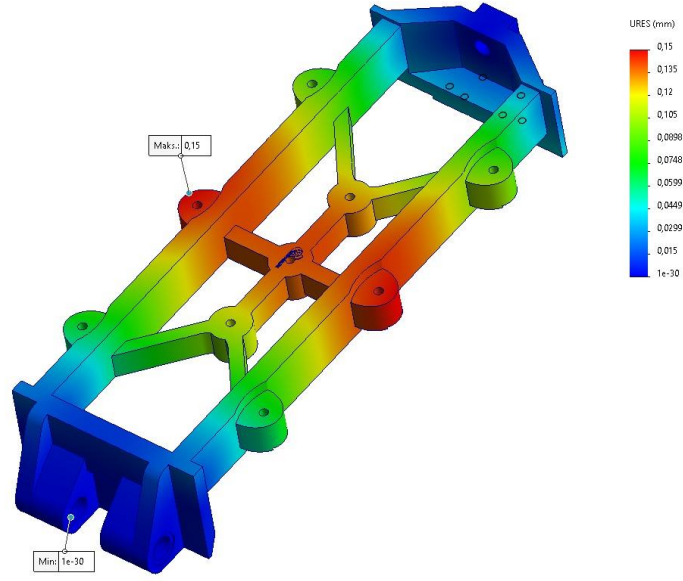


Şekil 16. Model-2 maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

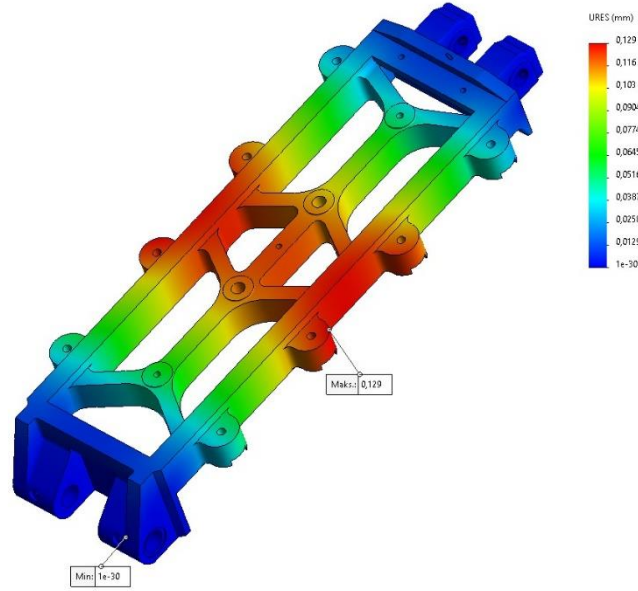


Şekil 17. Model-3 kalıp maşa tasarımı Von-misses gerilme dağılım grafiği (GGG-45 ve GGG-60)

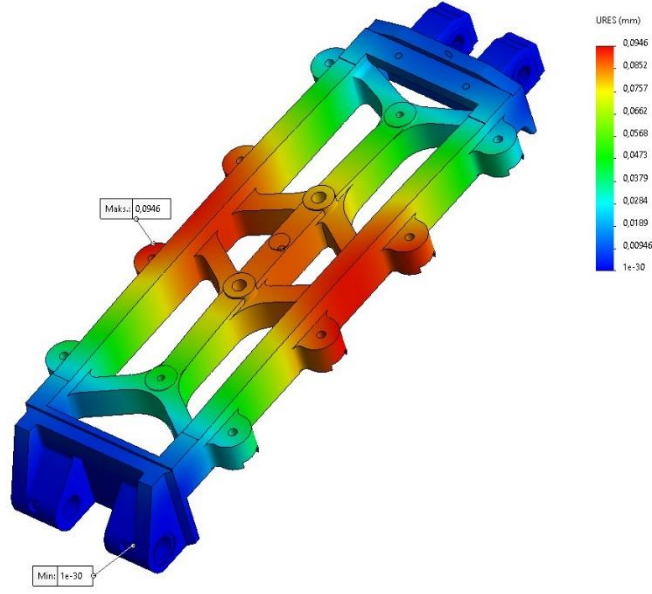
Şekil 18, 19 ve 20’de üç farklı kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem de basınç dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda GGG-45 malzemesi için elde edilen yer değiştirme analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 18. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değıştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



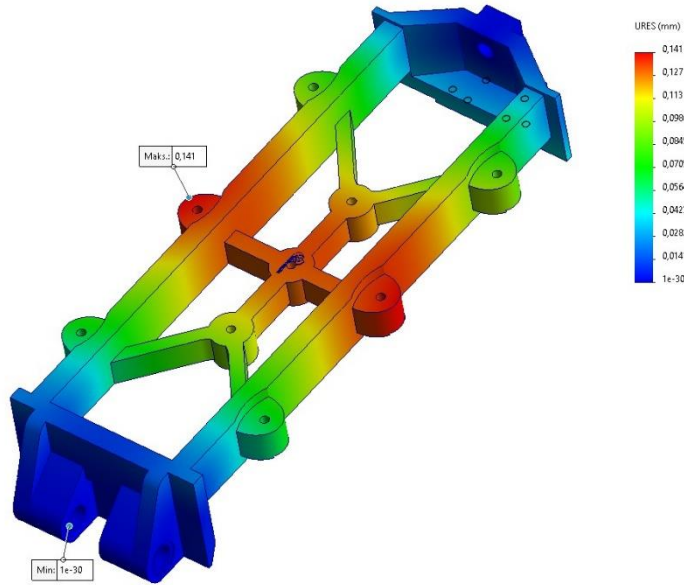
Şekil 19. Model-2 kalıp maşa tasarımı yer değıştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



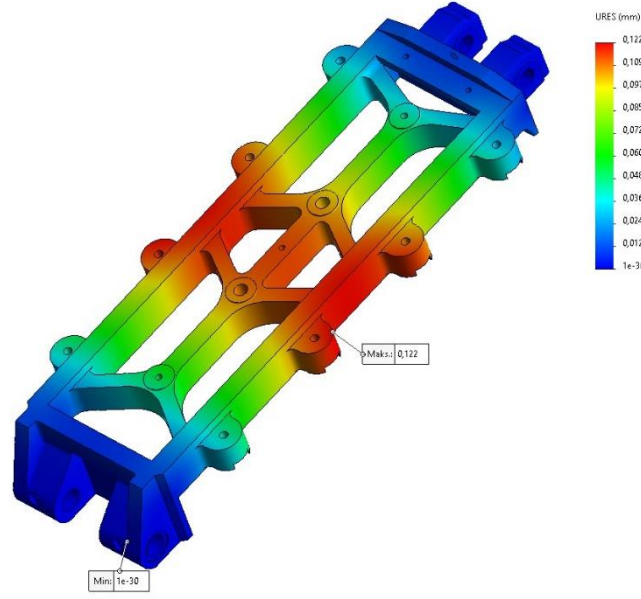
Şekil 20. Model-3 tip kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının GGG-45 malzemesi için maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.15 mm, 0.129 mm ve 0.0946 mm olarak bulunmuştur (Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20).

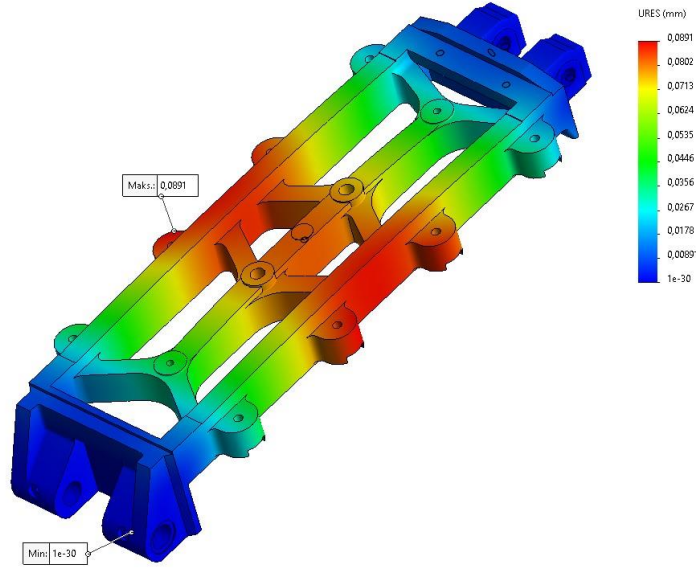
Şekil 21, 22 ve 23'te üç farklı kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem de basınç dahil edilerek GGG-60 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme sonuçları verilmiştir.



Şekil 21. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)



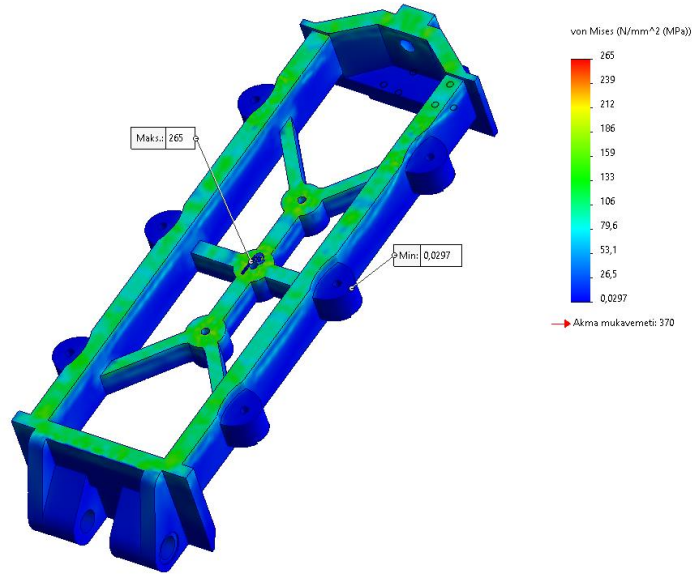
Şekil 22. Model-2 kalıp maşa tasarımı için yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)



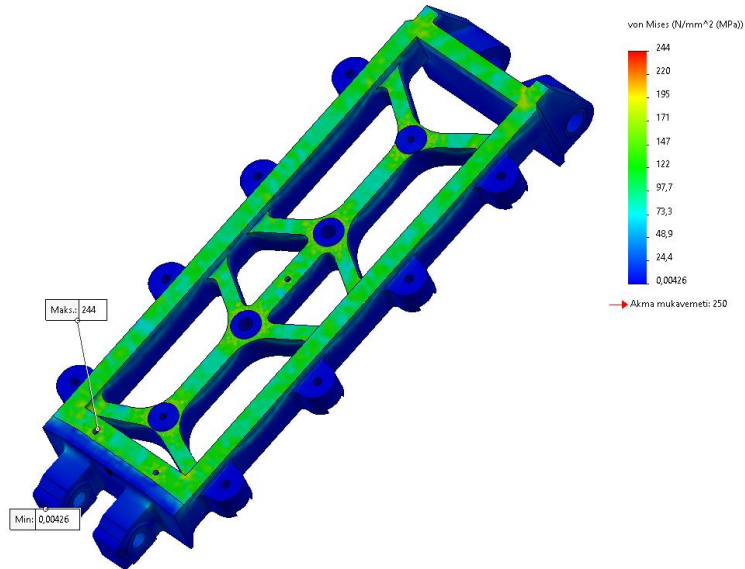
Şekil 23. Model-3 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem de basınç dahil edilerek GGG-60 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.141 mm, 0.122 ve 0.0891 mm olarak bulunmuştur (Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23).

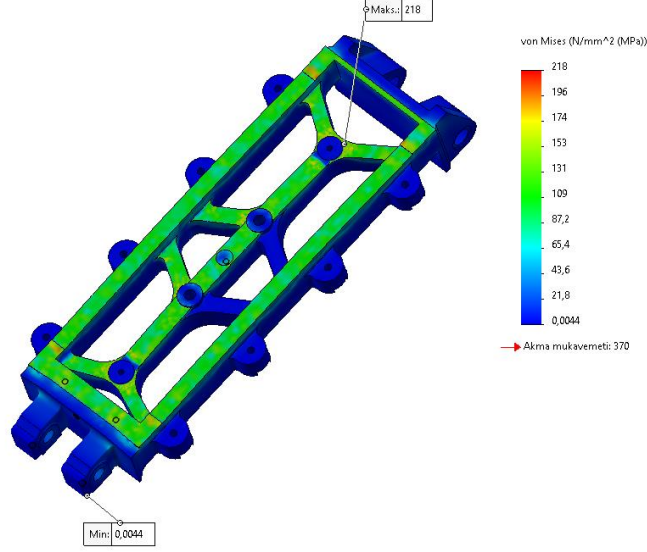
Model-1, Model-2 ve Model-3 maşa tasarımlarının hem ağırlık hem basınç hem de sıcaklık dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum eşlenik gerilme değerleri GGG-60 ve GGG-45 malzemeleri için sırasıyla 265 MPa, 244 MPa ve 218 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 24, Şekil 25 ve Şekil 26). Farklı malzeme kullanılması durumunda da eşlenik gerilme sonucunu etkilenmemiş ve her iki malzemede de eşlenik gerilme değeri aynı bulunmuştur.



Şekil 24. Model-1 kalıp maşa tasarımı için Von-misses gerilme dağılım görseli (GGG-60 malzemesi için)

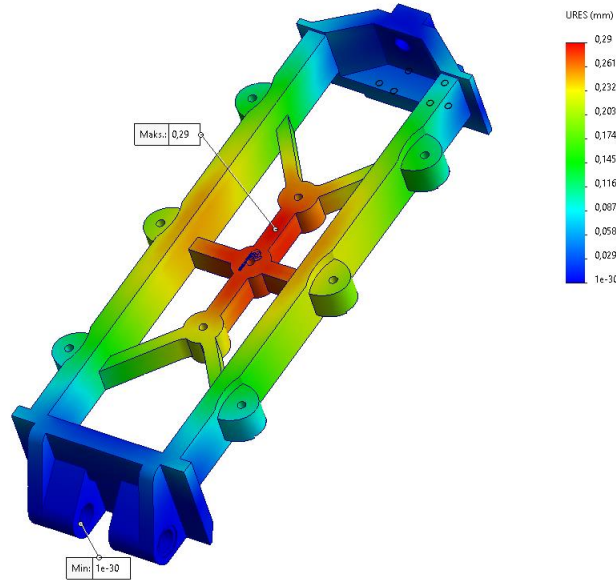


Şekil 25. Model-2 kalıp maşa tasarımı için Von-misses gerilme dağılım görseli (GGG-60 malzemesi için)

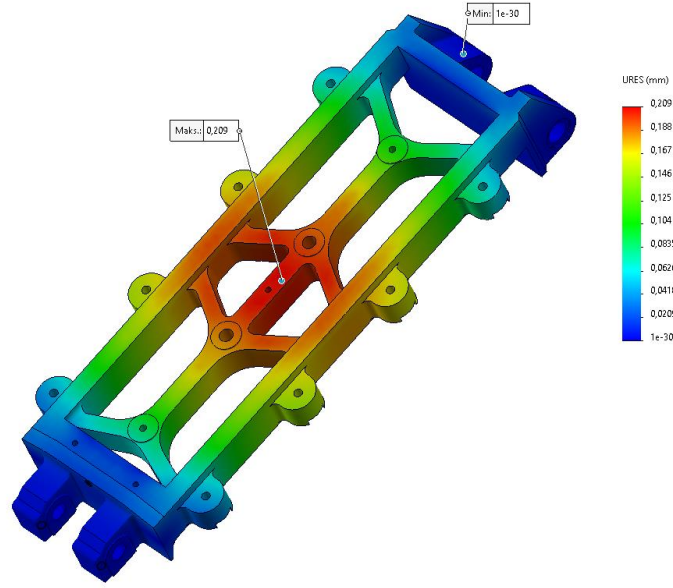


Şekil 26. Model-3 kalıp maşa tasarımı için Von-misses gerilme dağılım görseli (GGG-60 malzemesi için)

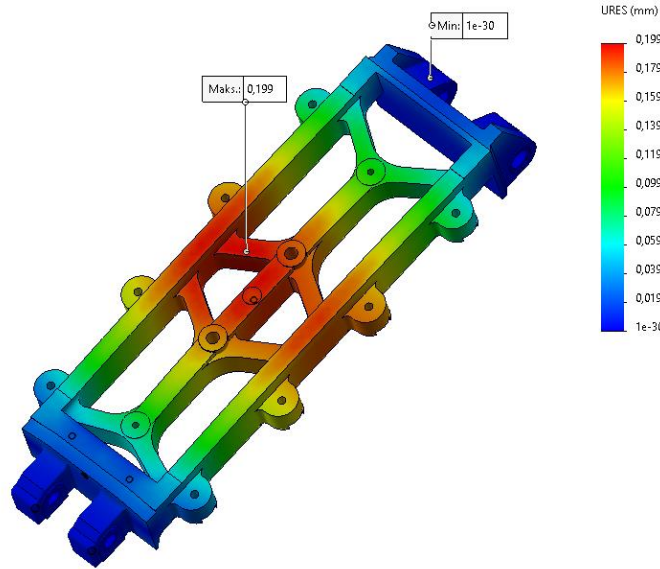
Şekil 27, 28 ve 29’da üç farklı kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem basınç hem de sıcaklık dahil edilerek yapılan yapısal analiz sonucunda GGG-45 malzemesi için elde edilen yer değiştirme analiz sonuçları verilmiştir.



Şekil 27. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



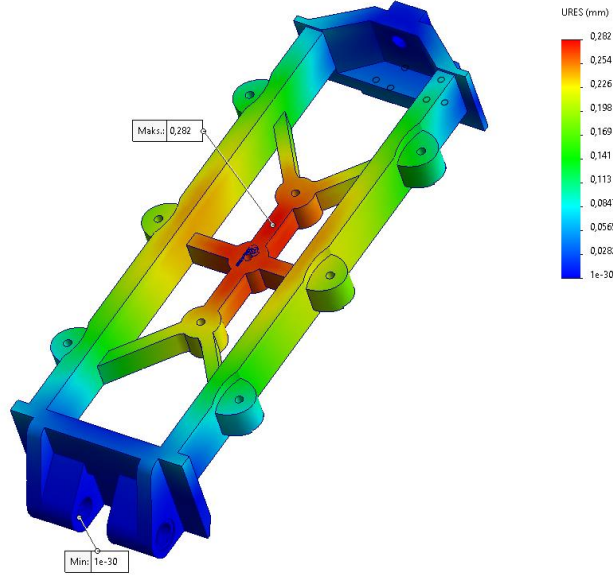
Şekil 28. Model-2 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)



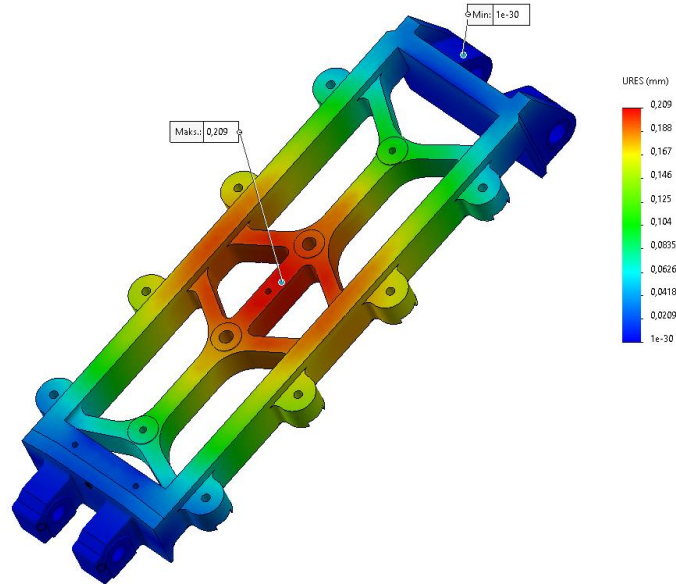
Şekil 29. Model-3 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-45 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem basınç hem de sıcaklık dahil edilerek GGG-45 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.29 mm, 0.209 mm ve 0.199 mm olarak bulunmuştur (Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29).

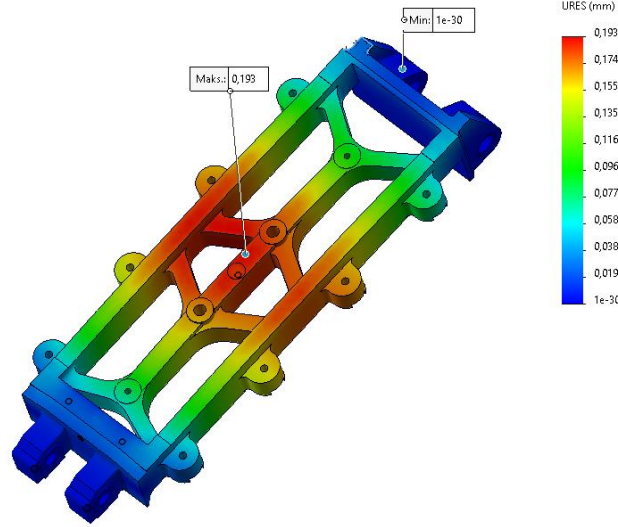
Şekil 30, 31 ve 32’de üç farklı kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem basınç hem de sıcaklık dahil edilerek GGG-60 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda elde edilen yer değiştirme sonuçları verilmiştir.



Şekil 30. Model-1 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)



Şekil 31. Model-2 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)



Şekil 32. Model-3 kalıp maşa tasarımı yer değiştirme analiz görseli (GGG-60 malzemesi için)

Model-1, Model-2 ve Model-3 kalıp maşa tasarımının hem ağırlık hem basınç hem de sıcaklık dahil edilerek GGG-60 malzemesi için yapılan yapısal analiz sonucunda maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla 0.282 mm, 0.209 mm ve 0.193 mm olarak bulunmuştur (Şekil 30, Şekil 31 ve Şekil 32).

4. Sonuçlar

- Model-1, Model-2 ve Model-3 tasarıma sahip kalıp maşasının eşlenik gerilme değeri her iki malzeme (GGG-45 ve GGG-60) içinde değişiklik göstermemiştir.
- Model-3 tasarıma sahip kalıp maşasının eşlenik gerilme değeri Model-1 tasarıma sahip kalıp maşa tasarımının gerilme değerinden %41.7 daha az iken, Model-2 tasarıma sahip kalıp maşasının gerilme değerinden %46.6 daha azdır.
- Model-3 tasarıma sahip kalıp maşa tasarımının GGG-45 malzemesi için maksimum yer değiştirme değeri Model-1 kalıp maşa tasarımının yer değiştirme değerinden %36.9 ve Model-2 maşa tasarımının yer değiştirme değerinden %26.7 daha azdır.
- Model-3 tasarıma sahip kalıp maşa tasarımının GGG-60 malzemesi için maksimum yer değiştirme değeri Model-1 kalıp maşa tasarımının yer değiştirme değerinden %36.8 ve Model-2 maşa tasarımının yer değiştirme değerinden %26.9 daha azdır.
- Üç farklı geometri tasarımı içinde farklı malzeme kullanımı ağırlıkları önemli derecede etkilememiştir.
- Model-1 tasarıma sahip kalıp maşasının GGG-45 malzemesi için sadece ağırlık dahil edilerek yapılan analizi sonucunda yer değiştirme değeri 0.00506 mm bulunmuş olup kuvvet dahil edildiğinde yer değiştirme değeri %96.41 artış gösterirken, ağırlık, kuvvet ve sıcaklık beraber dahil edildiğinde yer değiştirme değeri %98.26 artmıştır.
- Model-1 tasarıma sahip kalıp maşasının GGG-60 malzemesi için sadece ağırlık dahil edilerek yapılan analizi sonucunda yer değiştirme değeri 0.00506 mm bulunmuş olup kuvvet dahil edildiğinde yer değiştirme değeri %96.62 artış gösterirken, ağırlık, kuvvet ve sıcaklık beraber dahil edildiğinde yer değiştirme değeri %98.31 artmıştır.

İleriki çalışmalarda yapılan teorik yapısal analizlerin yanında farklı malzemelerin farklı yükler altında tasarım optimizasyonu ve beraberinde deneysel doğrulaması yapılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Boley, B. A. & Weiner, J. H. (2012). *Theory of Thermal Stresses*. Wiley, ISBN:0-486-69579-4, New York, ABD.

Carzino, M., Stanescu, G. & Errera, M. (2022). Finned wafer baking plates for heat transfer and distribution. *Seatific Journal*, 2(2), 80-89.

Galanakis, C.M. (2024). The future of food. *Foods*, 13, 506.

Sundara, R. (2012). The science behind the flat wafer baking process. *New food Magazine*, 15(4), 56-60. <https://hdl.handle.net/10779/lincoln.24362278.v3>

Şahin, O. S., Aksoy, M. H. & Tazegul, A. S. (2020). Numerical investigation of thermal and mechanical behavior of wafer mold. *X International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection*, 08-09 October 2020, Zrenjanin, Serbia.

Steinbach, J., Jadachowski, L., Kugi, A. & Steinböck, A. (2023). Optimal design of baking plates for an inductive wafer baking oven, *COMSOL 2023 Conference*, 25-27 October 2023, Munich, Germany.

Tazegül, A.S. & Mayda, M. (2020). Gofret fırınlarındaki şaselerin sonlu elemanlar yöntemi ile hafifletilmesi, *6th International Congress on Engineering, Architecture and Design*, 17-18 December 2020, İstanbul, Türkiye.

Vijayalakshmi, P. S., Veereshi, A. S., Jayade, V. P., Dinesh, M. R. & Kumar, M. (2012). Finite element analysis of stress and strain distribution in the bone around the implants used for orthodontic anchorage. *Journal of Indian Orthodontic Society*, 46(4), 175-182.

Derleme Makale/ Review Article

Plastik Kirliliğinin Önlenmesinde Biyodegradasyon Sürecinin Yeri

İlknur ERKİLİNÇ^{1*}, Tuba ARTAN ONAT^{1*}

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Niğde, TÜRKİYE
erkilincilknur@gmail.com, tubaartan@ohu.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 12.07.2024

Accepted/Kabul Tarihi: 19.12.2024

Özet: Çevreye karışan plastikler doğal süreçlerle (biyolojik metabolizma, UV ve mekanik aşınma gibi) ayrışma ve bozunmaya uğramakta ve çapı 5 mm'den küçük mikroplastiklere (MP'lere) ve çapı maksimum 1000 nm'den küçük olan parçacıklara ayrılarak nanoplastiklere (NP'lere) dönüşmektedir. Mikroplastiklerin temel kaynakları arasında peeling sabunlar, yüz temizleyiciler, köpükler, sigara izmaritleri, giysi mikrofiberleri, iç mekan tozları, bebek bezi, diş macunu, kapaklar, çatal bıçak takımları gıda kapları ve deniz ürünleri gibi kaynaklar bulunmaktadır. Bu ürünlerin çoğu fosil yakıtlardan veya işlenmemiş hammaddelerden üretilmekte ve çöplüklere veya kontrolsüz atıklara karışarak çevre kirliliğini arttırmaktadır. Geleneksel plastik üretimi ve atık yönetimi süreçleri, sera gazı emisyonlarını artırarak iklim değişikliğine neden olmaktadır. Özellikle denizlerde veya okyanuslarda görülen plastik kirliliği üzerine yapılan çalışmalar ve plastiklerin enzimler tarafından biyolojik olarak parçalanmasıyla ilgili araştırmalar önem kazanmıştır. Bu derleme makalesi bakteriler, funguslar gibi mikroorganizmaların metabolik süreçleri ile plastik atıkların biyolojik bozunması üzerine mevcut araştırmalara güncel bir genel bakış sağlamayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mikroplastik, Nanoplastik, Plastik degradasyonu, Plastik giderimi

The Role of Biodegradation In The Preventing Plastic Pollution

Abstract: Plastics reach the environment and, naturally break down into microplastics (MPs) with a diameter of less than 5 mm and nanoplastics (NPs) with a maximum diameter of less than 1000 nm due to processes including biological metabolism, UV light, and mechanical abrasion. The primary sources of microplastics encompass exfoliating soaps, face cleansers, foams, cigarette butts, microfibers from clothing, indoor dust, nappies, toothpaste, caps, cutlery, food containers, and seafood. These products are derived from fossil fuels or unrefined natural resources and ultimately disposed of in landfills or unregulated waste sites, hence exacerbating environmental damage. Conventional plastic production and waste management methods contribute to climate change by amplifying the release of greenhouse gases. Research on plastic pollution, particularly in marine environments, and the enzymatic biodegradation of plastics have become increasingly significant. This review article seeks to present a comprehensive and recent overview of the ongoing research on the metabolic activities of microorganisms, specifically bacteria and fungi, and their ability to break down plastic waste through biodegradation.

Keywords: Microplastics, Nanoplastics, Plastic Removal, Plastic Degradation

1. Giriş

Sentetik plastiklerin polimerik özelliklerinin sağladığı düşük maliyet, yüksek stabilite, dayanıklılık ve esneklik gibi özellikleri günümüzde kullanılan temel bir malzeme olmasına neden olmaktadır (Ru vd., 2020; Ali vd., 2021). Bu özellikler plastiklerin biyolojik bozunmaya dirençli olmasını da sağlar, bu durum ise atık depolama alanlarında ve ekosistemlerde birikmelerine yol açmaktadır (Barnes vd., 2009). Düzenli depolama gelişmekte olan ülkelerde düşük maliyeti nedeniyle hala tercih edilmektedir. Yakma işlemi, plastik birikim sorununu azaltmak için bir çözüm olarak değerlendirilmekte ancak dioksinler, dioksin benzeri bileşikler, karbon monoksit, nitrojen oksitler vb. gibi toksik kirlleticilerin atmosfere salınmasına yol açmaktadır (Ru vd., 2020). Mekanik ayrıştırma ve geri dönüşüm, termoplastik atıkların yeniden kullanımı giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, plastik malzemeler fizikokimyasal özellikleri nedeni ile geri dönüşüm döngüsünden sonra ciddi

şekilde bozulmaktadır ve bu da polimerlerin ticari değerini sınırlayabilmektedir. Kimyasal geri dönüşüm plastik atıkların monomerler ve diğer kimyasalların geri kazanılma potansiyeline sahiptir; ancak bu sürecin uygunluğu, kullanılan katalizörlerin etkinliği ve geliştirilen süreçlerin ekonomik uygulanabilirliğine bağlı kalmaktadır (Rahimi ve García, 2017). Bu sebeple, geleneksel atık bertaraf yöntemlerinin zararlı çevresel sonuçlarını azaltmak için etkili çevre dostu tekniklerin hızla geliştirilmesi gerekmektedir (Ali vd., 2021).

Kullanımı en yaygın plastikler arasında; polietilen (PE), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), polietilen tereftalat (PET), poliüretan (PU), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), poli (butilenadipat-ko-tereftalat) (PBAT), polilaktik asit (PLA) ve Polivinil klorür (PVC) yer almaktadır (Ali vd., 2021; Kim vd., 2023; Sun vd., 2024). Her plastik malzeme farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir, bununla birlikte tekstil endüstrisi, gıda, paketlenme, tarımsal malç, yapı malzemeleri ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli endüstriyel ve günlük kullanımlarda kullanılmaktadır (Thakur vd., 2023). Çevreye karışan plastikler doğal süreçlerle (biyolojik metabolizma, UV ve mekanik aşınma gibi) ayrışma ve bozunmaya uğramakta ve çapı 5 mm'den küçük mikroplastiklere (MP'lere) ve çapı maksimum 1000 nm'den küçük olan parçacıklara ayrılarak nanoplastiklere (NP'lere) dönüşmektedir (Hartmann vd., 2019; He vd., 2023; Gigault vd., 2021; Thompson vd., 2004; Sun vd., 2024; Zhang vd., 2021). Mikroplastikler ve NP'ler yüksek taşınma kapasitesi ve yüksek hareketliliğe sahiptir (Rillig ve Lehmann, 2020; Zhang vd., 2021). Bu nedenle MP ve NP partiküllerinin buldukları ortamla etkileşim potansiyelleri yüksektir (Wang vd., 2022).

Plastikleri parçalayan çeşitli organizmalar ve/veya enzimatik yollar bulunmaktadır. Literatürde bu organizmalar ve degradasyon mekanizmalarına dair temel bir yaklaşım ve bilgi birikimi oluşmuştur. Bu derlemenin temel amacı plastiklerin biyolojik yollarla bozunmasında son yıllarda (2020-2024) yapılan araştırmaları bir araya getirerek biyodegradasyonu gerçekleştiren organizmalara genel bir bakış sunmaktır.

2. Mikroplastiklerin Çevresel Etkileri

Mikroplastikler pestisitler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve ağır metaller gibi kirleticileri adsorbe edebilir ve çevreye yayılabilir (Sa vd., 2018; Yu vd., 2019). Çevrede biriken mikroplastiklerin temel kaynakları arasında peeling sabunlar, yüz temizleyiciler, köpükler, sigara izmaritleri, giysi mikrofiberleri, iç mekan tozları, bebek bezi, diş macunu, kapaklar, çatal bıçak takımları gıda kapları ve deniz ürünleri gibi diğer kaynaklarda da bulunmaktadır (Hernandez vd., 2017, Galvão vd., 2020; Kannan ve Vimalkumar, 2021). Ayrıca, polistiren ve poliüretan gibi polimerlerin gübrelerle eklenmesi, toprak performansını artırabilir ve mahsul üretimini artırabilir (Wright vd., 2013). Mikro (nano) plastikler, boyutları, şekilleri ve yüzey işlevselleştirmeleri nedeniyle çevreye salındıktan sonra pestisitler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar), poliklorlu bifeniller (PCB'ler) ve ağır metaller gibi diğer kirleticileri adsorbe edebilir ve konsantre edebilir (Sa vd., 2018; Yu vd., 2019). Çevrede farklı kökenlere, boyutlara, yoğunluklara, kimyasal yapıya ve şekle sahip çeşitli mikro (nano) plastik türleri bulunmaktadır (Ali vd., 2024). Deniz suyunda, yüksek yoğunluklu partiküller tortuya batar ve bentik organizmalar tarafından alınabilirken, düşük yoğunluklu partiküller su sütununda kalabilir. Mikroplastiklerin kimyasal ve fiziksel özellikleri çevresel koşullarla değişebilir (Yu vd., 2019). Kıyı bölgelerinde plastiklerin parçalanması ve bozulması daha hızlı olabilmektedir (Andrady, 2011; Barboza vd., 2019).

2.1. Mikroplastiklerin Dağılımda Atmosferin Etkisi

Sentetik tekstiller, mikro (nano) plastiklerin çevreye yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Dris vd., 2016; Dris vd., 2017). Sentetik elyaflar, dayanıklılığı ve konfor sağlamaları nedeniyle geniş kullanımı alanı sağlamaktadır (Liu vd., 2019). Yıkama işlemi esnasında, yaklaşık 1900 farklı ince

elyafın havada serbest kaldığı gözlemlenmiştir (Browne vd., 2011). Endüstride, sentetik tekstillerin öğütülmesi ve kesilmesi sırasında birçok mikrofiber üretilmesine yol açmaktadır (Chen vd., 2020a). Mikro (nano) plastiklerin atmosferdeki varlığı, büyük plastiklerin parçalanması, çöp sahalarının yanması ve araçların egzoz emisyonuyla da gerçekleşmektedir (Chen vd., 2020b). Mikroplastikler atmosferde genellikle 20 ila 5000 mikrometre arasında değişir ve farklı kimyasal bileşimleri içermektedir (Chen vd., 2020b).

2.2. Mikroplastiklerin Dağılımında Sucul Sistemlerin Etkisi

Okyanuslar, mikroplastik kirliliği için özellikle kritik alanlar olarak kabul edilmektedir. Yaklaşık 5,25 trilyon plastik parçasının okyanus yüzeyinde yüzdüğü tespit edilmiştir (Romera-Castillo vd., 2018). Polikarbonat ve polistiren mikro boncuklar, düzenli depolama alanlarının (Golwala vd., 2021; Silva vd., 2021) ve kanalizasyon arıtma tesislerinin (Kataoka vd., 2019) sızıntı sularına karışabilmektedir. Mikro (nano) plastikler ayrıca kara kökenli plastikler hava yolu (hava akım izleri), toprak izleri ve nehir yoluyla (su izleri) okyanuslara ulaşabilmektedir (He vd., 2018; Wang vd., 2019). Mikro (nano) plastiklerin yaygınlığı, okyanus bölgelerinin insan faaliyetleriyle doğru orantılıdır (Li vd., 2018). Kıyı bölgelerde daha düşük konsantrasyonlar gözlemlenmiştir (Desforges vd., 2014, Desforges vd., 2015).

Plastiklerin çoğunda yoğunluk sudan daha düşüktür, bu nedenle nehirler ve deniz akıntılarıyla kolayca taşınabilirler ve sonunda çeşitli biyolojik ve fiziksel faktörlerin etkisiyle sedimentlerde birikmektedirler (Cauwenberghe vd., 2015). Mikroplastiklerin sedimentlerdeki birikimi zamana bağlı olarak artmıştır, özellikle giysilerin yıkama sürecinden kaynaklanan liflerin önemli bir kaynak olduğu belirlenmiştir. Özellikle ev tipi çamaşır makinelerinden alınan örneklerde, tek bir giysi parçasından binlerce lif türü elde edilebilmektedir. Plaj sedimanlarında bulunan mikroplastik liflerin çoğu çamaşır makinelerinin atık sularıyla ilişkilidir (Browne vd., 2011). Bu nedenle, kentsel alanlardaki sedimentlerdeki mikro(nano)plastik liflerin miktarını belirlemek büyük önem taşımaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki güney kıyılarında yapılan araştırmalar, çeşitli plastik türlerinin sedimentlerde farklı konsantrasyonlarda bulunduğunu ve en yaygın olanların lifli yapıya sahip olanlar olduğunu göstermiştir (Yu vd., 2018). Ülkemizde buna benzer bir çalışmaya rastlanılamamıştır.

3. Mikroplastiklerin İnsan ve Hayvan Sağlığına Etkisi

Toksikoloji verileri, mikro (nano) plastiklerin bağırsak hasarına ve oksidatif stres neden olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, mikroplastiklerin balıklarda büyüme, glikoz seviyeleri, oksidatif stres, bağışıklık sistemleri biyobelirteç yanıtlarını değiştirebileceğini, aynı zamanda kalıcı organik kirleticilerin ve ağır metallerin taşınmasını etkileyebileceğini gösterilmiştir (Jeong vd., 2016). Polisiklik aromatik hidrokarbonlar veya poliklorlu bifeniller gibi mikroplastiklerin, toprak solucanları, deniz amfipodları, gökkuşuğu balıkları, mikroalgler ve midyeler gibi çeşitli biyolojik organizmalarda adsorpsiyon yoluyla biriktiği ve konsantrasyonunun arttığı tespit edilmiştir (Fisner vd., 2017; Guo vd., 2020; Llorca vd., 2018; Rehse vd., 2018; Wang vd., 2020).

Mikroplastikler, organizmaların normal işlevlerini bozabilir ve çeşitli organlarda, gelişim, sindirim, nörolojik ve üreme sistemlerinde zararlı etkilere sahip olabilir (Yin vd., 2021; Sun vd., 2023). Plastik endüstrisinde çalışanlarda, düşük sperm kalitesi ve üreme sorunları gibi sağlık sorunlarına dair belirtiler görülmüştür (Jelnes, 1988; Hougaard, 2021). Canlı organizmalar üzerinde nano partiküllerin zararlı etkileri, nanotoksosite olarak bilinmektedir. Nano partiküller, biyolojik, fiziksel ve kimyasal süreçler kullanılarak üretilir (Samrot ve Noel Richard Prakash, 2023). Sperm olgunlaşmasını etkileyen moleküler sinyal iletim yollarında araçlar olarak hareket eden reaktif oksijen türlerinin üretimi yoluyla erkek üreme sisteminde toksisiteye neden olabilir. Dişi üreme sisteminde ise, nano partiküller, oosit olgunlaşması, döllenme ve gelişim gibi fizyolojik süreçleri etkileyebilir (Working 1988; Baskaran vd., 2021; Hou ve Zhu 2017).

İnsan sağlığına yönelik riskler, kirli gıda ve su tüketimi, iç ve dış ortam havasının solunması kişisel bakım ürünleri veya deniz ürünleri kaynakları aracılığıyla mikro(nano)plastiklere maruz kalma ile ilişkilendirilmiştir (Cox vd., 2019; Rahman vd., 2021; Shabsavaripour vd., 2023). Epidemiyolojik araştırmalar, mikroplastiklere (nanoplastikler) maruz kalmanın bağışıklık fonksiyonunu bozabileceğini ve immüno-supresyon veya otoimmün bozukluklara yol açabileceğini göstermektedir (Rahman vd., 2021; Wick vd., 2010). Mikroplastiklerin insan vücudunda akut toksikolojik etkilere yol açabileceği, oksidatif stres, apoptoz, inflamasyon ve bağışıklık tepkisi gibi faktörleri tetikleyebileceği belirtilmektedir (Santos vd., 2011).

Mikroplastikler, besin zinciri boyunca birikerek ve hayvanların sağlığını tehdit edecek şekilde risk oluşturabilmektedir (Wang vd., 2016; Wright vd., 2013). Sahillerde, karaya vurmuş veya ölmüş deniz kuşlarının sindirim sistemlerinde büyük plastik parçaları ve mikroplastikler bulunmuştur (Terepocki vd., 2017). Bu mikroplastikler, sindirim sistemine zarar vererek yaralı dokuların şişmesine ve alerjik bağışıklık tepkilerine yol açabilmektedir (Lei vd., 2018; Santillo vd., 2017). Ayrıca, mikroplastik tüketimi, deniz kuşlarının üreme süreçlerini geciktirebilmekte veya sucul türlerin üreme yeteneklerini etkileyebilmektedir. Balıkların (Savoca vd., 2019), derin deniz türlerinin (Courtene-Jones vd., 2017), büyük memelilerin ve farklı beslenme seviyelerine sahip bentik omurgasızların bağırsaklarında mikroplastikler bulunmuştur (Besseling vd., 2015a). Mikroplastikler, deniz planktonlarının solunumunu ve fotosentezini engelleyebilir ve deniz ekosistemi için bir tehdit oluşturabilmektedir (Amin vd., 2020). Ayrıca, mikro (nano) plastiklerin zooplanktonlar tarafından tüketildiği ve bu yolla sucul organizmalar ve deniz ekosistemi için tehdit oluşturabileceği gösterilmiştir (Amin vd., 2020).

4. Plastik Degradasyonu

Plastik malzemeler, ultraviyole (UV) tarafından gerçekleştirilen fotooksidatif bozunma olarak bilinen bir süreç aracılığıyla parçalanmaktadır (Yousif vd., 2013). Bu süreç, polimer zincirlerinin parçalanması, serbest radikallerin oluşması ve sonrasında moleküler ağırlıkta bir azalma ile plastiklerin bozulmasına neden olmaktadır. Ancak, tüm plastik türlerinin UV ışığını etkili bir şekilde absorbe edemediği göz önünde bulundurulmalıdır (Zaini vd., 2024). Ultraviyole radyasyonu, plastikler tarafından absorbe edildiğinde fotonların uyarılmasına ve serbest radikallerin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak, bazı organik bileşikler UV radyasyonunu emerek termal enerji olarak yeniden yayabilir, bu da plastiklerin UV bozulmasını azaltabilmektedir. Farklı plastik türleri, UV bozulmasına farklı derecelerde duyarlılık gösterebilmektedir. Dış mekanda kullanılan PVC borularda UV radyasyonunun neden olduğu bozulma belirgin hale gelebilmekte ve tekstillerde renk solması da UV kaynaklı polimer bozulması gözlenmektedir (Zaini vd., 2024).

Polimerlere şeker birimlerinin dahil edilmesi, UV radyasyonuna maruz kaldıklarında bozunabilirliklerini artırmaktadır (Hardy vd., 2022). Polimer yapısı, çeşitli UV radyasyon formları tarafından indüklenen fotokimyasal etki nedeniyle fotokimyasal bozulmaya uğrayabilmektedir. Plastik filmler, güneş ultraviyole radyasyonuna ve mekanik aşınmaya (MA) maruz kaldıklarında yüzey bozulmasına ve mikroplastik salınımına maruz kalmaktadır (Sun vd., 2022).

Plastiklerin yüzey ayrışması genellikle güneşe maruz kaldığında meydana gelir ve plastiği kırılğan hale getirir. Ayrıca, inatçı kirleticiler kimyasal olarak oksidasyon veya hidroliz yoluyla parçalanabilir. Okyanusa veya karaya giren plastikler UV ışığına maruz kalır ve mikroplastığe dönüşebilir (Song vd., 2017).

4.1. Mekanik Bozunma

Plastiklerin bozunma süreci: başlatma, yayılma ve sonlandırma olmak üzere üç adımda gerçekleşmektedir. Bu süreçte plastiklerin moleküler yapısı, ışığa karşı duyarlılığına, yüzey alanının hacme oranına, sıcaklığa ve moleküler formülüne bağlı olarak değişir. Ancak, bu sonuçlar sadece

fotoreaktif plastikler için geçerlidir ve okyanustan uzaklaştırılmaları daha kolaydır. Diğer plastik türlerinin okyanustan uzaklaştırılması daha uzun zaman alabilir (Gewert vd., 2015; Stubbins vd., 2022). Çevre kirliliğine etkilerini belirlemek için plastiklerin mikroplastığa parçalanma sürecini anlamak önemlidir (Song vd., 2017) Fiziksel faktörlerin yanı sıra fotokimyasal oksidasyon ve mekanik aşınmanın plastik enkazın parçalanmasını artırdığı bilinmektedir (Asiandu vd., 2022).

Mekanik aşınma, plastiklerin kaya veya kum gibi yüzeylerle temas ettiğinde ve bu yüzeyler tarafından aşındırıldığında meydana gelir. Rüzgar ve dalgalar genellikle sahilde plastiklerin mekanik aşınmasına neden olduğundan, bu durum özellikle sahillerde sık görülür (Bunty vd., 2017). Plastiklerin deniz ortamında, suyun gölgelenmesi ve derinlik nedeniyle güneş ışığına maruz kalma miktarı azalır. Bu da plastiklerin deniz ortamında daha uzun süre bozulmasına neden olmaktadır (Bejgarn vd., 2015).

Plastik atıkların parçalanmasına yönelik fiziksel ve kimyasal yaklaşımlar arasında ultraviyole (UV) ısıtma, fiziksel stres, hidroliz ve ammonoliz gibi yöntemler bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerde yüksek sıcaklıkların kullanılması gerekebilmekte ve yan ürünlerin çoğu doğa için toksik olabilmektedir. Ayrıca, bu prosedürlerin çoğu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir, bu da doğal koşullar altındaki etkinliklerini sınırlayabilir. Ultraviyole ışınlar uygulanması plastik bozunmasında önemli bir adımdır çünkü malzemeyi daha küçük parçalara ayırarak zincir parçalanmasını başlatır. Ancak, UV radyasyonu plastikleri bozarken, plastiklerde bulunan katkı maddeleri de çevreye etkileyebilecek diğer maddeleri açığa çıkarabilir (Ghosh vd., 2019, Gewert vd., 2015).

4.1.2. Hidroliz ve Ammonoliz ile bozunma

Hidroliz, su içeriği yüksek olduğunda plastiklerin zincirlerinin bölünmesiyle meydana gelir. Asidik bileşiklerin varlığı hidroliz sürecini hızlandırabilir ve poliüretandaki ester bağı, karboksilik asit üreterek otokatalitik bir süreç oluşturabilir. PET hidrolizinin bir dezavantajı, sistemin yüksek korozyonlu ve üretilen inorganik tuzların fazlalığıdır (Al-Sabagh vd., 2016; Webb vd., 2021). Ammonoliz, poliesterlerin ve polikarbonatın kimyasal olarak geri dönüştürülmesi için öne çıkan bir yöntemdir ve hidrotermal koşullar altında gerçekleşir (Funazukuri, 2015).

5. Biyolojik Bozunma

Plastiklerin biyolojik bozunması ve biyodegradasyonu, modern plastik endüstrisinin başlangıcından itibaren araştırma konusu olmuştur. Özellikle 1940'ların başlarından itibaren, plastiklerin biyolojik olarak nasıl etkilendiği ve doğal ortamlarda ne tür değişikliklere uğradığı merak konusu olmuştur. PVC'deki mantar gelişmesinin tespit edilmesi, plastiklerin biyolojik etkilere maruz kalabileceğine dair erken bir işarettir (Brown, 1945). Ancak, biyodegradasyon terimi, sentetik plastik polimerlerin biyolojik dağılımını ve parçalanmasını tanımlamak için 1970'lere kadar yaygın olarak kullanılmamıştır. İlk plastik biyodegradasyonu ile ilgili araştırma makaleleri 1974 yılında ortaya çıkmıştır (Mills ve Klausmeier, 1974). Örneğin, 1971'de PVC'nin bakteriler tarafından kütle azaltımıyla ilgili önemli bulgular rapor edilmiştir. Bu bulgular, PVC'nin katkı maddelerinden kaynaklanan bir bozulma sürecine sahip olduğunu göstermiştir. 1978'de yapılan bir çalışmada, 14C etiketli PE'nin sadece %0,5'inin iki yıl içinde mantarlar tarafından CO₂'ye dönüştürüldüğü bulunmuştur (Albertsson vd., 1993). Plastiklerin biyolojik bozunmasının çeşitli faktörlerle etkilendiği görülmüştür. UV ışığına maruz kalmanın plastiklerin biyolojik parçalanmasını artırdığı ve bazı yüzey aktif maddelerin bu süreci hızlandırabileceği belirlenmiştir. Mikroorganizmaların plastikler üzerindeki etkisi de araştırma konusudur. Özellikle, belirli bakteri türlerinin plastik biyodegradasyonunu artırabileceği bulunmuştur (Albertsson vd., 1993).

Son yıllarda, plastik biyolojik bozunmasıyla ilgili araştırmalar artmıştır. Deniz plastik kirliliği üzerine yapılan çalışmalar ve plastiklerin enzimler tarafından biyolojik olarak parçalanmasıyla ilgili

araştırmalar önem kazanmıştır. Ayrıca, biyobazlı ve biyolitik olarak bozunabilen plastiklerin değer zincirleri üzerine yapılan araştırmalar da plastik atık yönetimi açısından önemlidir (Yang vd., 2023).

5.1. Mikroplastiklerin Biyolojik Bozunmasında Kullanılan Mikroorganizmalar

Yapılan taksonomik çalışmalarda Proteobacter (%80-93), Actinobacteria (%2-14), Firmicutes (%1) sınıfları, Moraxellaceae familyası konsorsiyumu (%50-84), Bradyrhizobiaceae (2-10), Xanthomonadaceae (%2-8), Bacillaceae (%3-5) aileleri, *Mycobacterium* ile Mycobacteriaceae (%12) üyeleri ile poli(eter-üretan) biyodegradasyonu yapıldığı gözlenmiştir (Faccia vd., 2021).

5.1.2. Mikroplastiklerin biyodegradasyonunda kullanılan bakteri türleri

Mikroplastik biyodegradasyonunda bakterilerle yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu derlemede yapılmış olan literatür taramasında farklı bakteriyel suşların farklı plastik türlerinde bulunmuş olan biyodegradasyon oranları çizelgelerde gösterilmiştir (Tablo 1 ve Tablo 2).

Yapılan literatür taramasında HPDE biyodegradasyonunda en yüksek biyodegradasyon oranına *Bacillus aryabhatai* VRKPV15'nin ulaştığı, en düşük oran biyodegradasyon oranının ise *Bacillus* sp. VRKPP17 (%6.7) ile yapıldığı belirlenmiştir (Sangeetha vd., 2019). Polipropilen biyodegradasyonunda en yüksek oran (%78) *Bacillus paramycooides* tarafından sağlanırken (Nanthini vd., 2021), en düşük oran (%3) *Lysinibacillus* sp. JJY0216 tarafından elde edilmiştir (Jeon vd., 2021). PVC plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%93.48) *Bacillus flexus* (DSM 1320) ile (Giacomucci vd., 2019), en düşük oran ise *Cobetia* sp. S-237 (MT907446) suşu ile elde edilmiştir (Khandare vd., 2022).

Tablo 1. *Bacillus* sp. türü ile yapılan plastik biyodegradasyonu çalışmaları

<i>Bacillus subtilis</i> H-248	LDPE film	%1.54	Khandare vd, 2022
<i>Bacillus velezensis</i> C5	LDPE film	%8.01	Liu vd, 2022
<i>Bacillus siamensis</i> ATKU1	LDPE partikül	%4.71	Tarafdar vd, 2021
<i>Bacillus aryabhatai</i> VRKPV15	HDPE film	%23.14	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus pumilus</i> VRKPC1 (KJ958503)	HDPE film	%18.19	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus cereus</i> VRKPK25	HDPE film	%19.37	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> VRKPR13	HDPE film	%16.43	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus licheniformis</i> VRKPCH23	HDPE film	%11.82	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus subtilis</i> VRKPP1 (KJ958502)	HDPE film	%7.51	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus</i> sp. VRKPP17 (KM879154)	HDPE film	%6.7	Sangeetha vd, 2019
<i>Bacillus paramycooides</i>	UV ve PP	%78.99	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus cereus</i>	UV ve PP	%67.69	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. BS-1	UV ve PP	%60.54	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. BS-2	UV ve PP	%29.04	Nanthini vd, 2021
<i>Bacillus</i> sp. strain 27	UV ve PP mikroplastik	%4.0	Auta vd., 2018

Tablo 1'in devamı

<i>Bacillus amyloquefaciens</i> JB4	PVC film	%33.2	Novotný vd., 2022
<i>Bacillus flexus</i> (DSM 1320)	PVC film	%93.48	Giacomucci vd., 2019
<i>Bacillus paralicheniformis</i> G1	PS şerit	%18	Kumar vd., 2021
<i>Bacillus</i> sp. ITP 10.1.1	PS films	%29.28	Ruslan vd., 2018

Yapılan literatür taramasından elde edilerek oluşturmuş Tablo2'de farklı bakteriler ile yapılan çalışmalar derlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, LPDE plastik biyodegradasyonunda *Acinetobacter pittii* IRN19 en yüksek (%26.8) oranıyla biyodegradasyon gerçekleştirirken (Montazer vd., 2018), en düşük oran ise *Marinobacter* sp. H-244 (%1.46) elde etmiştir (Khandare vd., 2022). PET plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%69) *Priestia aryabhatai* VT 3.12 (OK135732.1) tarafından sağlanırken (Dhaka vd., 2022), en düşük oran (%30.52) *Rhodococcus* sp. SSM1 (MN045174) tarafından elde edilmiştir (Kumar vd., 2020). PL plastik biyodegradasyonunda ise oran %30 *Pseudomonas* sp. AKS31 (KY849590) tarafından elde edilmiştir (Roy vd., 2021). PS plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran (%29.28) *Bacillus* sp. ITP 10.1.1 (Ruslan vd., 2018) tarafından sağlanırken, en düşük oran (%0.4) *Exiguobacterium* sp. DR11 (MG645229) tarafından elde edilmiştir (Chauhan vd., 2018).

Tablo 2. Çeşitli bakteriler ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Bakteriler	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Achromobacter denitrificans</i>	LDPE	%6.5	Maleki vd, 2022
<i>Marinobacter</i> sp. H-244	LDPE film	%1.46	Khandare vd, 2022
<i>Marinobacter</i> sp. H-246	LDPE film	1%.68	Khandare vd, 2022
<i>Alcaligenes faecalis</i> LNDR-1	PE şerit	%37.2	Nag vd, 2021
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> VRKPC5	HDPE film	%13.73	Sangeetha vd, 2019
<i>Leucobacter</i> sp. VRKPC22	HDPE film	%8.50	Sangeetha vd, 2019
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> VRKPCH4 (KJ958504)	HDPE film	%7.33	Sangeetha vd, 2019
<i>Acinetobacter pittii</i> IRN19	LDPE parça	%26.8	Montazer vd, 2018
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> WZH-4 (OK448418)	PP particles	%9.35	Wang vd, 2022a
<i>Lysinibacillus</i> sp. JJY0216	PP film	%3.1	Jeon vd, 2021
<i>Pseudomonas</i> sp. ADL15 (KX812776)	PP mikroplastik	%17.3	Habib vd, 2020
<i>Rhodococcus</i> sp. ADL36 (KX812777)	PP mikroplastik	%7.3	Habib vd, 2020
<i>Escherichia coli</i>	PP parça	%66.8	Gamage vd., 2019
<i>Rhodococcus</i> sp. strain 36	UV ve PP mikroplastik	%6.4	Auta vd., 2018
<i>Aneurinibacillus aneurinilyticus</i> btDSCE01 (MF359591)	PP şerit	%24.4	Skariyachan vd., 2018

Tablo 2'nin devamı

Bakteriler	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Brevibacillus agri</i> btDSCE02 (MF359592)	PP şerit	%21.2	Skariyachan vd., 2018
<i>Achromobacter denitrificans</i> Eb113 (OK274068)	PVC mikroplastik	% 12.3	Maleki vd., 2022
<i>Vibrio</i> sp. starin T-1.3 (MT919396)	PVC film	% 1.1-1.23	Khandare vd., 2021
<i>Altermonas</i> sp. starin BP-4.3 (MT907447)	PVC film	% 1.0-1.73	Khandare vd., 2021
<i>Cobetia</i> sp. starin S-237 (MT907446)	PVC film	%0.9-1.23	Khandare vd., 2021
<i>Pseudomonas citronellolis</i> (DSM 50083)	Waste PVC film	% 18.58	Giacomucci vd., 2019
<i>Priestia aryabhatai</i> VT 3.12 (OK135732.1)	PET films	%69.23	Dhaka vd., 2022
<i>Rhococcus</i> sp. SSM1 (MN045174)	PET films	%30.52	Kumar vd., 2020
<i>Alicyclophilus denitrificans</i> BQ ₁	PS-PU	%85	Fuentes-Jaime vd., 2022
<i>Pseudomonas</i> sp. AKS31 (KY849590)	PU films	%30	Roy vd., 2021
<i>Acinetobacter johnsonii</i> JNU01	PS film	% 1.52	Kim vd., 2021
<i>Pseudomonas lini</i> JNU01	PS film	% 1.45	Kim vd., 2021
<i>Exiguobacterium</i> sp. DR11 (MG645229)	PS chips	%0.4	Chauhan vd., 2018
<i>Exiguobacterium</i> sp. DR14 (MG645233)	PS chips	%,0.44	Chauhan vd., 2018

5.1.2. Mikroplastiklerin biyodegradasyonunda kullanılan fungus türleri

Çalışmada Tablo3'te funguslar ile yapılan mikroplastik giderim çalışmaları özetlenmiştir. Yapılan çalışmalara göre, LPDE plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %95 oranıyla *Alternaria alternata* FB1 (Gao vd., 2022) fungi suşu, en düşük seviyede ise %18 oranıyla *Aspergillus nidulans* E1, 2 (MG779511) (Muhonja vd., 2018) fungi suşu; PE plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %58.51 oranıyla *Aspergillus terreus* MANGF1 suşu konsorsiyum oluşturularak *A. Sydowii* suşu PNPf15/TS suşu eklenmiştir, en düşük seviyede ise %37.94 oranıyla *Penicillium chrysogenum* ERNF1 fungi suşu tespit edilmiştir (Sangale vd., 2019); PET plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %22 oranıyla *Aspergillus* sp. (MH119104.1) (Sarkhel vd., 2020) fungi suşu, en düşük seviyede ise %0.16 oranıyla *Microsphaeropsis arundinis* CBMAI 2110 (Malafatti-Picca vd., 2019) fungi suşu; PU plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %88.84 oranıyla *Embarria clematidis* (KT306593) (Khruengsai vd., 2022) fungi suşu, en düşük seviyede ise %05-20 oranıyla *Aspergillus* sp. Strain S45 (KU948302) (Osman vd, 2018) fungi suşu ve PS plastik biyodegradasyonunda en yüksek seviyede %2.17 oranıyla *Cephalosporium* sp. NCIM 1251 fungi suşu, en düşük seviyede ise %1.81 oranıyla *Mucor* sp. NCIM 881 fungi suşu tespit edilmiştir (Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b).

Tablo 3. Funguslar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Funguslar	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	Kaynak
<i>Alternaria alternata</i> FB1	LDPE film	%95	Gao vd., 2022
<i>Penicillium citrinum</i> CF-3 (MT597828.1)	LDPE	%38.82	Khan vd., 2023
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	HDPE	%7.18	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020a
<i>Aspergillus terreus</i> MANGF1	PE şerit	%58.51	Sangale vd., 2019
<i>Aspergillus terreus</i> BAYF5	PE şerit	%41.82	Sangale vd., 2019
<i>Penicillium chrysogenum</i> ERNF1	PE şerit	%37.94	Sangale vd., 2019
<i>Aspergillus oryzae</i> strain A5, 1 (MG779508)	LDPE	%36.4	Muhonja vd., 2018
<i>Aspergillus fumigatus</i> strain B2, 2 (MG779513)	LDPE	%24	Muhonja vd., 2018
<i>Aspergillus nidulans</i> E1, 2 (MG779511)	LDPE	%18	Muhonja vd., 2018
<i>Coriolus versicolor</i>	PP	%13.17	Kord vd., 2021
<i>Trichoderma hamatum</i> HF4	PVC film	%29.3	Novotný vd., 2022
<i>Penicillium simplicissimum</i> 28f2	PET	%3.09	Moyses vd., 2021
<i>Aspergillus</i> sp. (MH119104.1)	PET	%22	Sarkhel vd., 2020
<i>Microsphaeropsis arundinis</i> CBMAI 2109	PET şişe	%0.5	Malafatti-Picca vd., 2019
<i>Microsphaeropsis arundinis</i> CBMAI 2110	PET şişe	%0.16	Malafatti-Picca vd., 2019
<i>Embarria clematidis</i> (KT306593)	PU	%88.84	Khruengsai vd., 2022
<i>Alternaria</i> sp. (MH410558)	PU film	%3.2	Magnin vd., 2019
<i>Penicillium</i> section Lanata-Divaricata (MH410559)	PU film	%8.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> section flavi (MH594856)	PU films	%1.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> sp. Strain S45 (KU948302)	PU films	%05-20	Osman vd, 2018
<i>Cephalosporium</i> strain NCIM 1251	PS films	%20.62	Chaudhary vd., 2021
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	PS şerit	%2.17	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Mucor</i> sp. NCIM 881	PS şerit	%1.81	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Alternaria</i> sp. (MH410558)	PU film	%3.2	Magnin vd., 2019
<i>Penicillium</i> section Lanata-Divaricata (MH410559)	PU film	%8.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> section flavi (MH594856)	PU films	%1.9	Magnin vd., 2019
<i>Aspergillus</i> sp. Strain S45 (KU948302)	PU films	%05-20	Osman vd, 2018
<i>Cephalosporium</i> strain NCIM 1251	PS films	%20.62	Chaudhary vd., 2021
<i>Cephalosporium</i> sp. NCIM 1251	PS şerit	%2.17	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b
<i>Mucor</i> sp. NCIM 881	PS şerit	%1.81	Chaudhary ve Vijayakumar, 2020b

5.1.3. Algler-Mikroalgler ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Mikroalglerle yapılan mikroplastik biyodegradasyon çalışmasında, Sarmah ve Rout (2018) LPDE plastik biyodegradasyonunda *Phormidium lucidum*, *Oscillatoria subbrevis* alg suşları ile %30 biyodegradasyon gerçekleştirildiğini tespit edilmiştir.

5.1.4. Larvalar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Mikroplastik gideriminde çeşitli larvalar ile mikroorganizmaların oluşturduğu birlikler ve larvaların giderim kapasiteleri de belirlenmiştir. Yapılan çalışmalara dair plastik biyodegradasyon verileri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Larvalar ile yapılan plastik biyodegradasyonu ile ilgili çalışmalar

Larva	Plastik Ürünü	Plastik Biyodegradasyonu	
<i>Galleria mellonella</i>	LDPE	% 7	Barrionuevo vd., 2022
<i>Tenebrio molitor</i>	LDPE	% 3.33	Yang vd., 2021
<i>G. mellonella</i>	HDPE	% 3.9025	Zhang vd., 2020
<i>T. molitor</i>	PE	% 5.92	Przemieniecki vd., 2020
<i>Achroia grisella</i>	PE Films	% 1.46	Kundungal vd., 2019
<i>Lumbricus terrestris</i>	LDPE	53.1–41.3	Lwanga vd., 2018
<i>T. molitor</i>	PP	% 1.0	Yang vd., 2021
<i>T. molitor</i>	PVC	% 36.62	Peng vd., 2020
<i>G. mellonella</i>	PS	% 22	Wang vd., 2022b
<i>G. mellonella</i>	PS film	% 12.97	Jiang vd., 2021
<i>G. mellonella</i>	PS film	% 27.94	Lou vd., 2020
<i>Achatina fulica</i>	PS	% 18.5	Song vd., 2020
<i>Tribolium castaneum</i>	PS film	% 12.14	Wang vd., 2020
<i>Z. atratus</i>	PS	% 1.36	Kim vd., 2020

Mikroplastiklerin en yaygın tiplerinden biri olan LPDE plastik biyodegradasyonunda *Lumbricus terrestris* türü larvasının *Microbacterium awajiense*, *Rhodococcus jostii*, *Mycobacterium vanbaalenii*, *Streptomyces fulvissimus*, *Bacillus simplex* ve *Bacillus* sp. bakteri suşları ile konsorsiyumu en yüksek seviyede biyodegradasyon gerçekleştirdiği tespit edilirken (Lwanga vd., 2022), en düşük giderim oranı ise *Tenebrio molitor* türü larvası ile gözlemlenmiştir (Yang vd., 2021). Benzer olarak PE plastik biyodegradasyonunda en yüksek oran *Clostridium*, *Pantoea*, *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *Elizabethkinga* konsorsiyumu ile *Tenebrio molitor* larvası tarafından sağlanırken (Przemieniecki vd., 2020), en düşük giderim oranı *Achroia grisella* türü larvası ile tespit edilmiştir (Kundungal vd., 2019). Ayrıca PVC biyodegradasyonunda Streptococcaceae, Spiroplasmataceae, Enterobacteriaceae ve Clostridiaceae familyaları konsorsiyumu ile *T. molitor* türü larvası ile biyodegradasyon (%36.62) gözlemlenmiştir (Peng vd., 2020). *Galleria mellonella* türü larvası ile PS biyodegradasyonu gerçekleştirilebilmiş ancak en düşük giderim oranının *Pseudomonas*

aeruginosa suşu ile konsorsiyum oluşturulan *Zophobas atratus* türü larvası (%1.36) ile olduğu belirlenmiştir.

6. Sonuçlar

Mikroplastikler ve NP'ler yüksek taşınma kapasitesi ve yüksek hareketliliğe sahiptir. Bu nedenle MP ve NP partiküllerinin buldukları ortamlarla etkileşim potansiyelleri yüksektir. Günümüzde, plastikleri parçalayabilen özellikle funguslar olmak üzere çeşitli organizmalar ve bu organizmalara ait enzimler ve/veya metabolik yollar tespit edilmiş ve parçalanma mekanizmalarına dair temel bir yaklaşım ve bilgi birikimi oluşmuştur. Derlememiz, bu alandaki son araştırmaları (2020-2024) özetleyerek biyolojik bozunmayı sağlayan canlılara genel bir bakış sağlamıştır. Biyolojik olarak parçalanabilen polimerlere etki eden mikroorganizmalar ve enzimler hakkında temel birçok çalışma bulunmakla birlikte farklı plastik bozunma potansiyellerine sahip suşlar ve enzimlerle ilişkili genleri ve metabolik yollar önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Uzun vadede, biyolojik bozunma veya biyo-geri dönüşüm ve plastik atıkların iyileştirilmesinde elde edilecek başarılar, dünya genelinde plastik atıkların sürdürülebilir şekilde yönetilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Biyolojik bozunmanın laboratuvar ortamında doğrulanmasından, bu yöntemlerin pratik uygulamalarına kadar, plastik bozunması için yüksek verimli adayların keşfi veya yapımını gerektiren önemli bilgi boşlukları mevcuttur. Genetik mühendisliği ve biyoinformatik yoluyla hedefe yönelik ıslah sağlanarak, plastik atık kirliliğinin etkili bir şekilde arıtılması için potansiyel oluşturulabilir. Ayrıca mikrobiyal gruplar ve özellikle enzimatik yollar hakkında yapılacak araştırmalar ile plastik kirliliği üzerinde yenilikçi ve sürdürülebilir bir yaklaşım ortaya konabilecektir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Albertsson, A.C., Sares, C. & Karlsson, S. (1993). Increased biodegradation of LDPE with nonionic surfactant. *Acta Polym.* 44 (5), 243–246.

Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A. & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of The Total Environment* 771, 144719.

Ali, W., Buriro, R. S., Gandahi, J. A., Chen, Y., ul Aabdin, Z., Bhutto, S. & Zou, H. (2024). A critical review on male-female reproductive and developmental toxicity induced by micro-plastics and nano-plastics through different signaling pathways. *Chemico-Biological Interactions* 110976.

Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*,25(1), 53-64.

Amin, R., Sohaimi, E.S., Anuar, S.T. & Bachok, Z. (2020). Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110616.

Andrady, A.L., (2011). Microplastic in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1596–1605.

Asiandu, A. P., Wahyudi, A. & Sari, S. W. (2022). Aquatic plastics waste biodegradation using plastic degrading microbes. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 11(5), e3724-e3724.

- Barboza, L. G. A., Cózar, A., Gimenez, B. C., Barros, T. L., Kershaw, P. J. & Guilhermino, L. (2019). Macroplastics pollution in the marine environment. *In World seas: An environmental evaluation* (pp. 305-328).
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Barrionuevo, J.M.R., Martín, E., Cardona, A.G., Malizia, A., Chalup, A., de Cristóbal, R.E. & Garzia, A.C.M., (2022). Consumption of low-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene materials by larvae of the greater wax moth, *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera, Pyralidae), impacts on their ontogeny. *Environ. Sci. Pollut. R.* 29, 68132–68142.
- Baskaran, S., Finelli, R., Agarwal, A. & Henkel, R. (2021). Reactive oxygen species in male reproduction: A boon or a bane?. *Andrologia*, 53(1), e13577,
- Bejgarn, S., MacLeod, M., Bogdal, C. & Breitholtz, M. (2015). Toxicity of leachate from weathering plastics: An exploratory screening study with *Nitocra spinipes*. *Chemosphere*, 132, 114-119,
- Besseling, E., Foekema, E.M., Van Franeker, J.A., Leopold, M.F., Kuhn, S., Bravo Rebolledo, E.L., Hesse, E., Mielke, L.J.I.J., Kamminga, P. & Koelmans, A.A. (2015). Microplastic in a macro filter feeder: humpback whale *Megaptera novaeangliae*. *Mar. Pollut. Bull.* 95, 248–252,
- Brown, A.E. 1945. The problem of fungal growth on synthetic resins. *Mod. Plast.* 23, 189.
- Browne, M. A., M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T. & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9175–9179.
- Bunty Sharma, Himanshi Rawat, Pooja & Ruchika Sharma. (2017). Bioremediation-A Progressive Approach toward Reducing Plastic Wastes. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 6(12): 1116-1131.
- Cauwenberghe, L. & Janssen, C.R. (2014). Microplastic in bivalves cultured for human consumption. *Environ. Pollut.* 193, 65–70.
- Chaudhary, A. K., Chaitanya, K. & Vijayakumar, R. P. (2021). Synergistic effect of UV and chemical treatment on biological degradation of Polystyrene by *Cephalosporium* strain NCIM 1251. *Archives of Microbiology*, 203, 2183-2191.
- Chaudhary, A.K. & Vijayakumar, R.P. (2020a). Effect of chemical treatment on biological degradation of high-density polyethylene (HDPE). *Environ. Dev. Sustain.* 22(2), 1093-1104.
- Chaudhary, A.K. & Vijayakumar, R.P., (2020b). Studies on biological degradation of polystyrene by pure fungal cultures. *Environ. Dev. Sustain.* 22(5), 4495-4508.
- Chauhan, D., Agrawal, G., Deshmukh, S., Sinha Roy, S. & Priyadarshini, R., (2018). Biofilm formation by *Exiguobacterium* sp. DR11 and DR14 alter polystyrene surface properties and initiate biodegradation. *Rsc Adv.* 8(66), 37590-37599.
- Chen, G., Feng, Q. & Wang, J. (2020a). Mini-review of microplastic in the atmosphere and their risks to humans. *Sci. Total Environ.* 703, 135504.

- Chen, G.L., Fu, Z.L., Yang, H.R. & Wang, J. (2020b). An overview of analytical methods for detecting microplastic in the atmosphere. *TrAC Trends Anal. Chem.* 130, 115981.
- Courtene-Jones, W., Quinn, B., Gary, S.F., Mogg, A.O.M. & Narayanaswamy, B.E., (2017). Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough. North Atlantic Ocean. *Environ. Pollut.* 231, 271–280.
- Cox, K.D., Covernton, G.A., Davies, H.L., Dower, J.F., Juanes, F. & Dudas, S.E. (2019). Human consumption of microplastic. *Environ. Sci. Technol.* 53, 7068–7074.
- Desforges, J.P.W., Galbraith, M. & Ross, P.S., (2015). Ingestion of Microplastic by Zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 69, 320–330.
- Desforges, J.P.W., Galbraith, M., Dangerfield, N. & Ross, P.S., (2014). Widespread distribution of microplastic in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 79, 94–99.
- Dhaka, V., Singh, S., Ramamurthy, P. C., Samuel, J., Swamy Sunil Kumar Naik, T., Khasnabis, S., & Singh, J. (2023). Biological degradation of polyethylene terephthalate by rhizobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*,30(55), 116488-116497.
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V. & Tassin, B., (2017). A first overview of textile fibers, including microplastic, in indoor and outdoor environments. *Environ. Pollut.* 221, 453–458.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C. & Tassin, B., (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastic in the environment. *Mar. Pollut. Bull.* 104, 290–293.
- Faccia, P.A., Pardini, F.M., Agnello, A.C., Amalvy, J.I. & Del Panno, M.T., (2021). Degradability of poly(ether-urethanes) and poly(ether-urethane)/acrylic hybrids by bacterial consortia of soil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 160, 105205.
- Fisner, M., Majer, A., Taniguchi, S., Bicego, M., Turra, A. & Gorman, D. (2017). Colour spectrum and resin-type determine the concentration and composition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in plastic pellets. *Mar. Pollut. Bull.* 122, 323–330.
- Fuentes-Jaime, J., Vargas-Suárez, M., Cruz-Gómez, M.J. & Loza-Tavera, H., 2022. Concerted action of extracellular and cytoplasmic esterase and urethane-cleaving activities during Impranil biodegradation by *Alicyclophilus denitrificans* BQ1. *Biodegradation* 33(4), 389-406.
- Funazukuri, T. (2015). Hydrothermal Depolymerization of Polyesters and Polycarbonate in the Presence of Ammonia and Amines. *Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques.*
- Galvão, A., Aleixo, M., De Pablo, H., Lopes, C. & Raimundo, J. (2020). Microplastic in wastewater: microfiber emissions from common household laundry. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 26643-26649,
- Gamage, P.L., Ren, Y.X., Slape, C.M., Ambike, I.M., Wallace, A.C., Fiedler, A.K., González, J.E., Biewer, M.C., Zimmern, P. & Stefan, M.C., (2019). Oxidative degradation of polypropylene mesh in *E. coli* Environment. *Acs Appl. Bio. Mater.* 2(9), 4027-4036.

- Gao, R., Liu, R. & Sun, C. (2022). A marine fungus *Alternaria alternata* FB1 efficiently degrades polyethylene. *J. Hazard. Mater.* 431, 128617
- Gewert, B., Plassmann, M. M. & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental science: processes & impacts*, 17(9), 1513-1521.
- Ghosh, S., Qureshi, A. & Purohit, H. J. (2019). Microbial degradation of plastics: Biofilms and degradation pathways. *Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation*, 1, 184-199.
- Giacomucci, L., Raddadi, N., Soccio, M., Lotti, N. & Fava, F., (2019). Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*. *New Biotechnol.* 52, 35-41.
- Gigault, J., El Hadri, H., Nguyen, B., Grassl, B., Roweczyk, L., Tufenkji, N., Feng, S. & Wiesner, M., (2021). Nanoplastics are neither microplastic nor engineered nanoparticles. *Nat. Nanotechnol.* 16, 501–507,
- Golwala, H., Zhang, X., Iskander, S.M. & Smith, A.L. (2021). Solid waste: an overlooked source of mikroplastik to the environment. *Sci. Total Environ.* 769, 144581.
- Guo, J.J., Huang, X.P., Xiang, L., Wang, Y.Z., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H. & Wong, M.H. (2020). Source, migration and toxicology of mikroplastik in soil. *Environ. Int.* 137, 105263.
- Habib, S., Iruthayam, A., Abd Shukor, M.Y., Alias, S.A., Smykla, J. & Yasid, N.A. (2020). Biodeterioration of untreated polypropylene microplastic particles by antarctic bacteria. *Polymers* 12(11), 2616.
- Hardy, C., Kociok-Köhn, G., & Buchard, A. (2022). UV degradation of poly (lactic acid) materials through copolymerisation with a sugar-derived cyclic xanthate. *Chemical Communications*,58(36), 5463-5466.
- Hartmann, N. B., Huffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E. & Wagner, M. (2019) Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*. Vol53, Issue 3, 1039-1047.
- He, D.F., Luo, Y.M., Lu, S.B., Liu, M.T., Song, Y. & Lei, L.L. (2018). Microplastic in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends Anal. Chem.* 109, 163–172.
- Hernandez, E., Nowack, B. & Mitrano, D. M. (2017). Polyester textiles as a source of microplastic from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing. *Environmental science & technology*, 51(12), 7036-7046.
- Hou, C. C., & Zhu, J. Q. (2017). Nanoparticles and female reproductive system: how do nanoparticles affect oogenesis and embryonic development. *Oncotarget*, 8(65), 109799.
- Hougaard, K. S. (2021). Next generation reproductive and developmental toxicology: Crosstalk into the future. *Frontiers in Toxicology*, 3, 652571.
- Jelnes, J. E. (1988). Semen quality in workers producing reinforced plastic. *Reproductive Toxicology*, 2(3-4), 209-212.

- Jeon, J.-M., Park, S.-J., Choi, T.-R., Park, J.-H., Yang, Y.-H. & Yoon, J.-J. (2021). Biodegradation of polyethylene and polypropylene by *Lysinibacillus* species JJY0216 isolated from soil grove. *Polym. Degrad. Stabil.* 191, 109662.
- Jeong, C.B., Won, E.J., Kang, H.M., Lee, M.C., Hwang, D.S., Hwang, U.K., Zhou, B., Souissi, Lee, S.J. & Lee, J.S. (2016). Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-jnk and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environ. Sci. Technol.* 50, 8849–8857,
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J. & Wang, Z. (2021). Isolation, identification, and characterization of polystyrene-degrading bacteria from the gut of *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) Larvae. *Front. Bioeng. Biotech.* 9.
- Kannan, K. & Vimalkumar, K. A. (2021). Review of human exposure to mikroplastik and insights into microplastic as obesogens. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 724989.
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K. & Hinata, H. (2019). Assessment of the sources and inflow processes of microplastic in the river environments of Japan. *Environ. Pollut.* 244, 958–965.
- Khan, S., Ali, S. A. & Ali, A. S. (2023). Biodegradation of low density polyethylene (LDPE) by mesophilic fungus '*Penicillium citrinum* isolated from soils of plastic waste dump yard, Bhopal, India. *Environmental Technology*, 44(15), 2300-2314.
- Khandare, S.D., Agrawal, D., Mehru, N. & Chaudhary, D.R., (2022). Marine bacterial based enzymatic degradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic. *J. Environ. Chem. Eng.* 10(3), 107437. doi: 10.1016/j.jece.2022.107437.
- Khruengsai, S., Sripahco, T. & Pripdeevech, P. (2022). Biodegradation of polyester polyurethane by *Embarria clematidis*. *Front. Microbiol.* 13, 874842.
- Kim, H.R., Lee, H.M., Yu, H.C., Jeon, E., Lee, S., Li, J.J. & Kim, D.H. (2020). Biodegradation of Polystyrene by *Pseudomonas* sp. isolated from the gut of superworms (larvae of *Zophobas atratus*). *Environ. Sci. Technol.* 54(11), 6987-6996.
- Kim, S. H., Cho, J. Y., Hwang, J. H., Kim, H. J., Oh, S. J., Kim, H. J. & Yang, Y. H. (2023). Revealing the key gene involved in bioplastic degradation from superior bioplastic degrader *Bacillus* sp. JY35. *International Journal of Biological Macromolecules*, 244, 125298.
- Kord, B., Ayrilmis, N. & Ghalehno, M.D., (2021). Effect of fungal degradation on technological properties of carbon nanotubes reinforced polypropylene/rice straw composites. *Polym. Polym. Compos.* 29(5), 303-310.
- Kumar, A.G., Hinduja, M., Sujitha, K., Rajan, N.N. & Dharani, G., (2021). Biodegradation of polystyrene by deep-sea *Bacillus paralicheniformis* G1 and genome analysis. *Sci. Total. Environ.* 774, 145002
- Kumar, V., Maitra, S. S., Singh, R., & Burnwal, D. K. (2020). Acclimatization of a newly isolated bacteria in monomer tere-phthalic acid (TPA) may enable it to attack the polymer poly-ethylene terephthalate (PET). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103977.

- Kundungal, H., Gangarapu, M., Sarangapani, S., Patchaiyappan, A. & Devipriya, S.P., (2019). Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). *Environ. Sci. Pollut. R.* 26(18), 18509-18519.
- Lei, L.L., Wu, S.Y., Lu, S.B., Liu, M.T., Song, Y., Fu, Z.H. & Shi, H.H. (2018). Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Sci. Total Environ.* 619, 1–8.
- Li, J., Liu, H. & Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Res.* 137, 362–374.
- Liu, X., Zhang, Y., Sun, Q., Liu, Z., Zhao, Y., Fan, A. & Su, H. (2022). Rapid colonization and biodegradation of untreated commercial polyethylene wrap by a new strain of *Bacillus velezensis* C5. *J. Environ. Manage.* 301, 113848.
- Liu, Z., Yu, P., Cai, M., Wu, D., Zhang, M., Huang, Y. & Zhao, Y. (2019). Polystyrene nanoplastic exposure induces immobilization, reproduction, and stress defense in the freshwater cladoceran *Daphnia pulex*. *Chemosphere* 215, 74–81.
- Llorca, M., Schirinzi, G., Martinez, M., Barcelo, D. & Farre, M. (2018). Adsorption of perfluoroalkyl substances on microplastic under environmental conditions. *Environ. Pollut.* 235, 680–691.
- Lou, Y., Ekaterina, P., Yang, S.-S., Lu, B., Liu, B., Ren, N., Corvini, P.F.-X. & Xing, D., (2020). Biodegradation of polyethylene and polystyrene by greater wax moth larvae (*Galleria mellonella* L.) and the effect of co-diet supplementation on the core gut microbiome. *Environ. Sci. Technol.* 54(5), 2821-2831.
- Lwanga, E. H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753-757.
- Magnin, A., Hoornaert, L., Pollet, E., Laurichesse, S., Phalip, V. & Avérous, L. (2019). Isolation and characterization of different promising fungi for biological waste management of polyurethanes. *Microb. Biotechnol.* 12(3), 544-555.
- Malafatti-Picca, L., de Barros Chaves, M.R., de Castro, A.M., Valoni, É., de Oliveira, V.M., Marsaioli, A.J., de Franceschi de Angelis, D. & Attili-Angelis, D., (2019). Hydrocarbon-associated substrates reveal promising fungi for poly (ethylene terephthalate) (PET) depolymerization. *Braz. J. Microbiol.* 20, 633–648.
- Maleki Rad, M., Moghimi, H. & Azin, E., (2022). Biodegradation of thermo-oxidative ve low-density polyethylene (LDPE) and polyvinyl chloride (PVC) microplastic by *Achromobacter denitrificans* Ebl13. *Mar. Pollut. Bull.* 181, 113830.
- Mills, J., & Klausmeier, R. E. 1(974). The biodeterioration of synthetic polymers and plasticizers. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 4(1-4), 341-351.
- Montazer, Z., Habibi-Najafi, M.B., Mohebbi, M. & Oromiehei, A. (2018). Microbial degradation of UV-ve low-density polyethylene films by novel polyethylene-degrading bacteria isolated from plastic-dump soil. *J. Polym. Environ.* 26, 3613–3625.

- Moyses, D.N., Teixeira, D.A., Waldow, V.A., Freire, D.M.G. & Castro, A.M., (2021). Fungal and enzymatic bio-depolymerization of waste post-consumer poly(ethylene terephthalate) (PET) bottles using *Penicillium* species. *3 Biotech* 11(10), 435.
- Muhonja, C.N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M., (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *Plos One* 13(7), e0198446.
- Nag, M., Lahiri, D., Dutta, B., Jadav, G. & Ray, R.R., (2021). Biodegradation of used & polyethylene bags by a new marine strain of *Alcaligenes faecalis* LNDR-1. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 41365–41379.
- Nanthini Devi, K., Raju, P., Santhanam, P., Dinesh Kumar, S., Krishnaveni, N., Roopavathy, J. & Perumal, P., (2021). Biodegradation of low-density polyethylene and polypropylene by microbes isolated from Vaigai River, Madurai, India. *Arch. Microbiol.* 203(10), 6253-6265.
- Novotný, C., Fojtík, J., Mucha, M. & Malachová, K., (2022). Biodeterioration of compost-ve polyvinyl chloride films by microorganisms isolated from weathered plastics. *Front. Bioeng. Biotech.* 10, 832413.
- Osman, M., Satti, S.M., Luqman, A., Hasan, F., Shah, Z. & Shah, A.A., (2018). Degradation of polyester polyurethane by *Aspergillus* sp. strain S45 isolated from soil. *J. Polym. Environ.* 26(1), 301-310.
- Peng, B.-Y., Chen, Z., Chen, J., Yu, H., Zhou, X., Criddle, C.S., Wu, W.-M. & Zhang, Y., (2020). Biodegradation of polyvinyl chloride (PVC) in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae. *Environ. Int.* 145, 106106.
- Przemieniecki, S.W., Kosewska, A., Ciesielski, S. & Kosewska, O., (2020). Changes in the gut microbiome and enzymatic profile of *Tenebrio molitor* larvae biodegrading cellulose, polyethylene and polystyrene waste. *Environ. Pollut.* 256, 113265.
- Rahimi, A. & García, J. M. (2017). Chemical recycling of waste plastics for new materials production. *Nature Reviews Chemistry*, 1(6), 0046.
- Rahman, A., Sarkar, A., Yadav, O.P., Achari, G. & Slobodnik, J. (2021). Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and mikroplastik and knowledge gaps: a scoping review. *Sci. Total Environ.* 757, 143872.
- Rehse, S., Kloas, W. & Zarfl, C. (2018). Microplastic reduce short-term effects of environmental contaminants. part i: effects of bisphenol a on freshwater zooplankton are lower in presence of polyamide particles. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 280.
- Rillig, M.C. & Lehmann, A. (2020). Microplastic in terrestrial ecosystems. *Science* 368, 1430–1431.
- Romera-Castillo, C., Pinto, M., Langer, T.M., Alvarez-Salgado, X.A. & Herndl, G.J. (2018). Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean. *Nat. Commun.* 9, 1430.
- Roy, R., Mukherjee, G., Das Gupta, A., Tribedi, P. & Sil, A. K. (2021). Isolation of a soil bacterium for remediation of polyurethane and low-density polyethylene: a promising tool towards sustainable cleanup of the environment. *3 Biotech*, 11, 1-14.

- Ru, J., Huo, Y., & Yang, Y. (2020). Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Frontiers in Microbiology*, 11, 507487.
- Ruslan, R., Iqbal, M., Pekey, A.Y., Dewi, A.P. & Djamaan, A., (2018). Isolation and characterization of polystyrene-degrading bacteria *Bacillus* sp. ITP 10.1.1 from soil sample of Jayawijaya mountains, Papua, Indonesia. *Int. Res. J. Pharm.* 9(10), 85-88.
- Sa, L.C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T.L. & Futter, M.N. (2018). Studies of the effects of microplastic on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future?. *Sci. Total Environ.* 645, 1029–1039.
- Samrot, A. V., & Noel Richard Prakash, L. X. (2023). Nanoparticles induced oxidative damage in reproductive system and role of antioxidants on the induced toxicity. *Life*, 13(3), 767.
- Sangale, M.K., Shahnawar, M. & Ade, A.B., (2019). Potential of fungi isolated from the dumping sites mangrove rhizosphere soil to degrade polythene. *Sci. Rep.* 9, 5390.
- Sangeetha Devi Ramya, R., Kannan, K., Antony, A. R. & Kannan, V. R. (2019). Investigation of biodegradation potentials of high density polyethylene degrading marine bacteria isolated from the coastal regions of Tamil Nadu, India. *Marine pollution bulletin*, 138, 549-560.
- Santillo, D., Miller, K. & Johnston, P. (2017). Microplastic as contaminants in commercially important seafood species. *Integr. Environ. Assess Manag.* 13, 516–521.
- Santos, T., Varela, J., Lynch, I., Salvati, A. & Dawson, K. A. (2011). Effects of transport inhibitors on the cellular uptake of carboxylated polystyrene nanoparticles in different cell lines. *PloS one*, 6(9), e24438.
- Sarkhel, R., Sengupta, S., Das, P. & Bhowal, A., (2020). Comparative biodegradation study of polymer from plastic bottle waste using novel isolated bacteria and fungi from marine source. *J. Polym. Res.* 27(1), 16.
- Savoca, S., Capillo, G., Mancuso, M., Bottari, T., Crupi, R., Branca, C., Romano, V., Faggio, C., D'Angelo, G. & Spano, N. (2019). Mikroplastik occurrence in the Tyrrhenian waters and in the gastrointestinal tract of two congener species of seabreams. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 67, 35–41.
- Shahsavaripour, M., Abbasi, S., Mirzaee, M. & Amiri, H. (2023). Human occupational exposure to mikroplastik: a cross-sectional study in a plastic products manufacturing plant. *Sci. Total Environ.* 882, 163576.
- Silva, A.L., Prata, J.C., Walker, T.R., Duarte, A.C., Ouyang, W., Barcelo, D. & Rocha-Santos, T. (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: challenges and recommendations. *Chem. Eng. J.* 405, 126683.
- Skariyachan, S., Patil, A.A., Shankar, A., Manjunath, M., Bachappanavar, N. & Kiran, S., (2018). Enhanced polymer degradation of polyethylene and polypropylene by novel thermophilic consortia of *Brevibacillus* sps. and *Aneurinibacillus* sp. screened from waste management landfills and sewage treatment plants. *Polym. Degrad. Stabil.* 149, 52-68.
- Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Jung, S. W. & Shim, W. J. (2017). Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environmental science & technology*, 51(8), 4368-4376.

- Song, Y., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Zhang, X., Chen, Y., Wu, W.-M. & He, D., (2020). Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails *Achatina fulica*. *Sci. Total Environ.* 746, 141289.
- Stubbins, A., Zhu, L., Zhao, S., Li, D., Bittar, T. B., Spencer, R. G., Law & K. L. L. (2020). Photochemical dissolution of buoyant mikroplastik to dissolved organic carbon: Rates and microbial impacts. *In Ocean Sciences Meeting*.
- Sun, J., Qu, H., Ali, W., Chen, Y., Wang, T., Ma, Y. & Zou, H. (2023). Co-exposure to cadmium and mikroplastik promotes liver fibrosis through the hemichannels-ATP-P2X7 pathway. *Chemosphere*, 344, 140372.
- Sun, J., Zheng, H., Xiang, H., Fan, J. & Jiang, H. (2022). The surface degradation and release of mikroplastik from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Sci. Total Environ.* 838, 156369.
- Sun, W., Zhang, Y., Zhang, H., Wu, H., Liu, Q., Yang, F. & Zhang, W. (2024). Exploitation of *Enterobacter hormaechei* for biodegradation of multiple plastics. *Science of The Total Environment*, 907, 167708.
- Tarafdar, A., Lee, J. U., Jeong, J. E., Lee, H., Jung, Y., Oh, H. B., & Kwon, J. H. (2021). Biofilm development of *Bacillus siamensis* ATKU1 on pristine short chain low-density polyethylene: a case study on microbe-mikroplastiks interaction. *J. Hazard. Mater.* 409, 124516.
- Thakur, B., Singh, J., Singh, J., Angmo, D. & Vig, A. P. (2023). Biodegradation of different types of mikroplastiks: Molecular mechanism and degradation efficiency. *Sci. Total Environ.* 877, 162912.
- Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic. *Science*, 304(5672), 838-838.
- Terepocki, A.K., Brush, A.T., Kleine, L.U., Shugart, G.W. & Hodum, P. (2017). Size and dynamics of mikroplastik in gastrointestinal tracts of Northern Fulmars (*Fulmarus glacialis*) and Sooty Shearwaters (*Ardenna grisea*). *Mar. Pollut. Bull.* 116, 143–150.
- Wang, C., Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C. & Hou, D. (2022). Soil plastisphere: exploration methods, influencing factors, and ecological insights. *J. Hazard. Mater.* 430, 128503.
- Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G. & Zhang, P. (2019). Mikroplastik as contaminants in the soil environment: a mini-review. *Sci. Total Environ.* 691, 848–857.
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.J. & Kopittke, P.M. (2016). Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712.
- Wang, P., Zhao, J., Ruan, Y., Cai, X., Li, J., Zhang, L. & Huang, H., (2022a). Degradation of polypropylene by the *Pseudomonas aeruginosa* strains LICME WZH-4 and WGH-6. *J. Polym. Environ.* 30(9), 3949-3958.
- Wang, S., Shi, W., Huang, Z., Zhou, N., Xie, Y., Tang, Y., Hu, F., Liu, G. & Zheng, H., 2022b. Complete digestion/biodegradation of polystyrene mikroplastiks by greater wax moth (*Galleria mellonella*) larvae: Direct in vivo evidence, gut microbiota independence, and potential metabolic pathways. *J. Hazard. Mater.* 423, 127213.

- Wang, Y.L., Lee, Y.H., Chiu, I.J., Lin, Y.F. & Chiu, H.W. (2020). Potent impact of plastic nanomaterials and micromaterials on the food chain and human health. *Int. J. Mol. Sci.* 21, 1727.
- Webb, H. K., Arnott, J., Crawford, R. J. & Ivanova, E. P. (2012). Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly (ethylene terephthalate). *Polymers*, 5(1), 1-18.
- Wick, P. & Malek, A., Manser, P., Meili, D., Maeder-Althaus, X., Diener, L. & von Mandach, U. (2010). Barrier capacity of human placenta for nanosized materials. *Environmental health perspectives*, 118(3), 432-436.
- Working, P. K. (1988). Male reproductive toxicology: comparison of the human to animal models. *Environmental health perspectives*, 77, 37-44.
- Wright, S.L., Rowe, D., Thompson, R.C. & Galloway, T.S. (2013). Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. *Curr. Biol.* 23, R1031–R1033.
- Yang, S. S., Wu, W. M., Pang, J. W., He, L., Ding, M. Q., Li, M. X. & Ding, J. (2023). Bibliometric analysis of publications on biodegradation of plastics: Explosively emerging research over 70 years. *Journal of Cleaner Production*, 139423.
- Yang, S.-S., Ding, M.-Q., He, L., Zhang, C.-H., Li, Q.-X., Xing, D.-F., Cao, G.-L., Zhao, L., Ding, J., Ren, N.-Q. & Wu, W.-M., 2021b. Biodegradation of polypropylene by yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) and superworms (*Zophobas atratus*) via gut microbe-dependent depolymerization. *Sci. Total. Environ.* 756, 144087.
- Yin, K., Wang, Y., Zhao, H., Wang, D., Guo, M., Mu, M. & Xing, M. A comparative review of microplastics and nanoplastics: Toxicity hazards on digestive, reproductive and nervous system. *Sci. Total. Environ.*, 774, 145758. 2021.
- Yousif, E. & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus* 2, 398.
- Yu, F., Yang, C., Zhu, Z., Bai, X., & Ma, J. (2019). Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment. *Sci. Total. Environ.*, 694, 133643.
- Yu, X.B., Ladewig, S., Bao, S.W., Toline, C.A., Whitmire, S. & Chow, A.T. (2018). Occurrence and distribution of microplastics at selected coastal sites along the southeastern United States. *Sci. Total Environ.* 613, 298–305.
- Zaini, N., Kasmuri, N., Mojiri, A., Kindaichi, T. & Nayono, S. E. (2024). Plastic pollution and degradation pathways: A review on the treatment Technologies. *Heliyon*.
- Zhang, J., Gao, D., Li, Q., Zhao, Y., Li, L., Lin, H., Bi, Q. & Zhao, Y. (2020). Biodegradation of polyethylene microplastic particles by the fungus *Aspergillus flavus* from the guts of wax moth *Galleria mellonella*. *J. Hazard. Mater.* 704, 135931.
- Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K., Wu, C. & Lam, P. K. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554.