KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EVSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA BULUNAN MİKROPLASTİKLERİN OZON BAZLI OKSİDASYON PROSESLERİ İLE ARITILABİLİRLİĞİ

SİNEM KURU

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EVSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA BULUNAN MİKROPLASTİKLERİN OZON BAZLI OKSİDASYON PROSESLERİ İLE ARITILABİLİRLİĞİ

SİNEM KURU

Prof. Dr. Ayla ARSLAN		
Danışman,	**Kocaeli Ünivversitesi**	**.....**
Prof. Dr. Nevim GENÇ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof. Dr. Taner YONAR		
Jüri Üyesi,	**Bursa Uludağ Üniversitesi**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmasında,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/altyapı desteği ile desteklenmemiştir.

■ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler , BAP Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2022-2918 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Sinem KURU

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki makale, kitap, tebliğ, lisans, patent gibi çalışmalarda kullanımı, danışmanımın isim hakkı saklı kalmak koşuluyla ve her iki tarafın bilgisi dâhilinde bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

■ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Sinem KURU

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünyada su kaynaklarında kirliliği etkileyen mikroplastiklerin akıbetinin araştırılması, karakteristik yapısının ortaya konulması ve giderilebilmesi için farklı yöntemlerin kullanılması günümüzde önemli gündem konusu haline gelmiştir. Yapılan bu tez atıksu arıtma tesisi çıkışında bulunan mikroplastiklerin ozon bazlı oksidasyon proseslerinin kullanılması ile arıtılabilirliğinin araştırılması ve çıkan sonuçlar ile literatüre olumlu katkılar sağlamayı amaçlamaktadır.

Yüksek lisans tez dönemim boyunca ilk tanıştığımız andan itibaren bana bilgi ve birikimlerini aktaran, her zaman yanımda olan, deneysel çalışma ve tez yazım sürecinde desteğini esirgemeyen, akademik anlamda başarılı olmamı sağlamak için yoluma ışık tutan değerli Tez Danışman Hocam Prof. Dr. Ayla ARSLAN'a emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışması için yaptığımız deneysel çalışmalar boyunca laboratuvar ortamını bana sevdiren, yardımını ve bilgilerini eksik etmeyen, yanlış yaptığımda doğru yolu göstermekten kaçınmayan biricik Hocam Sayın Dr. Eylem TOPKAYA'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, BAP Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen FBA-2022-2918 nolu "Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Çıkış Sularında Mikroplastiklerin Tespiti ve Kontrol Yöntemleri" konulu proje kapsamında üretilmiştir. Bu projeye verdikleri destek için teşekkür ederim.

Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği BAP Mikroplastik projesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Sevil VELİ, Prof. Dr. Ayla ARSLAN, Dr. Eylem TOPKAYA, Araş. Gör. Mesut SEZER, Araş. Gör. Serdar AKSAN ve Zeynep SALİHOĞLU'na bilgi paylaşımları ve başarıyla devam eden proje sürecindeki yardımları için teşekkür ederim.

Yüksek lisans sürecinde her zaman motivasyonumu yükselten, yanımda olan canım arkadaşım Melike Nur DURAN'a teşekkür ederim.

Son teşekkürümü de bugünlere gelmek için bana verdikleri emeklerin hakkını asla ödeyemeyeceğim, maddi manevi her türlü koşulda arkamda duran, beni her zaman destekleyen, bu zor ama bir o kadar keyif veren dönemde yanımda olan canım aileme; Annem Sacide KURU, babam Ömer KURU, Abim Oğuzhan KURU ve canım teyzem Selime BAYIR'a teşekkür ederim.

Haziran- 2023 Sinem KURU

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
1. GİRİŞ 1
    1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı 3
2. GENEL BİLGİLER 4
    2.1. Plastik Kirliliği 4
    2.2. Mikroplastikler 6
    2.3. Mikroplastiklerin Kaynakları 7
    2.4. Mikroplastiklerin Sınıflandırılması 8
        2.4.1. Birincil (Primer) ve İkincil (Sekonder) Mikroplastikler 8
        2.4.2. Mikroplastiklerin Şekil ve Renk Sınıflandırılması 10
        2.4.3. Boyutlarına ve Türlerine Göre Mikroplastikler 11
    2.5. Mikroplastiklerin Kullanım Alanları 12
    2.6. Mikroplastiklerin Oluşumu- Yayılımı ve Taşınımı 12
    2.7. Mikroplastiklerin Alımı- Çevresel Etkileri ve Tehlikeleri 14
    2.8. Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerinde Varlığı ve Giderim Verimleri 15
    2.9. Ozon Oksidasyon Yöntemi 18
        2.9.1. Ozon (O3) Prosesi 19
        2.9.2. Ozon Prosesi ile Mikroplastik Giderimi ve Yapılan Çalışmalar 20
    2.10. Taguchi Yöntemi 22
3. MALZEME VE YÖNTEM 24
    3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler 24
    3.2. Kullanılan Ekipmanlar 24
    3.3. Oksidasyon Deney Düzeneği 24
    3.4. Deneysel Çalışma Prosedürü 25
    3.5. Analiz Yöntemleri 26
        3.5.1. Mikroplastik Tayini 26
    3.6. Taguchi Deneysel Tasarımı 27
4. DENEYSEL BULGULAR 28
    4.1. Kasım 2022 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar 28
    4.2. Aralık 2022 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar 31
    4.3. Şubat 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar 33
    4.4. Mart 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar 37
    4.5. Nisan 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar 38
        4.5.1. Mikroskop Görüntüleri 39
        4.5.2. Atıksuyun Orijinal pH Değerinde Yürütülen Çalışmalar 41
    4.6. Kontrol Deneyleri Sonuçları 41
5. DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 42

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 44
KAYNAKLAR 45
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 53
ÖZGEÇMİŞ 54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Plastiğin Granül ve Toz Hali 4
Şekil 2.2. Polimer Reçinelerin, Sentetik Liflerin ve Katkı Maddelerinin Küresel Üretimi, Kullanımı ve Akıbeti (1950'den 2015'e; Milyon Metrik Ton Olarak) 5
Şekil 2.3. Mikroplastiklerin Boyut Sınıflandırılması ve Parçalanma Süreci 7
Şekil 2.4. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Taşınımı 8
Şekil 2.5. Kozmetik Ürünlerdeki Mikroplastik Varlığı 9
Şekil 2.6. Parçalanma Sonrası Mikroplastiklerin Özellik Değişimleri 9
Şekil 2.7. Farklı Renk ve Şekillerde Mikroplastik Örnekleri 10
Şekil 2.8. Mikroplastiklerin Ortamlara Yayılma Süreci 13
Şekil 2.9. Atıksu Arıtma Tesislerine Gelen Mikroplastiklerin Kaynakları 15
Şekil 2.10. Atıksu Arıtma Tesislerinde Kullanılan Arıtım Yöntemleri 17
Şekil 2.11. Hidroksil Radikallerinin Oluşum Mekanizmaları 18
Şekil 2.12. İleri Oksidasyon Çeşitleri 19
Şekil 2.13. Taguchi Deneysel Tasarım Şeması 23
Şekil 3.1. Oksidasyon Deney Düzeneği 25
Şekil 4.1. Kasım 2022 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerleri 29
Şekil 4.2. Kasım 2022 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları 29
Şekil 4.3. Aralık 2022 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerleri 32
Şekil 4.4. Aralık 2022 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları 32
Şekil 4.5. Şubat 2023 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerler 35
Şekil 4.6. Şubat 2023 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları 35
Şekil 4.7. Kasım 2022 Ayı Mikroskop Görüntüleri 39
Şekil 4.8. Aralık 2022 Ayı Mikroskop Görüntüleri 39
Şekil 4.9. Şubat 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri 40
Şekil 4.10. Mart 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri 40
Şekil 4.11. Nisan 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri 40

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Mikroplastik Boyutları 11
Tablo 2.2. Mikroplastiklerin Yaygın Türü ve Özellikleri 12
Tablo 2.3. Farklı Ülkelerde, Farklı Arıtım Yöntemleri ile Giderilen Mikroplastik Verimleri 16
Tablo 2.4. Ozon Bazlı Oksidasyon Prosesleri ile Atıksu Arıtımına Yönelik Literatür Çalışmaları 21
Tablo 3.1. Çalışılan Örneklemelerde Belirlenen Mikroplastik Sayıları ve Özellikleri 27
Tablo 3.2. Ozon deneyleri reaksiyon şartları 27
Tablo 4.1. Kasım 2022 için Giderim Verimleri 28
Tablo 4.2. Kasım 2022 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği 29
Tablo 4.3. Kasım 2022 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA Analizi 30
Tablo 4.4. Kasım 2022 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi 30
Tablo 4.5. Aralık 2022 için Giderim Verimleri 31
Tablo 4.6. Aralık 2022 için Ayı En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği 31
Tablo 4.7. Aralık 2022 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA 33
Tablo 4.8. Aralık 2022 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi 33
Tablo 4.9. Şubat 2023 için Ayı Giderim Verimleri 34
Tablo 4.10. Şubat 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği 34
Tablo 4.11. Şubat 2023 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA 36
Tablo 4.12. Şubat 2023 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi 36
Tablo 4.13. Mart 2023 için Mikroplastik Giderim Verimleri 37
Tablo 4.14. Mart 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği 37
Tablo 4.15. Nisan 2023 için Giderim Verimleri 38
Tablo 4.16. Nisan 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği 38
Tablo 4.17. Atıksuyun Orijinal pH Değerinde Yapılan Çalışma Sonuçları 41
Tablo 4.18. Kontrol Deneylerinin Sonuçları 41
Tablo 4.19. pH için Kontrol Deneylerinin Sonuçları 41
Tablo 5.1. Çalışma Sonuçlarının Literatürdeki Mikroplastik Çalışmaları ile Karşılaştırılması 42

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

•OH	: Hidroksil radikali
ANOVA	: Varyans analizi (The Analysis of Variance)
C	: Karbon
dk	: dakika
H	: Hidrojen
H_2O	: Su
H_2O_2	: hidrojen peroksit
KI	: Potasyum Iyodür
L	: Litre
m	: Metre
mm	: Minimetre
N	: Azot
O	: Oksijen
O2• -	: Süperoksit anyon
O_3/UV	: Fotolitik ozon oksidasyonu
O_3/UV/ZnO	: Fotokatalitik ozon oksidasyonu
O_3/ZnO	: Katalitik ozon
O_3• -	: Ozonid iyonu
P değeri	: Önem/olasılık değeri
PEF-Fered-O_3	: photo-electro-Fenton/Fered/O_3 (Foto-elektro-Fenton/ Fered/ Ozon)
ppm	: Milyonda bir
S/N	: sinyal/ gürültü
TiO_2	: Titanyum dioksit
V	: Volt
ZnO	: Çinko oksit
µm	: Mikro metre

Kısaltmalar

AKM	: Askıda Katı Madde
BPA	: Bisfenol A
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
NO	: Numara
PCB	: Poliklorlu Bifeniller
TOK	: Toplam Organik Karbon
UV	: Ultraviyole
UVA	: Ultraviyole A
UVC	: Ultraviyole C

EVSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ ÇIKIŞ SUYUNDA BULUNAN MİKROPLASTİKLERİN OZON BAZLI OKSİDASYON PROSESLERİ İLE ARITILABİLİRLİĞİ

ÖZET

Son yıllarda dünya genelinde artmakta olan plastik üretimi ve tüketimine bağlı olarak, çevrede oluşan plastik kirliliği de artmıştır. Plastiklerin çeşitli yollarla parçalanması sonucu oluşan boyutları 1µm- 5mm arasında olan parçaçıklar mikroplastiklerdir. Mikroplastiklerin yaygınlaşması hem çevre hem de canlı sağlığı açısından önem arz etmektedir. Farklı kaynaklardan ortama yayılan mikroplastiklerin hemen hemen her yerde özellikle de sucul ortamlarda varlıkları gözlemlenmektedir. Bu çalışmada evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda bulunan mikroplastiklerin ozon bazlı oksidasyon proseslerinin kullanılması ile arıtılabilirlikleri araştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışma, atıksu arıtma tesisinin çıkış suyundan 5 ay boyunca alınan kompozit numunelerle ile yapılmıştır. O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO prosesleri kullanılması sonucunda mikroplastik giderim verimlerinin incelenmiştir. Kasım, Aralık ve Şubat numunelerinde O_3 yöntemi farklı koşullarda çalışılması sonucunda Taguchi deneysel çalışma analizi yapılmış ve optimum koşullar belirlenmiştir. İlk üç ay yapılan çalışmalarda en yüksek verim %90 olup çalışma şartları pH=7 O_3=10 ve süre=60 dakikadır. Bu aylarda aynı zamanda taguchi deneysel analizler yapılmış ve sonucunda en yüksek verimin elde edildiği optimum koşullar ve katalizör miktarları belirlenmiştir. Mart ve Nisan aylarında optimum şartlar altında O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO prosesleri yapılmıştır. Bu aylarda en yüksek verimler O_3 ile %82, O_3/UVC ile %68, O_3/UVC/TiO_2 ile %78 ve son olarak O_3/UVC/ZnO ile %77'dir. Karakteristik özellikleri incelendiğinde fiber, film, pelet, boncuk, amorf/köpük türleri iken en çok fiber yapılı mikroplastikler gözlemlenmiştir. Renk olarak en çok siyah mikroplastikler bulunmaktadır. Mevsimsel değişikliği bağlı olarak mikroplastiklerin renk çeşitliliğinde artış görülmüş bunun sebebi kış aylarında kullanılan kozmetik malzemeler ve tektsil ürünlerinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atıksu, Giderim, Mikroplastik, Ozon Bazlı Oksidasyon,

TREATABILITY OF MICROPLASTICS IN DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT PLANTS EFFLUENT WITH OZONE- BASED OXIDATION PROCESSES

ABSTRACT

In recent years, plastic pollution in the environment has increased due to the increasing production and consumption of plastic throughout the world. Microplastics are particles with sizes ranging from 1µm to 5mm, which are formed as a result of the breakdown of plastics in various ways. The prevalence of microplastics is important for both the environment and the health of living things. Microplastics emitted from different sources are observed almost everywhere, especially in aquatic environments. In this study, the treatability of microplastics in the effluent of the domestic wastewater treatment plant was investigated by using ozone-based oxidation processes.

The experimental study was carried out with composite samples taken from the effluent of the wastewater treatment plant for 5 months. Microplastic removal efficiencies were investigated because of using O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO processes. As a result of working with O_3 method under different conditions in November, December and February samples, Taguchi experimental study analysis was made, and optimum conditions were determined. In the first three months of studies, the highest efficiency is 90% and the working conditions are pH=7 O_3=10 and time=60 minutes. At the same time, Taguchi experimental analyzes were carried out in these months, and as a result, optimum conditions and catalyst amounts were determined where the highest efficiency was obtained. O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO processes were carried out under optimum conditions in March and April. The highest efficiencies in these months are 82% with O_3, 68% with O_3/UVC, 78% with O_3/UVC/TiO_2 and finally 77% with O_3/UVC/ZnO. When their characteristics were examined, fiber, film, pellet, bead, amorphous/foam types were observed, while fiber-structured microplastics were observed the most. When their characteristics were examined, fiber, film, pellet, bead, amorphous/foam types were observed, while fiber-structured microplastics were observed the most. There are mostly black microplastics in color. An increase in the color variety of microplastics has been observed due to seasonal changes, and it is thought that this may be due to the cosmetic materials and textile products used in the winter months.

Keywords: Wastewater, Removal, Microplastic, Ozone-Based Oxidation,

1. GİRİŞ

Son yıllarda nüfusun artışı, teknoloji, sanayinin gelişimiyle beraber ortaya çıkan çevre sorunları da artmaya başlamıştır. İnsan, bilgisi ve birikimiyle birlikte doğanın kaynaklarını daha fazla kullanarak çevreye olan etkisini arttırmıştır. 1970'li yıllardan itibaren artan bu çevre problemleri küresel hale gelerek dünyanın gündemine daha hızlı oturmuş ve bu alanda yapılan çalışmalar hızlanmaya başlamıştır (Aydoğdu, 2014). Çevre kirliliklerini oluşturan birçok madde vardır ancak hayatımızı fazlasıyla kolaylaştırdığını düşünerek kullandığımız plastikler, çevreye karşı tehdit oluşturan en büyük kirletici kaynaklardır.

Plastik, dayanaklılığı, düşük maliyetli olması, hafif yapıya sahip olması vb. özelliklerinden dolayı çok yaygın kullanılmaktadır. Plastik üretimi 1950'li yıllarda artmaya başlamıştır (Can, 2022). Günümüzde üretimi yaklaşık yılda 348 milyon ton iken 2050 yılında bu rakamlara 33 milyar ton plastik ekleneceği düşünülmektedir (Can, 2022). Bunun sonucunda bizleri gelecekte şüphesiz kritik küresel çevre problemi olacak olan plastik atıklar bekliyor olacaktır (Arı ve diğ., 2021.). Kullanımının kolay ve pratik olması sosyal alanlarda "kullan ve at" prensibini benimsenmesine neden olmuş ve atık oluşumunu arttırmıştır (Arı ve diğ., 2021).

Plastik kirliliği, kara ortamına kirletici etkisi olduğu kadar su ortamını da etkileyen önemli kirletici parametrelerdendir (Ceylan, 2017). Atıkların su ortamına karışmaları canlı hayatı için risk etmenidir. Suda yaşayan birçok canlının yiyecek sanarak plastikleri yutmaları ve midelerinde birikmesi sonucu ölmeleri son yıllarda sık rastlanan bir çevre katliamı durumudur (Kanlı, ve diğ., 2019). Doğaya bu yollarla giriş yapan plastik atıklar sahip oldukları yapısal özelliklere bağlı olarak güneş, rüzgâr veya taşınımlarına neden olan ırmak, nehir gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler sonucunda küçük parçacıklara dönüşerek mikroplastiklerin oluşumuna neden olurlar (Arı ve diğ., 2021).

Mikroplastiklerin varlığı çok geniş bölgelere yayılsa da en çok endişe veren bulundukları su ortamlarıdır (Castelluccio, ve diğ., 2022). Verdikleri endişenin büyüklüğüyle son yıllarda mikroplastik kirleticilerine küresel boyutta odaklanma artmış ve mikroplastik konusunun literatürdeki yeri de önem kazanmaya başlamıştır (Liu, ve diğ., 2021). Uzun yıllar boyunca mikroplastiklerin tehlikeli veya toksik bir madde olmayıp sadece inert

parçacıklar olduğu düşünülmüştür ancak akademik çalışmaların artmasıyla mikroplastiklerin canlı hayatını etkileyeceği potansiyel risklere sahip olduğu ortaya konmuştur (Uogintė, ve diğ., 2022). Ayrıca mikroplastikler bünyesinde hem tehlikeli diğer kirleticileri hem de öldürücü etkiye sahip mikroorganizmalar için taşıyıcılık yapabilirler (Kirstein, ve diğ., 2016). Üretilen ve tüketilen mikroplastikler büyük bir kısmı atıksular vasıtasıyla atıksu arıtma tesislerine gelmektedir. Evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesisleri, sucul ortamlara (nehir, deniz, okyanus vb.) mikroplastiklerin yayılmasındaki en önemli kaynaklardır (Uogintė, ve diğ., 2022).

Yapılan çalışmalar, mikroplastiklerin atıksu artıma tesislerindeki arıtma verimlerinin oldukça yüksek sayılabilecek oranlarda olduğu değerlendirilmektedir (Akarsu,2022). Giderim verimleri %40 gibi düşük verimlerde ve tam tersi %99 gibi çok yüksek oranlara da sahiptir (Magnusson, 2014). Oranlar arasındaki bu büyük farkın sebebi atıksu arıtma tesislerinin özel olarak mikroplastik giderimini sağlamak için bir yöntem kullanmaması ve atıksu kalitesi, mikroplastiklerin yapısal özellikleri gibi birçok faktörün etkilemesidir (Akarsu, 2022). Küresel olarak bir çevre sorunu haline gelen atıksu arıtma tesislerindeki mikroplastiklerin giderimi için farklı arıtma teknikleri kullanılmaktadır (Solís-Balbín, vd., 2023). Geleneksel atıksu arıtma tesislerinde kullanılan birincil ve ikincil giderim yöntemleri mikroplastikleri etkili şekilde uzaklaştırırken, ileri arıtımda kullanılan arıtım teknolojine bağlı olarak giderim değişiklik gösterebilir. Bunların bazıları fotodegredasyon, fotokataliz, biyolojik bozunma, membran teknolojileri ve ozonlama yöntemleridir (Solís-Balbín, ve diğ., 2023).

İleri oksidasyon prosesleri son yıllarda, atıksu arıtma tesislerinde organik kirleticilerin gideriminde kullanılmaya başlanması oldukça yaygınlaşmıştır ve prosesinin temeli redoks potansiyeli yüksek olan hidroksil radikallerinin oluşumuna dayanır (Topkaya, 2021). Ozonlama yöntemi ise bozunmayı sağlayan hidroksil radikallerinin oluşumu ile karakterize edilmiş olan ileri oksidasyon yöntemidir (Solís-Balbín, ve diğ., 2023). Yapılan çalışmalarda, mikroplastikler için kullanılan ozonlama yönteminde, kimyasal yapılarının değişmesini sağlayıp hidrofobikliği azaltarak biyolojik bozunmalarını artmasını sağladığı tespit edilmiştir (Solís-Balbín ve diğ., 2023).

1.1. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, Kullar evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda mevcut mikroplastik seviyelerinin tespit edilmesi ve ozon bazlı oksidasyon prosesleri ile arıtılabilirlik çalışmalarının yürütülmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın kapsamı;

- Belirli periyotlarda alınan çıkış suyu örneklerinde mevcut mikroplastiklerin sayı, boyut, renk ve şekil olarak sınıflandırılması,
- Mikroplastik içeren atıksu örnekleri ile ozon, ozon/UV ve ozon/UV/katalizör prosesleri ile arıtılabilirlik çalışmalarının yürütülmesi,
- Taguchi deneysel tasarım yöntemi uygulanarak deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi,
- Proseslerin etkinliğinin optimum işletme şartlarını belirleyerek ortaya konması,
- Deney sonuçlarının literatür verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmesi ve yorumlanması ile genel değerlendirme aşamalarından oluşmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Plastik Kirliliği

Plastik kelimesi, Yunanca “Platikos‖” kelimesinden gelen ve anlamı şekillendirilebilen veya kalıba sokulabilen demektir (Cantemur, 2022). Yapısında karbon (C), hidrojen (H), Azot (N), oksijen (O) ile birlikte organik ve inorganik elementleri bulunduran monomer moleküllü yapıların, bağları koparması sonucunda polimer zincirleri oluşturan maddedir. Plastikler ilk üretildikleri zaman şekil olarak toz, reçine ya da granül halde ve koyu renkli olup sert bir yapısı olan maddeler olabilir (Cantemur, 2022) (Şekil 2.1).

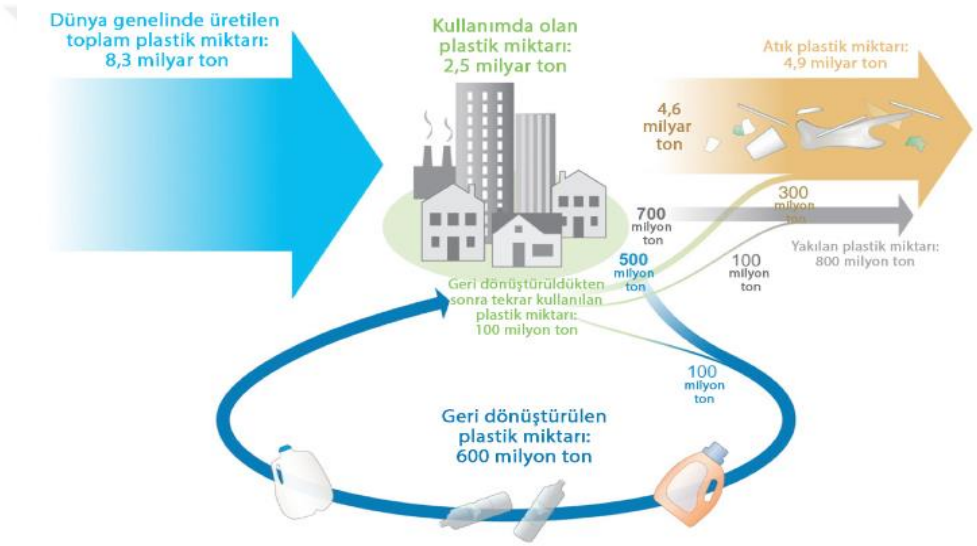


Şekil 2.1. Plastiğin Granül ve Toz Hali

Plastik üretimi her geçen gün dünyada artmaktadır ve 2017 yılı verilerine göre Avrupa’da üretim düşmeye başlamasına rağmen 2018’de ise tekrar artarak 359 milyon ton plastik üretilmiştir (Vardar, 2020). Üretim metotlarına göre plastikler termoplastik ve termoset plastik olarak ikiye ayrılır. Tüketicinin kullandığı plastiğin ana türü olan termoplastikler, plastiğin hammaddesinin eritilmesiyle üretilir ve tekrar eritilerek geri kazanımı sağlanabilir (Vardar, 2020). Termoplastiklerin en yaygın örnekleri; Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polietilen Teraftalat (PET), Polistiren (PS), Genişletilmiş Polistiren (EPS), Polivinil-klorür (PVC), Poliamitler (PA), Akrilonitril bütadien stiren (ABS), Stiren Akrilonitril (SAN)), Polikarbonat (PC), Poli metil metakrilat (PMMA), Termoplastik Elastomerler (TPE), Poliarilsülfon (PSU), Floropolimerler’dir. (Vardar, 2020). Poliüretan (PUR), Doymamış PE, Epoksi reçineler, Melamin reçineler, Vinil esterler, Silikon, Fenolik ve Akrilik reçineler ise termoset plastiklerin en çok bilinen türleri olup daha az üretilmesinden dolayı sayıca termoplastiklere göre doğada daha rastlanılır ve doğal olarak geri kazanımları da düşüktür (Moore, 2008).

Yaygın uygulama alanlarına sahip plastiklerin özellikleri kullanılacağı sektöre bağlı olarak değişmekte ve yapılarında özel maddeler bulundurmaktadırlar (Vardar, 2020). Su geçirmez özelliği, dayanaklılığı ve biyolojik parçalanmaya karşı kuvvetli olması, tüketicilerin plastik kullanmaya karşı olan sempatikliğini arttırmaktadır (Vardar, 2020).

Yapılan çalışmalarda 1950'lerde günümüze kadar üretilen milyonlarca plastik atıklardan sadece %9'unun geri dönüşümün sağlandığı, %12'sinin yakıldığı geriye kalan %79'luk kısmının ise atık olarak çevreye atıldığı belirtilmiştir (Vardar, 2020) (Şekil 2.2). Bu rakamlara bakıldığında, zaman geçtikçe plastiklerin karşımıza bir atık sorunu olarak çıktığı görülmektedir.



Şekil 2.2. Polimer Reçinelerin, Sentetik Liflerin ve Katkı Maddelerinin Küresel Üretimi, Kullanımı ve Akıbeti (1950'den 2015'e; Milyon Metrik Ton Olarak) (Geyer, 2017)

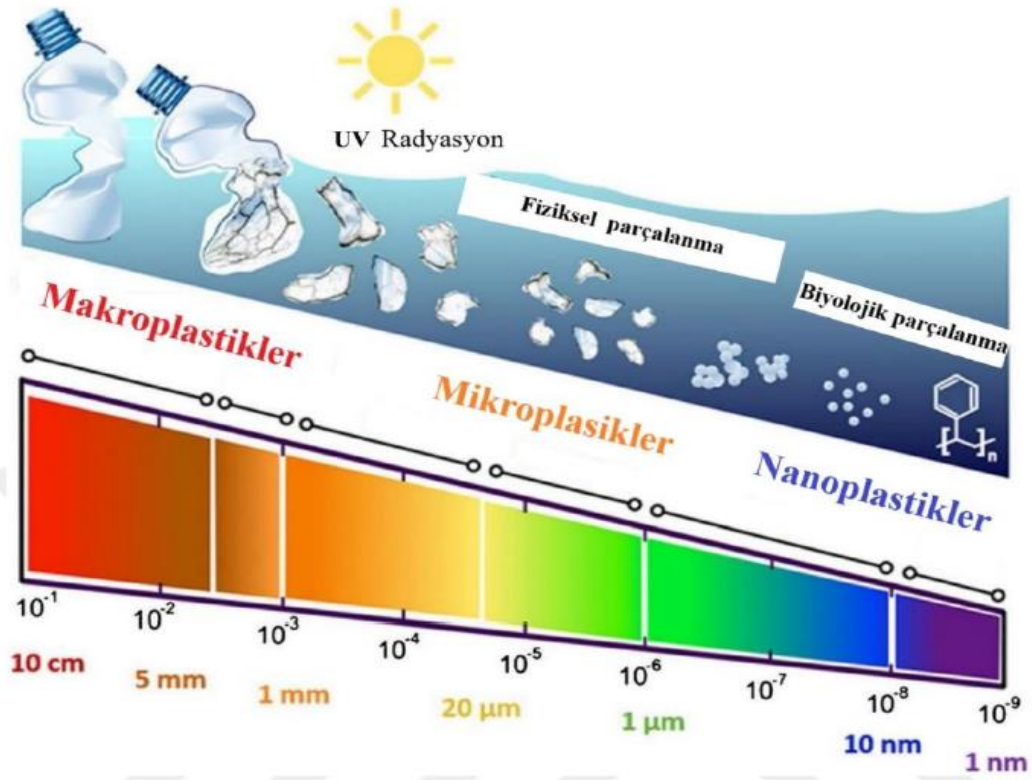
Geri kazanım oranlarının farklılık göstermesinden dolayı plastikler, atık yönetiminin önemli bir parçası olmuştur. Havada, toprakta ya da üretim yerleri gibi birçok alanda bulunma ihtimalleri yüksektir (Cole, ve diğ., 2011). Plastiklerin karasal bölgede taşınmalarını etken olan rüzgâr, yağmur vb. olayların hareket ettirme yetenekleri az olduğu için genelde ortamda hareketsiz kalırlar (Alagöz, 2018). Plastiklerin daha uzak ve geniş ortama yayılmasını sağlayan en etkin araçlar nehir, göl ve okyanuslardır (Önder, ve diğ., 2020). Özellikle okyanusların taşıdığı plastik yükün yaklaşık 150 milyon olduğu varsayıldığında, okyanuslarda çok sayıda plastik adaların mevcut olduğu da bilinmektedir (Önder, ve diğ., 2020). Adsorplama özeliğine sahip olan plastikler yapılarında

kimyasalları tutar ve toksik atıklara dönüşürler (Ceylan, 2017). Bu atıklar canlılar tarafından yiyecek sanılarak yutulabilir ve dolaylı olarak kirleticilerin besin zincirine aktarılarak canlı sağlığını tehdit etmesine neden olabilir (Mato, ve diğ., 2000).

2.2. Mikroplastikler

Büyük plastik parçalarının farklı etkileşimler sonucu deforme olması veya doğrudan milimetrik bir boyutta üretilen kirleticilere "Mikroplastik" adı verilir (Dris vd. 2016). Thompson ilk olarak 2004'te 5mm'den (minimetre) küçük boyutlara sahip plastik parçalar için "Mikroplastik" kavramını kullanmıştır (Arı ve diğ., 2021). Mikroplastikler kaynaklarına göre birincil ve ikincil olarak iki grupta sınıflandırılır (Akarsu, 2022). Genelde kozmetik ürünlerinden kaynaklanan mikroplastikler birincil iken, mekanik ve biyolojik faktörler gibi çeşitli etkiler sonucu ortaya çıkanlar ikincil mikroplastiklerdir (Akarsu, 2022). Bu sınıflandırmanın yapılması mikroplastiklerin kaynağını tespit etme ve giderimi için yöntem belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Talvitie ve diğ., 2017). 1970'li yıllarda mikroplastik henüz keşfedilmediği zamanlarda, okyanuslarda bulunan plastik kirleticiler belirlenip raporlanmaya başlayarak, canlı hayatına verdikleri zararlar hakkında çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Vardar, 2020). Mikroplastiğin keşfiyle beraber bu plastik döküntüler, gözle görünmeyen maddeler olarak tanımlanmak üzere boyutlarına göre sınıflandırılmıştır (Vardar, 2020). Büyük plastik parçalarının farklı mekanik ve biyolojik işlemler sonucu deforme olan veya doğrudan milimetrik bir boyutta üretilen kirleticilere "Mikroplastik" adı verilir (Dris ve diğ. 2016). Mikroplastik kavramının farklı özelliklerine karşı yapılmış olan birden fazla tanımı mevcuttur (Cantemur, 2022). En genel mikroplastik tanımı ise boyutlarının 5 mm'den küçük olan plastik parçalar olarak yapılan tanımlamasıdır (Bakkaloğlu, 2019).

Yapılan bu tanım yaygınlaşmasına rağmen mikroplastiklerin alt boyut sınırlandırılması yapılamamıştı (Duis, ve diğ., 2016). Daha küçük plastik parçaları olan "nano plastikler" keşfedildikten sonra ise mikroplastiğin tanımı 5 mm'den küçük 1µm'den büyük plastikler olarak güncellenmiştir (Vardar, 2020) (Şekil 2.3.). Bütün özelliklerini de kapsayan diğer bir tanımını ise Frias ve arkadaşları tarafından şu şekilde yapılmıştır; boyutları 1 µm-5 mm arasında değişen, birincil ve ikincil üretim kaynaklı, suda çözünmeyen, düzenli ve düzensiz şekilleri olan sentetik katı parçacık veya polimerik matrise sahip maddelerdir (Frias, ve diğ., 2019).



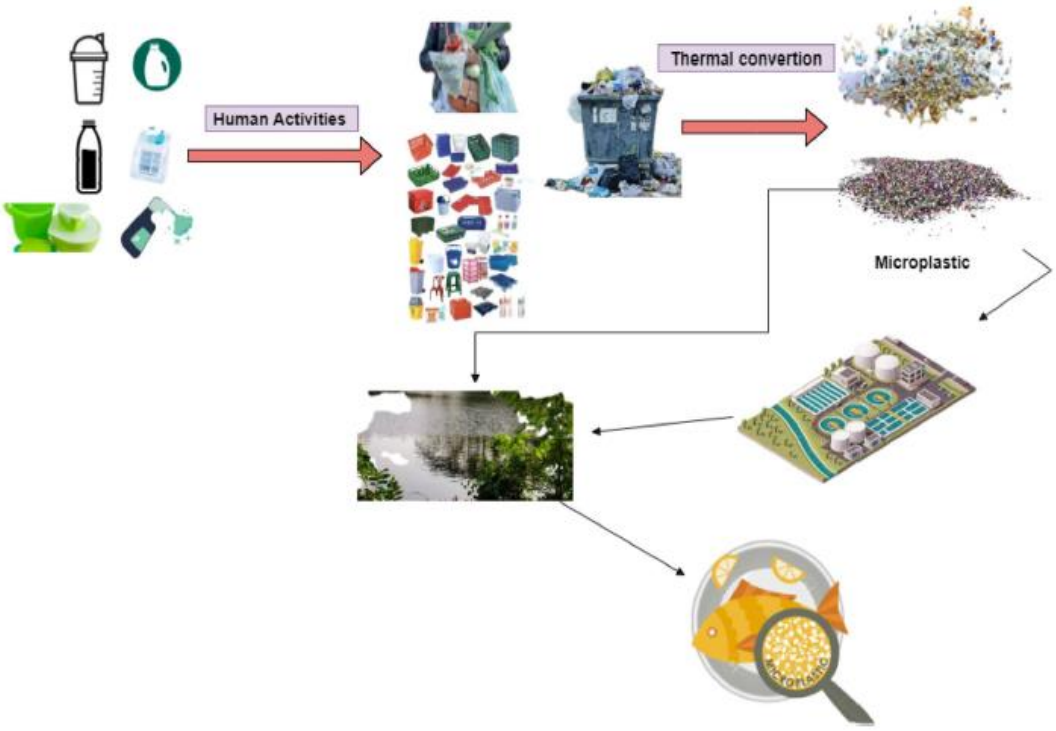
Şekil 2.3. Mikroplastiklerin Boyut Sınıflandırılması ve Parçalanma Süreci (Gillibert, 2019)

Son yıllarda mikroplastikler kirletici grubu olarak önemli gündem maddesi haline gelmiştir (Bakkaloğlu, 2019). Bunun üzerine mikroplastikler ile ilgili yapılan araştırmalar artmaya başlamıştır.

2.3. Mikroplastiklerin Kaynakları

Plastiklerin aşırı kullanımı sonucunda özellikle su kaynaklarında karşımıza çıkan mikroplastik miktarı da dolaylı olarak artmaktadır (Yurtsever, 2015). Mikroplastiklerin büyük kısmı büyük plastiklerden kaynaklı oluşmasına rağmen endüstride hammadde olarak kullanılan reçine türlerinden de mikroplastikler meydana gelmektedir (Yurtsever, 2015). Su ortamında bulunan mikroplastiklerin ana kaynaklarını karasal ve insan aktiviteleri oluştururken kalan miktar ise denizel kaynaklardır (Şekil 2.4.) (Cantemur, 2022). Mikroplastiklerin kaynakları birçok sektörden gelmektedir. Bunlara ambalajlama, inşaat sektörü, tarım, turizm, otomotiv, balıkçılık, kanalizasyon-atıksu arıtma tesisleri gibi örnekler verilebilir. Mikroplastiklerin kaynaklarının belirlenmesi yapılan kirlilik çalışmaları için önemlidir ve bu kaynakların tespiti ise su ortamında bulunan mikroplastik

miktarına bağlıdır. Kaynaklarının ve miktarının doğru olması ise mikroplastik kirliliğinin yönetiminin sağlıklı bir şekilde yapılmasını etkilemektedir (Cantemur, 2022).



Şekil 2.4. Mikroplastiklerin Kaynakları ve Taşınımı (Priya, vd., 2023)

Alıcı ortamların değerli su kaynakları (göl, nehir, okyanus vb.) olduğu için kirliliğin kontrolsüz hale gelmesi ilerleyen zamanlar da ekolojik tahribata neden olur (Eriksen, ve diğ., 2013).

2.4. Mikroplastiklerin Sınıflandırılması

2.4.1. Birincil (Primer) ve İkincil (Sekonder) Mikroplastikler

Ticari kullanımları nedeniyle bilinçli olarak üretilen mikroplastik grubudur (Can, 2022). Mikroplastikler kaynaklarına göre birincil ve ikincil olarak iki grupta sınıflandırılır (Akarsu, 2022). Bu sınıflandırmanın yapılması mikroplastiklerin kaynağını tespit etme ve giderimi için yöntem belirlenmesine yardımcı olmaktadır (Talvitie ve diğ., 2017).

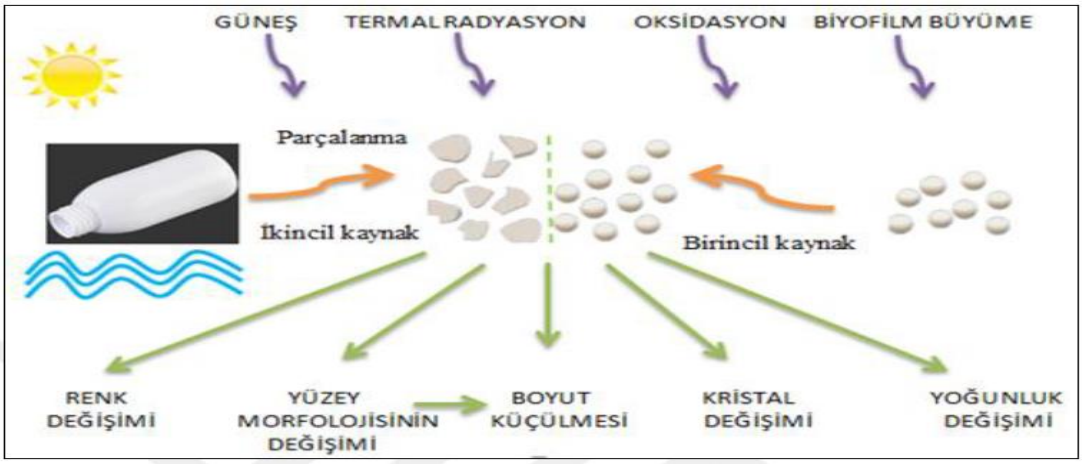
Genelde kozmetik sektörü, temizlik ve kişisel bakım ürünlerinde kullanılmakta olan küçük dairesel şekle sahip mikro boncuklardır birincil mikroplastiklerdir (Cantemur, 2022). Bir yüz temizleyici kozmetik ürününde neredeyse 360.000 tane polietilen türünde mikroplastikler bulunabilir (Önder ve diğ. 2020). Yapılan bir çalışmada mikroplastiğin

renk, şekil ve boyut olarak diş macunun yapısında görülen mavi polietilen plastik maddelere çok benzediği kanıtlanmıştır (Bakkaloğlu, 2019) (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Kozmetik Ürünlerdeki Mikroplastik Varlığı (Canlar, 2021)

İkincil mikroplastikler daha büyük plastik parçaların akıntı, rüzgâr, ultraviyole ışınlar gibi çeşitli karmaşık etkenler sonucu mekanik aşınma, fiziksel parçalanma ve mikrobiyolojik deformasyonlara uğrayan mikroplastik kirleticilerdir (Cantemur, 2022). Tekstil ürünlerinin yıkanması, lastiklerin aşınma durumları bunlara örnek verilebilir (Priya, ve diğ., 2023). İkincil mikroplastiklerin bozunması sırasında rengi, kristalliği, büyüklüğü, yüzey morfolojik yapıları ve kimyasal yapıları değişikliğe uğramaktadır (Guo, ve diğ., 2019) (Şekil 2.6.). Ortam örnekleri incelendiğinde hem birincil hem de ikincil mikroplastikler çok sayıda karşımıza çıkmaktadırlar (Bilgin, 2019).

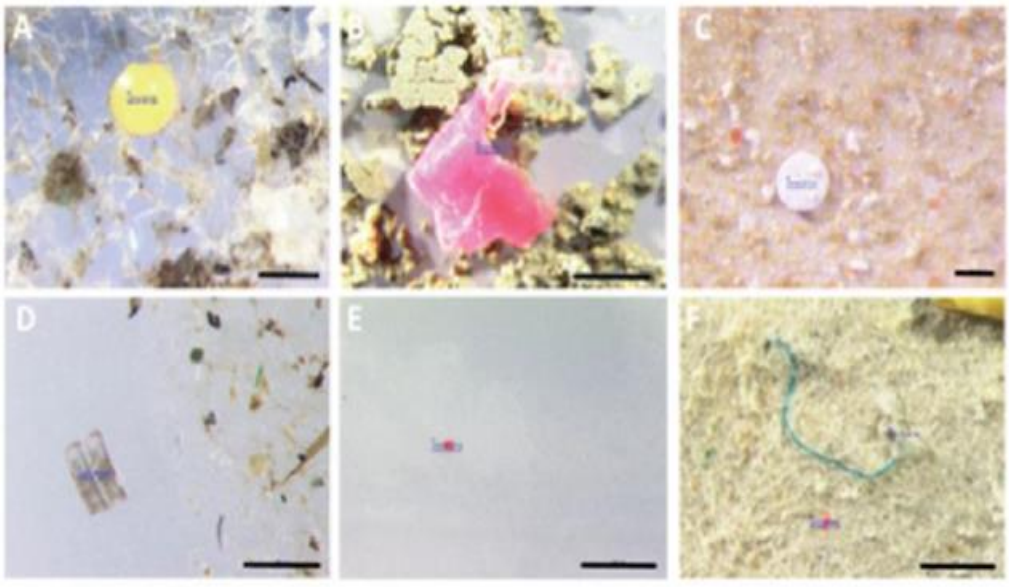


Şekil 2.6. Parçalanma Sonrası Mikroplastiklerin Özellik Değişimleri (Guo, vd., 2019)

2.4.2. Mikroplastiklerin Şekil ve Renk Sınıflandırılması

Mikroplastiklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi, onların hangi kaynaklardan geldiği konusundaki çalışmalara yardımcı olmaktadır (Rochman, ve diğ., 2019). Makro boyuttaki plastiklerin parçalanması sonucunda oluşan mikroplastiklerin net bir şekli ve belirli bir rengi bulunmamaktadır (Bakkaloğlu, 2019). Şekil olarak genel sınıflandırma küresel, lif, film, pelet, amorf, şekilsiz, oval ve köpük gibi farklı çeşitlerde yapılmaktadır (Bakkaloğlu, 2019 ve Can, 2022). Bu sınıflandırma değişiklik gösterebilmektedir. Tekstil ürünleri genelde lif şeklindeki mikroplastikleri içerirken, kişisel bakım ve kozmetik ürünlerindekiler küre-boncuk şeklindedirler (Bakkaloğlu, 2019).

Mikroplastiklerin renk olarak sınıflandırılması tek renk ve karışık (alaca) renkler olarak ikiye ayrılmıştır. Her rengi bulunan mikroplastikler bazı deniz canlıları tarafından avlarının rengine benzedikleri için yutulmaktadır ve bu yüzden bazı renklerin miktarı, diğer renklere kıyasla az bulunmaktadır (Bakkaloğlu, 2019). Tek renklilerde yaygın olarak mavi, şeffaf-beyaz, siyah, kırmızı, pembe vb. renkler görülmektedir. Rengin belirlenmesi, mikroplastiklerin türlerinin ve kökeninin kolayca bulunması için önemlidir (Rochman, ve diğ., 2019). Değişken hava koşullarının etkisiyle mikroplastiklerin saflaştırılması veya plastiklerde kullanılan boyaların süzülmesi gibi işlemler sonucunda renkleri yok olabilir (Gao, ve diğ., 2023).



Şekil 2.7. Farklı Renk ve Şekillerde Mikroplastik Örnekleri (Gies, vd., 2018)

Yapılan bir çalışmada mikroplastiklerin lif şeklinin rengine göre sınıflandırmasını; mavi> siyah > mor = beyaz > kırmızı > kahverengi > yeşil olarak yaparken parçacık şeklinin ise; mavi > kırmızı > sarı > kırmızı > siyah > turuncu > beyaz > mor > kahverengi= gümüş şeklinde yapmıştır (Blümenröder, ve diğ., 2017). Lif şekilli mikroplastiklerin miktar olarak diğer şekillerden fazlaca görüldüğü de bilinmektedir. Avrupa'da renk olarak beyaz ve şeffaf rengin daha az olduğu belirlenmiş olup bunun nedeninin plastik poşetlerin ve gıda ambalajlarının tek kullanımlıklar yerine çevre dostu diğer alternatifle değiştirmeyi amaçlamalarından kaynaklandığı gözlemlenmiştir (Uogintė ve diğ., 2022).

2.4.3. Boyutlarına ve Türlerine Göre Mikroplastikler

Boyutları genellikle düzenli ve düzensiz olarak 1 µm-5 mm' dir. Sentetik veya polimerik şekilde bu sınıflandırma geliştirilmiştir (Çakmak ve diğ., 2021). Tablo 2.1.'de mikroplastik boyutları verilmiştir.

Tablo 2.1. Mikroplastik Boyutları (Tutoğlu, 2019)

Plastiklerin Sınıflandırılması	
Plastik Adı	**Uzunluk Değeri**
Megaplastik	> 1m
Makroplastik	< 1m
Mezoplastik	< 2,5 cm
Büyük Mikroplastik	1 mm- 5 mm
Küçük Mikroplastik	1 mm- 20 µm
Nanoplastikler	1 nm- 100 nm

Günümüze kadar yaygın olarak kullanılan plastikler, küresel plastik üretiminin yaklaşık %90' ını içeren ve en yaygın üretilen sentetik plastikler PE, PP, PVC, PS ve PET'tir (Can, 2022). Tablo 2.2.'de mikroplastiklerin yaygın türü ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2. Mikroplastiklerin Yaygın Türü ve Özellikleri (Özek, 2016; Andrady, 2011)

Plastik Tür	Yoğunluk (g/cm3)	Özellik
Polipropilen (PP)	0.83-0.85	Kimyasal maddelere ve ısıya karşı dayanıklıdır, orta sertliğe ve parlaklığa sahiptir
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	0.94	Düşük maliyetli, kolay şekillenebilir, kırılmaya dayanıklıdır
Düşük yoğunluklu polietilen (AYPE)	0.91-0.93	Esnek, yumuşak, buruşmaz, kolay kesilebilir
Poliamid / Naylon (PA)	1.14	Nem ve ses alma özelliği, mekanik dayanımı iyidir, aşınma dayanımı, ve darbe mukavemeti, kolay işlenebilirlik, iyi yapışma özelliği
Polikarbonat (PC)	1.20	İşlenmesi, kalıplanması, ısıl olarak şekillendirilmesi kolaydır
Polietilen Tetraftalat (PET)	1.37	Tamamen geri dönüşebilir, çok hafiftir, serttir ve darbeye karşı dayanıklıdır
Polivinilklorür (PVC)	1.38	Sert ve esnek olarak iki tür PVC malzemesi vardır
Polyester (PES)	1.36-1.45	Aşınma mukavemeti iyidir, nem çekme özelliği azdır

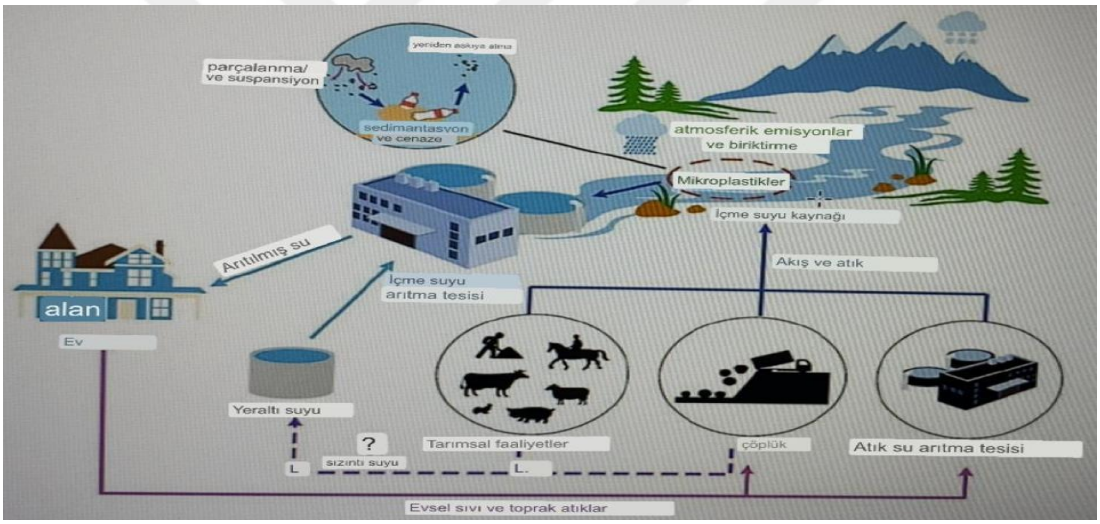
2.5. Mikroplastiklerin Kullanım Alanları

Günümüzde maliyeti, esnekliği, farklı etkilere karşı dayanıklı olması gibi birçok nedenden dolayı plastikler, cam ve metal malzemelere göre daha çok kullanılmaya başlanmıştır (Cantemur, 2022). Plastiklerin %40 gibi yüksek bir oranı ambalajlama sektöründe yiyecek ve içecek paketlemesi amacıyla kullanılmaktadır (Tutoğlu, 2019). Bunun dışında kullanım alanlarına örnek olarak; sigara filtreleri, diş ipi, diş fırçası ile tek kullanımlık eldivenler, ilaç kapsülleri, önlükler gibi hastane kullanımına yönelik ürünler ve günlük hayatta pratik olmasından dolayı tek kullanımlık çatal, kaşık ve pipetler verilebilir (Cantemur, 2022).

2.6. Mikroplastiklerin Oluşumu- Yayılımı ve Taşınımı

Mikroplastiklerin deniz ortamında bulunması ve dağılımıyla ilgili çalışmalar yapılmakta ve farklı su kaynaklarındaki kirliliği konusunda da yapılmış olan çalışmalar vardır (Vardar, 2020). Kuzey ve Güney Amerika, Asya, Avrupa, Okyanusya, Afrika, Akdeniz ve

hatta Antarktika ve Kutup bölgelerinde mikroplastik varlığı birçok yerde rapor edilmiştir (Vardar, 2020). Türkiye'de Karadeniz ve Marmara bölgelerinde de mikroplastik varlığından bahsedilmektedir. Deniz ve okyanuslara mikroplastiklerin yayılımı tatlı su akıntıları ve rüzgârın etkisiyle taşınmaktadır (Ryan, ve diğ., 2009). Deniz ulaşım araçları ve balıkçılık sektörü de denizlere mikroplastik taşınmasına neden olmaktadır (Cole, ve diğ., 2013). Mikroplastiklerin sucul ortamlara girişindeki en önemli kaynakların insan aktiviteleri ve atıksu arıtma tesisleri olduğu belirtilmektedir (Cantemur, 2022) (Şekil 2.8.). Yaygın olarak görülen sucul ortamlardaki mikroplastik şekli lif ve polimer türleri ise PE, PP ve PS'dir (Vardar, 2020). Dalgalar nedeniyle parçalara ayrılan mikroplastikler kıyılar, plaj alanları ve haliç bölgelerinde bolca birikir bundan dolayı bu bölgeler mikroplastik rezervuarı görevi görmektedir (Vardar, 2020). En yüksek konsantrasyonlar haliçlerde görülmektedir (Vardar, 2020).



Şekil 2.8. Mikroplastiklerin Ortamlara Yayılma Süreci (Khadir, vd., 2022)

Nehir ve göller açısından da mikroplastik durumları denizlerde gözüken miktarlara yakındır. 2017 yılına yapılan bir çalışmada nehirlerden, denizlere taşınan plastik akışının yaklaşık 2,41 milyon ton olduğu ve bunun %67'lik kısmını sağlayan nehirlerin çevreyi kirlettiği bilinen ilk 20 nehir olduğu belirtilmiştir (Lebreton, ve diğ., 2017).

Evsel ve endüstriyel atıksu arıtma tesisleri, atıksulara uygulanan yanlış atık yönetiminden dolayı mikroplastik kirliliği açısından önemli kaynak olarak kabul edilmektedir (Vardar, 2020). Ayrıca yağmur suyu da izlediği akış güzergahından ötürü önemli mike diğtarlarda mikroplastik içerdiği belirtilmiştir (Horton, v., 2017).

Mikroplastiklerin fiziksel özellikleri (boyut, yoğunluk vb.) onların taşınma sürecini ve kaderini etkilemektedir (Vardar, 2022). Rüzgâr, gelgitler, polimerlerin sucul ortamlardaki batma ve ilerleme süreçleri de taşınımlarını etkilemektedir (Vardar, 2022). Mikrobiyal değişimler ve organik- inorganik maddelerin toplanması mikroplastiklerin fiziksel özelliklerini etkileyerek su ortamındaki akıbetini belirlemektedir (Vardar, 2022). Plastiklerin tüm ayrışma durumları değişik ortamlarda değerlendirilir ama daha çok ilk aşamaları bu süreçte daha önemli olduğu için dikkate alınır (Vardar, 2022). Bu ayrışmayı etkileyen çevresel koşullar sıcaklık, basınç, tuzluluk vb. diğer faktörlerde vardır ancak bu konuda yapılan çalışmalar kısıtlıdır (Vardar, 2022). Mikroplastiklerin doğada bulundukları süreyi (yaşını) tespit etme konusunda da henüz yeni bir yöntem yoktur (Eerkes, ve diğ., 2015).

2.7. Mikroplastiklerin Alımı- Çevresel Etkileri ve Tehlikeleri

Sucul ortamlarda bulunan mikroplastiklerin alımı, canlıların yutma eylemi üzerinden gerçekleşen bir durumdur (Vardar, 2022). Farklı deniz canlılarının (planktonlar, balıklar, mercanlar vb.) bağırsak ve midelerinde mikroplastik varlığı kanıtlanmıştır (Vardar, 2022). Canlı vücutlarına mikroplastiklerin, yanlış tanımlanması ya da herhangi bir fark gözetmeden besin olarak aşırı miktarlarda girmesiyle olabilir (Vardar, 2022). Su canlılarının mikroplastikleri bünyelerinde barındırması devamında besin zincirine katılarak insanlara kadar ulaşmasına olanak verir. Sindirim haricinde canlıların diğer bölgelerinde de mikroplastiklere rastlanmış ve “tutunma” olayının da bir alım yolu olduğu belirtilmiştir (Vardar, 2022).

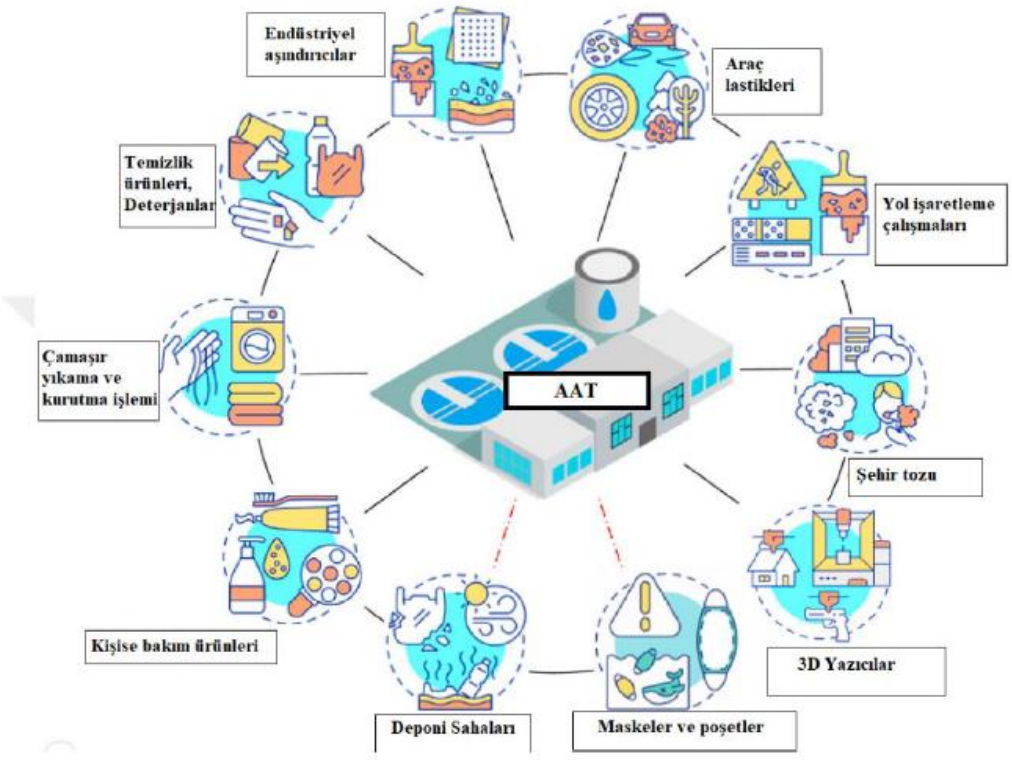
Mikroplastiklerin çevresel etkileri son yıllarda üzerinde durulan gündem konusu olmaya başladığı için literatür bu konuda eksiktir. Mikroplastiklerin toksik etkileri vardır ve bu toksisiteyi plastiklerin özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılarına eklenen katkı maddeleri arttırmaktadır (Bakkaloğlu, 2019). Küçük boyutlara sahip olması ve keskin yapısı olan mikroplastikler iltihaplanma problemlerine neden olur (Sun, ve diğ., 2019).

Mikroplastiklerin deniz canlısı olan istiridyelerin ve yavrularının üreme bozukluğu problemleri yaşamalarına neden olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır (Sussarellu, ve diğ., 2016). Balıklarda da bağırsak sorunlarına neden olmaktadır (Bakkaloğlu, 2019). Absorpsiyon yetenekleri doğrultusunda ağır metalleri, kalıcı organik kirleticileri, bifenilleri vb. zararlı etkenlerin taşınmasına sebep olurlar. Bu kimyasal maddelere maruz

kalan mikroplastikleri bazı deniz canlıları (Daphnia Magna vb.) için daha çok tehlikeli oldukları belirtilmiştir (Vardar, 2022). Polimer tiplerinin de bu taşıma durumunu etkilediği ve örneği istiridyelerdeki PCB konsantrasyonlarıyla ilgili yapılan çalışmada kanıtlanmıştır (Vardar, 2022).

2.8. Mikroplastiklerin Atıksu Arıtma Tesislerinde Varlığı ve Giderim Verimleri

Atıksu arıtma tesisleri mikroplastiklerin su ve kara ortamına salınımları açısından önemli kaynak oldukları yapılan çalışmalarla kanıtlamıştır (Bozdaş, ve diğ., 2020). Amerika, Hollanda, Türkiye gibi birçok ülkede raporlar sonucunda atıksu arıtma tesisi çıkış sularında mikroplastik varlığı belirtilmiştir (Bozdaş, ve diğ., 2020). Mikroplastikler atıksu arıtma tesislerine farklı kaynaklar aracılığıyla gelmektedir ve atık depolama sahaları ise bu duruma örnek verilebilir (He, ve diğ., 2019) (Şekil 2.9.). Çin'deki bir araştırmada endüstriyel atıksu da bulunan mikroplastik miktarı evsel atıksudan 1,8 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Long, ve diğ., 2019).



Şekil 2.9. Atıksu Arıtma Tesislerine Gelen Mikroplastiklerin Kaynakları (Gao, ve diğ., 2023)

Atıksu arıtma tesislerinde mikroplastikler genel olarak pelet, granül, köpük, film veya lif yapısında bulunmaktadır (Cantemur, 2022). Bunların bulunma oranları atık suyun geldiği kaynağa bağlı olarak değişmektedir. Lif yapıda mikroplastikler diğer türlere göre daha büyük bir orana sahiptir bunun sebebi sentetik kıyafetlerin evlerde yıkanma aşamasında geçirdiği durumlar (aşınma, parçalama vb.) sonucu olduğu belirtilmektedir (Ngo, ve diğ., 2019).

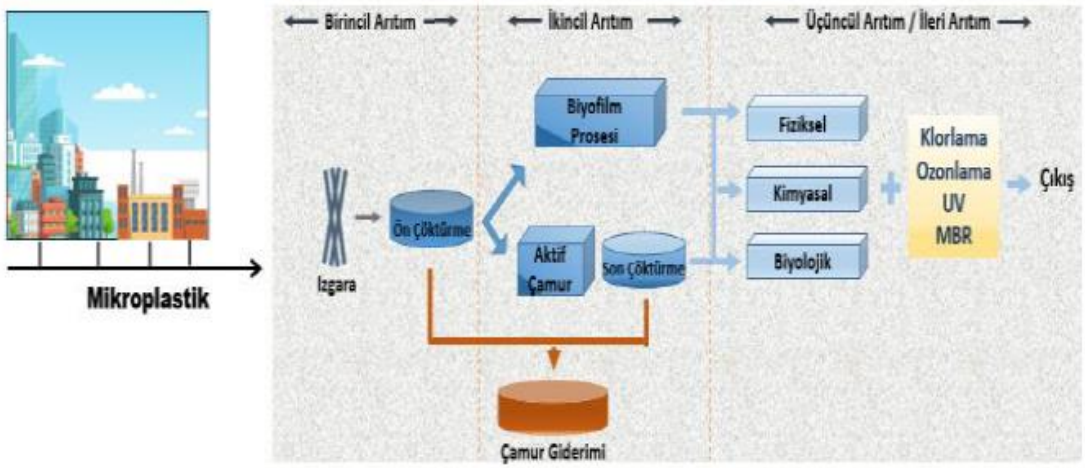
Atıksu arıtma tesislerinde, kullanılan arıtım yöntemi ve gelen atıksu karakterizasyonuna bağlı olarak mikroplastik arıtım verimi önemli ölçüde farklılık gösterir (Bozdaş, ve diğ., 2020). Bunun yanı sıra verimi tesisin çalışma durumları, çamur özelliği ve mikroplastiklerin özellikleri de etkilemektedir (Cantemur, 2022). Farklı ülkelerde, farklı arıtma teknolojileri (birincil, ikincil ve üçüncül) kullanılarak yapılan mikroplastik giderim çalışmasının verimlerine dair sonuçlar Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı Ülkelerde, Farklı Arıtım Yöntemleri ile Giderilen Mikroplastik Verimleri (Bozdaş, ve diğ., 2020)

Ülke	**Arıtma Yöntemi**	**Mikroplastik Miktarı**	**Mikroplastik Giderim Verimi (%)**
Çin	Birincil ve İkincil arıtma	28,4 parçacık/L	64,4
Çin (Beijing)	Birincil ve İkincil arıtma	0,59 parçacık/L	95
Avustralya (Sidney)	Birincil, İkincil, Üçüncül arıtma ve Ters Osmoz (RO)	0,28 parçacık/L RO:0,21 parçacık/L	92-99
İspanya (Madrid)	Birincil ve İkincil arıtma ve Anaerobik-anoksik-aerobik (A^2O)	10,7 parçacık/L	93,7
Türkiye (Seyhan)	İkincil arıtma	7,02 parçacık/L	79
Türkiye (Yüreğir)	İkincil arıtma	4,11 parçacık/L	79
Güney Finlandiya (Hameenlinna)	Üçüncül arıtma, Çözünmüş Hava Filtrasyonu (DAF)	0,1 parçacık/L	95
Güney Finlandiya (Turku)	Üçüncül arıtma, Hızlı Kum Filtresi (RSFF)	0,02 parçacık/L	97,1

Birincil arıtmada, çökeltim havuzundaki sıyırma işlemi ve kum giderme ünitesindeki çökme sonucu oluşan floklaşma yapısı mikroplastiklerin %35-59'luk bir kısmını

giderilmesi sağlanmaktadır (Can, 2022). İkincil arıtım esnasında da giderim verimi oldukça yüksek olup, bunu flok adsorpsiyonları ve biyolojik bozunma süreçleri ile gerçekleştirmektedirler (Can, 2022). Oluşan floklar, mikroplastikleri bünyelerinde kolayca hapsedebilmek için sahip oldukları viskoz yapı ile hücre dışı maddeler salgılayarak giderim veriminin artmasını sağlarlar (Can, 2022). Üçüncül (ileri) arıtımda kullanılan farklı yöntemler ve bunların kombinasyonlarıyla mikroplastiklerin daha iyi giderildiği ve yüksek kaliteli atıksu elde edilebilir (Freeman ve diğ., 2020) (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Atıksu Arıtma Tesislerinde Kullanılan Arıtım Yöntemleri (Akarsu, 2022)

Iyare (2020) ve arkadaşları, yapılmış olan 21 çalışma sonucuna göre mikroplastiklerin atıksu arıtma tesislerinde kullanılan yöntemlere göre giderim verimlerinin karşılaştırılması sonuçlarını, birincil %72, ikincil %88 ve üçüncül arıtmada ise %94 olarak açıklamışlardır.

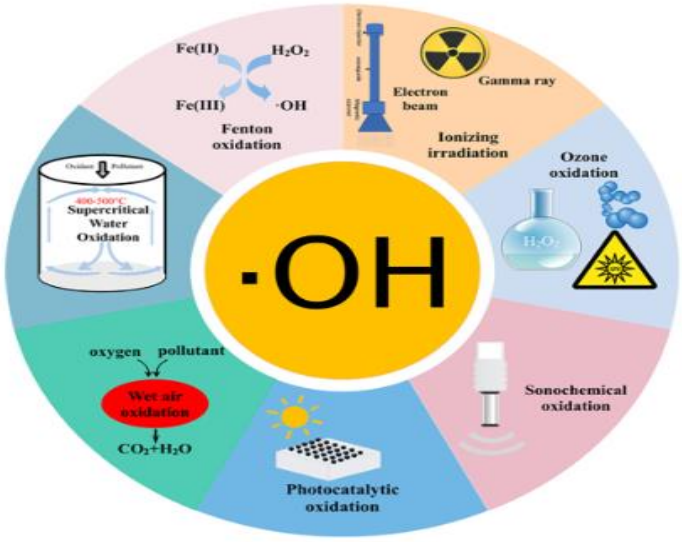
2018 yılında bir atıksu arıtma tesisinde yapılan çalışmada, 3 ay süresince tesisten alınan numunelerde giderim veriminin %98,3 olduğunu belirlenmiş ve yapısal olarak da liflerin (%82) parçacık(film) (%18) türünden miktar olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Lares, ve diğ., 2018).

Yapılmış olan başka bir araştırmada ise kullanılan ozon, membran disk filtresi ve hızlı kum filtrasyonu gibi çeşitli arıtım yöntemleri sonucundaki verimler değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda da en etkili giderim verimi %98 ile ileri arıtımda sağlanırken, ikincil arıtmada %91,9 ve birincil arıtmada %75 gibi oldukça yüksek verimler elde edilmiştir (Bakkaloğlu, 2019).

Mikroplastik giderim verimleriyle ilgili olan çalışmalar incelendiğinde en yüksek verimler üçüncül (ileri) arıtım yöntemlerimden biri olan oksidasyon süreçlerinin kullanıldığı proseslerde görülmektedir.

2.9. Ozon Oksidasyon Yöntemi

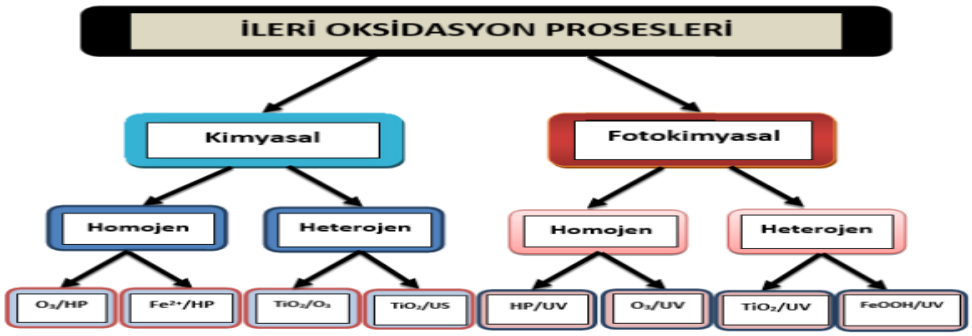
Arıtım tesislerinde genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtmalar kullanılmakta ve bunların giderim verimlerini iyileştirme konusunda eksik kaldığı durumlar için ileri oksidasyon prosesleri adı verilen yeni teknolojiler geliştirilmeye başlanmıştır (Topkaya, 2021). Biyolojik bozunmaları güç olan, genelde toksisiteye sahip kirletici maddeler için kullanılmakta olan oksidasyon prosesleri, atıksuyun toksisitesinin azaltır ve bozunmayı kolaylaştırmaya yardımcı olur (Topkaya, 2021). İleri oksidasyon prosesleri ortamın sıcaklık değişimine ve basıncına rağmen oldukça kuvvetli ve kısa elektrofilik özelliğe sahip oksidan olan hidroksil radikallerinin (•OH) ortaya çıkartılması temeline dayalı bir prosestir (Topkaya, 2021) (Şekil 2.11.).



Şekil 2.11. Hidroksil Radikallerinin Oluşum Mekanizmaları

İleri oksidasyonunda kullanılan •OH 2,8 V redoks potansiyeline sahip olan en kuvvetli radikal olup kirleticilerin tamamen mineralizasyonunun sonucunda karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) olarak tehlikesiz son ürünlere dönüşmesini sağlar (Topkaya, 2021). Arıtma işleminde kullanılan bazı oksidatifler ve redoks potansiyelleri şöyledir; Flor (3,06 V), Ozon (2,08 V), Hidrojen Peroksit (1,78 V), Klor (1,36 V), Oksijen (1,23 V), Brom (1,09 V) ve İyot (0,54 V). Genel olarak kimyasal etkileşimler üzerine kurulmuş olan oksidasyon

prosesleri ilave olarak ultraviyole (UV) ışık kaynağı kullanılmasına göre farklı kategorizasyonları yapılmaktadır (Topkaya, 2021) (Şekil 2.12.).



Şekil 2.12. İleri Oksidasyon Çeşitleri (Alaton, 2022)

2.9.1. Ozon (O3) Prosesi

Ozon keskin kokuya sahip ve hava ya da oksijenin kullanılmasıyla anlık olarak üretilen bir gazdır (Topkaya, 2021). Redoks potansiyeli 2,08V olan yüksek bir oksidandır. Üç oksijenin bir araya gelmesi sonucunda oluşan ozon kararsız bir moleküldür ve bundan dolayı suda bulanan diğer bileşenlerle reaksiyonları oldukça hızlıdır (Kim, ve diğ., 2022). Ozonun reaksiyonları aşağıda verilmiştir (Eşitlik 2.1.) (Kim, ve diğ., 2022);

$$OH^- + O_3 \rightarrow HO_2^- + O_2 \quad (2.1)$$

$$OH^- + O_3 \rightarrow HO_4^- \quad (2.2)$$

$$O_2^{\bullet-} + O_3 \rightarrow O_2 + O_3^{\bullet-} \quad (2.3)$$

$$O_3^{\bullet-} \rightarrow O_2 + O^{\bullet-} \quad (2.4)$$

$$O_3^{\bullet-} + H_2O \rightarrow \bullet OH + OH^- \quad (2.5)$$

Ozon molekülünün bazı avantajları şunlardır;

- Havadan veya oksijenden elektrik kullanımıyla kolayca elde edilmesi,
- organik ve inorganik bileşiklerle kolayca reaksiyona girmesi,
- arıtılmış suyun dezenfeksiyonu, kimyasal oksijen ihtiyacının azaltılması,
- renk, koku ve bulanıklık gibi çoklu uygulamalara elverişli olması olarak sıralanabilir (Topkaya, 2021).

Suda ozon kalıntılarının kalma süresi uzun değil ve yerinde oksijenden kolayca üretilmesi de en büyük avantajlarındandır ancak aşırı maliyetli bir molekül olması kullanımı açısından bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır (Jihye, ve diğ., 2019).

Ozonun, elektron konfigürasyonu nedeniyle suda; oksidasyon–indirgeme reaksiyonları, dipolar siklo katılma reaksiyonları ve elektrofilik yer değiştirme reaksiyonları gerçekleşir. Reaksiyon sonucunda serbest radikallerin oluşma ihtimalleri vardır. Oluşan bu radikaller kendilerini bazı aşamalar ile hidroksil radikallerini oluşturabilmek için yayar. Bu yüzden ozonun reaksiyonları su ortamında iki farklı şekilde doğrudan veya dolaylı reaksiyonlar olarak kategorize edilir (Topkaya, 2021). Ozonun diğer kimyasal maddelerle girdiği reaksiyonlar doğrudan, ozonun reaksiyonları sonucu oluşan hidroksil radikalleriyle sudaki diğer bileşikler ile girdiği reaksiyonlar ise dolaylı olarak tanımlanmaktadır (Topkaya, 2021).

2.9.2. Ozon Prosesi ile Mikroplastik Giderimi ve Yapılan Çalışmalar

Mikroplastikler ozonla temas ettiklerinde bazı özelliklerinde değişiklikler tespit edilmiş ve bu sonuçların doğrultusunda mikroplastiklerin oksidasyon ile giderilmesi konusunda farklı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Kim, ve diğ., 2022). Bazı araştırmacılar, plastiklerin ozon etkisi altındaki değişimlerini ve dayanıklılık sürelerini güçlendirmek için uzun yıllar boyunca çok sayıda araştırma yapmışlardır (Jıhye, ve diğ., 2019). 1971 yılında Kefeli ve arkadaşlarının plastikler ile ozonun etkileri hakkında yaptıkları ve sonucunda plastiklerin oksidatif olarak ozon ile bozunması sonucunda farklı fonksiyonel grupları (asitler, ketonlar hidroperoksitler vb.) oluşturduklarını kanıtladıkları çalışma bu konuda yapılmış en eski çalışmadır (Jıhye, ve diğ., 2019). Ozonun plastiklerle olan etkileşimi ile ortaya çıkan en önemli sonuç, oksijen içeren grupların artması ve yüzey oksidasyonun oluştuğunun ispatı iken diğeri ise yüzey hidrofiliğinin artması durumudur (Jıhye, ve diğ., 2019). Bu ise ozon prosesinin plastiklerin çevresel davranışlarının değişim gösterebileceğini doğrulamıştır (Hu, ve diğ., 2023). Ozon bazlı oksidasyon prosesleri ile ilgili yapılan çalışmalar Tablo 2.4.'de verilmiştir.

Hidayaturrahman ve arkadaşlarının (2019) Güney Kore'de yaptıkları bir çalışmada, atıksu arıtma tesislerinde en etkili mikroplastik arıtım yöntemini belirlemek için üç farklı yöntem denemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda birincil ve ikincil arıtma sonucunda %75 giderim verimini, ileri arıtım ile verimin %98'e kadar çıktığı gözlemlenmiştir. En yüksek mikroplastik giderimi ise %89,9 ile ileri arıtım yöntemi olan ozon prosesi ile yapılmıştır.

Solís-Balbín ve arkadaşlarının (2023) İspanya'da bir atıksu arıtma tesisinde geri kazanılan sudan mikroplastiklerin arıtımı için ozonlama yöntemini analiz etmişlerdir. Sonucunda elde edilen giderim verimleri %45'tir. Ozon prosesinin ilk aşamalarında hem film hem de lifli yapılar yavaş yavaş sayıca azalmaya başladı. Mikroplastiklerin küçük boyutlara bölünmesinden dolayı konsantrasyonlarında artış ve düşüşler görülmüştür.

Tablo 2.4. Ozon Bazlı Oksidasyon Prosesleri ile Atıksu Arıtımına Yönelik Literatür Çalışmaları

Giderilen Madde	Yöntem	Giderim Verimi (%)	Kaynakça
Mikroplastik	O_3	45	(Solís-Balbín, ve diğ., 2023)
Mikroplastik	O_3	90	(Hidayaturrahman, ve diğ.,2019)
Renk	O_3	7	(Saravanathamizhan, ve diğ., 2021)
	O_3/EC	100	
KOİ	O_3	62	
	O_3/EC	83	
BPA	O_3	97	(Topkaya, 2021)
	O_3/UV/ZnO	98	
KOİ	O_3/ZnO	70	
TOK	O_3	50	
	O_3/UV/ZnO	72	
	O_3/UV/TiO_2-RGO	98	
KOİ	(Foto-Elektro-Fenton -Fered- O_3)	72	(Kreutz, ve diğ.,2023)
Organik Mikrokirleticiler	O_3	>85	(Gorito, ve diğ., 2021)
Bütil p-Hidroksibenzoat	O_3/UVC/ZnO	96	(Sheikhmohammadi, ve diğ.,2021)
Sızıntı Suyu Arıtımı	O_3/UVC	>70	(Gomes, ve diğ., 2021)
Butoben ve Fenilmetil Ester	O_3/UV/ZnO	96	(Asgari, ve diğ., 2021)

2.10. Taguchi Yöntemi

Dr. G. Taguchi'nin geliştirerek ortaya çıkardığı deneysel çalışmalar için çok sık kullanılan bir metottur. Taguchi metodu ürün veya sürece etki eden etmenlerin iyileştirilmesi, kalite parametrelerinde sürdürülebilirliğinin sağlanmasıyla amaca uygun yapılması planlanan deneysel çalışma sayısını en aza indirmeyi sağlar (Beram, 2021). Maliyetin en aza indirilmesi ve bunun analizi esnasında da Taguchi metodu önemlidir (Küçük, ve diğ., 2022). Kontrolünün sağlanması güç olan diğer faktörlerin de en az sayıya indirilmesi bu metot yardımıyla yapılır (Beram, 2021). Uzun zamanda yapılan ve maliyetinin yüksek olduğu deneysel çalışmalarda Taguchi metodu; çalışmaya etki eden bir faktörü incelerken diğer etki faktörlerinin sabit kalmasını ve yalnızca istenilen faktörün değiştirilmesi temeline dayanmaktadır (Küçük, ve diğ., 2022). Deneysel çalışma sürecindeki etmenlere karşı değişimler incelendiğinde, sürecin sağlıklı kontrolünün yapılması için uygun adımlar atılabilir (Küçük, ve diğ., 2022). Taguchi yöntemi, kimya, çevre kalitesi, diş bilimi, enerji sektörü, yapı mühendisliği gibi birçok alanda araştırmacılar tarafından kullanılan metottur (Hayatzadeh, ve diğ., 2023). Varyans analizi (ANOVA) seçilen parametrenin etkisi P (önem/olasılık) değerine göre belirlenmektedir (Topkaya, 2021). %95 güven aralığında ve $P < 0,05$ olduğunda parametrenin tepki üzerindeki etkili olduğu sonucu elde edilmektedir (Topkaya, 2021). Taguchi yöntemi ve varyans analizi parametreler arasındaki ilişkinin ve optimum şartların belirlenmesini sağlar (Khandey ve diğ., 2023). Taguchi deneysel tasarım şeması 2.13.'de verilmiştir. Taguchi metodunda kalite karakteri sinyal/ gürültü (S/N) oranı kullanılır ve ölçülebilir bir değerdir. S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır (Pınarbaşı, 2023).

Deney sonuçları S/N değerlerine dönüştürülerek sonuçlar optimize edilir. Bu yöntemde optimizasyon karakteristikleri; "En küçük en iyi", "En büyük en iyi" ve "Nominal en iyi" şeklindedir. En yüksek mikroplastik giderimine ulaşılmak istendiği için "en büyük en iyi" yaklaşımı tercih edilmiştir. Buna ait formül aşağıda verilmiştir (2.6).

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{2.6}$$

Burada,

yi : performans yanıtının i. gözlem değerini, n ise test sayısını ifade etmektedir.



Şekil 2.13. Taguchi Deneysel Tasarım Şeması (Pınarbaşı, 2023)

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Kimyasal Maddeler

%95-97 saflıkta sülfürik asit (H_2SO_4), sodyum hidroksit (NaOH) ve %95'lik etil alkol (C_2H_5OH) Merck firmasından temin edilmiştir. TiO_2, ZnO katalizörleri ise Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir.

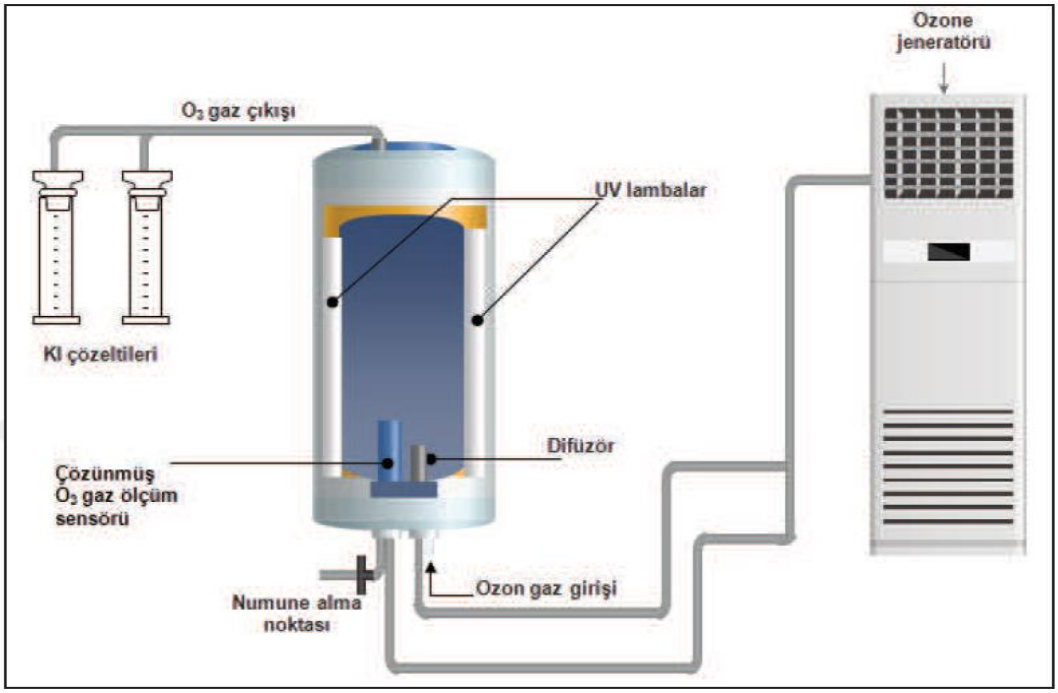
3.2. Kullanılan Ekipmanlar

Deneysel çalışmalar yürütülürken kullanılan cihaz ve ekipmanlar; ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (MTOPS Ms300 Hs), pH metre ve iletkenlik (Thermo Scientific Orion star A111), etüv (Nüve FN 400), termoreaktör (Spectroquant TR 420), hassas terazi (Precisa XB 220A), ozon reaktörü (Teknozone TKZ-25G), ozon ölçüm cihazı (TKZ-PPM51), UV ışık kaynağı (Osram Germicidal Puritec HNS G5 8W UVC), lamba (Philips TL 8W Actinic BL UVA), ultra saf su cihazı (Elga), askıda katı madde (AKM) süzme seti (Millipore), vakum pompası (Laborteks), cam elyaf filtreler (Millipore), mikroskop (Olympus SZ51 Stereo Binoküler) ve kamera (OUPCAM marka XCAM4K8MPA)'dır.

3.3. Oksidasyon Deney Düzeneği

Ozon bazlı oksidasyon proseslerinde kullanılan oksidasyon deney düzeneği Şekil 3.1.'de verilmiştir. Reaktör düzeneği parçaları; reaksiyon tankı, ozon jeneratörü ve ozon ekranından oluşmaktadır. Ozonun üretilmesi için plaka tip ozon jeneratörü kullanılmıştır. Jeneratör için gerekli hava 0,5 mikron aralığındaki pall filtreler ile temizlenen ve hava kurutucusuyla kurutulması sağlanan ortam havasından alınmaktadır. Kimyasal filtrelerden geçirilmiş olan ortam havası %90-95 oranında saf oksijene dönüşür ve 5 L/dk debiye ulaşır. Ozon gazının oluşumu debi ölçerin çıkılında oksijenin, yüksek voltaja sahip olan frekans reaktörünün içinde parçalanması sonucunda olur. Reaktör içerisinde bulunan difüzör ile ozon gazının reaktöre beslenmesi sağlanır. Düzeneğin otomasyon kontrolü ozon ölçüm cihazı ile sağlanmaktadır. Ozon ölçüm cihazıyla, suda bulunan çözünmüş ozon gazının miktarı gösterilir ve deney şartına göre ayarlanmış olan ozon dozuna göre jeneratörün çalışması ve durması sağlanır. Reaktör ısıya dayanıklı ve 2 L hacme sahiptir. İçerisinde 4 adet ultraviyole lamba bulunmaktadır. Reaktörün çalışması sırasında

herhangi bir ozon kaçağı olması durumunda, gazın toplanması için içerisinde KI çözeltileri bulunan şişelerin reaktör ile bağlantısı yapılmıştır (Topkaya, 2021).



Şekil 3.1. Oksidasyon Deney Düzeneği (Tokpaya, 2021)

3.4. Deneysel Çalışma Prosedürü

Kullar İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi çıkışından, Kasım 2022, Aralık 2022, Şubat 2023, Mart 2023 ve Nisan 2023 tarihlerinde 24 saatlik kompozit numuneler alınmıştır. Bu örneklemelerde, ozon bazlı oksidasyon prosesleri ile mikroplastik giderimi çalışmaları yürütülmüştür. Alınan numuneler ortalama +4°C' de buzdolabında bekletilmiştir. Laboratuvar ortamında kullanılan tüm cam malzemeler kullanılmadan önce etanol ile yıkanarak etüvde kurutulmuştur. Numunenin konulduğu tüm cam kapların üstü numuneye mikroplastik karışmasını engellemek amacıyla cam veya alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Deneysel çalışmaya başlarken numune oda sıcaklığı (18-21°C) seviyesine getirildikten sonra homojenliği sağlanarak mezüre 1 litre numune alınmıştır. Cam beher içerisinde numuneler istenilen pH (4-7-10) değerlerine getirilmiştir. pH düzenlemesi yapıldıktan sonra ozon oksidasyonu düzeneğinin içinde herhangi bir kalıntının kalmaması için saf su ile temizlenmesi sağlanmış ve numune düzeneğin içine boşaltılmıştır. Deneysel çalışmada katalizör (TiO_2- ZnO) kullanımı söz konusu ise, hassas terazide miktarı (0,5 gram) ayarlandıktan sonra reaktördeki numunenin üzerine eklenmiş ve reaktörün kapağı

kapatılmıştır. Oksidasyon reaktörüne ozon akışını sağlayacak olan ozon jeneratörü açılarak gerekli ozon dozu (5- 10- 15 ppm) ayarlanmıştır. Çalışmada ultraviyole ışığı kullanılacak ise reaktör içerisindeki 4 lamba aktif edilerek aynı anda ozon jeneratörü çalıştırılmıştır. Ozon gazı, reaktöre tabanındaki difüzör ile verilmiştir. Ozon oksidasyonu çalışma süresi (5- 30- 60 dakika) bittikten sonra temiz behere numune alınmıştır. AKM süzme düzeneği ile AP40 filtre kağıdından numune süzülmüştür. Süzülen numunenin filtre kağıtları cam petri kaplarına konulduktan sonra etüvde 70°C' de 30 dakika kuruması için bekletilmiştir. Etüvden alınan numunelerin desikatörde soğuması beklendikten sonra mikroskop altında mikroplastiklerin miktarı, uzunlukları, renkleri ve türleri belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda giderim verimi denklem 3.1.' de verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Verim = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

C_0 ve Ct, sırasıyla başlangıc ve *t* anındaki kirletici konsantrasyonlarını göstermektedir.

3.5. Analiz Yöntemleri

3.5.1. Mikroplastik Tayini

24 saatlik kompozit numuneler cam kaplar ile laboratuvar ortamına taşınmış ve 4°C de soğutucuda muhafaza edilmiştir. 5 mm lik elekten geçirilen örnek, organik maddelerden ayrıştırılmak için 20 saat H_2O_2 ile manyetik karıştırıcı üzerinde işleme tabi tutulmuştur. Kullanılan H_2O_2 miktarı, atıksu örneğinin KOİ konsantrasyonuna göre belirlenmiştir. 1litre atıksu örneği çelik elek setinden (1mm, 500µmve 200 µm) geçirilerek, mikroplastikler boyut kategorilerine ayrılmıştır. Elek üzerinde kalan kısım, saf su ile en az durulama yapılarak cam behere aktarılmıştır. Mikroplastik içeren su örnekleri AKM düzeneği kullanılarak Millipore AP40 cam elyaf filtre kağıtlarından süzülmüştür. Filtre kağıtları cam petri kaplarına alınarak 70°C' de 30 dakika kurutulmuştur. Mikroplastikler, mikroskobik sayım metodu ile görsel olarak belirlenmiştir. Bu amaç ile Olympus SZ51 Stereo Binoküler mikroskopu kullanılmıştır. Mikroskop üzerine bağlanan TOUPCAM marka XCAM4K8MPA model kamera ile görüntülerin fotoğrafları çekilmiştir. Software kullanılarak, partikül boyut ve şekilleri belirlenmiştir.

200 µm boyutunun altında kalan mikroboncuklar nicelik olarak değil niteliksel olarak ifade edilmiştir. Arıtma çalışmalarının yürütüldüğü atıksu örneklerinde tespit edilen mikroplastiklerin sayıları ve özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Çalışılan Örneklemelerde Belirlenen Mikroplastik Sayıları ve Özellikleri

Aylar	**Mikroplastik sayısı (adet/L)**	**Mikroplastik Özellikleri**
Kasım 2022	32	Fiber (Siyah- Mavi- Şeffaf-Kahverengi- Pembe- Yeşil)
Aralık 2022	63-104*	Fiber (Siyah-Kahverengi- Mavi- Yeşil)
Şubat 2023	44-39	Fiber- Film- Pelet- Boncuk (Siyah- Mavi-Kırmızı-Mor-Pembe-Mor- Şeffaf- Ala- Yeşil- Kahverengi)
Mart 2023	42-49	Fiber- Film- Pelet- Boncuk (Siyah- Mavi-Kırmızı-Pembe-Kahverengi- Sarı- Mor- Şeffaf)
Nisan 2023	65	Fiber- Film- Boncuk- Amorf/Köpük (Siyah- Mavi-Kırmızı-Mor-Pembe- Mor- Şeffaf- Ala- Yeşil- Kahverengi- Gri)

(*): Numunelerin saklandığı her bir cam kavanoz için ayrı sayım yapılmıştır.

3.6. Taguchi Deneysel Tasarımı

Taguchi ortogonal deney tasarımı az sayıda deney yaparak istatiksel sonuçlar üreten bir yöntemdir. Ozon oksidasyonu prosesinde pH, ozon dozu ve reaksiyon süresi önemli rol oynayan parametrelerdir. Bu parametrelere ait değer aralıkları, ön deneme çalışmaları ile belirlenmiştir. Tablo 3.2.'de, 3 faktör (pH, ozon dozu ve süre) ve 3 seviyeli olarak oluşturulan Taguchi ortogonal dizi tablosu verilmiştir. 3 faktör ve 3 seviyeli L9 tasarım matrisi için Minitab 17 programı kullanılmış ve deneyler iki tekrarlı olarak yapılmıştır.

Tablo 3.2. Ozon deneyleri reaksiyon şartları

Değişkenler	**Değer aralığı**
pH	4-7-10
Ozon dozu (ppm)	5-10-15
Süre (dakika)	5-30-60

4. DENEYSEL BULGULAR

2022 yılı Kasım ve Aralık aylarında, 2023 yılı Şubat, Mart ve Nisan aylarında ozon prosesleri ile arıtma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kasım ve Aralık ayında sadece O_3 prosesi diğer aylarda O_3/UVC/katalizör prosesleri yapılmıştır. Ocak ayında ozon jeneratörü bakım ihtiyacı doğduğundan çalışmalara ara verilmiştir.

4.1. Kasım 2022 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Kasım 2022 numunesi ile sadece ozon oksidasyonu prosesi arıtım çalışmaları yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir

Tablo 4.1. Kasım 2022 için Giderim Verimleri

Deney No	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
1	4	5	5	59
2	4	10	30	47
3	4	15	60	84
4	7	5	30	78
5	7	10	60	66
6	7	15	5	53
7	10	5	60	53
8	10	10	5	72
9	10	15	30	66

Tablo 4.1'e göre; Kasım 2022 örneklemesinde en iyi giderim verimi %84 ile pH 4, 15 ppm ozon dozu ve 60 dakika reaksiyon süresi deney şartlarında sağlanmıştır. pH değerlerine göre verimler incelendiğinde pH 7 de %78, pH10'da %72 giderim verimleri elde edilmiştir. Ozon dozunun giderim verimi üzerinde etkisi; 5 ppm'de %78, 10 ppm'de %72'dir. Reaksiyon süresi baz alındığında ise, 5 dk sonunda %72, 30 dk'da %78 giderim verimlerine ulaşılmıştır.

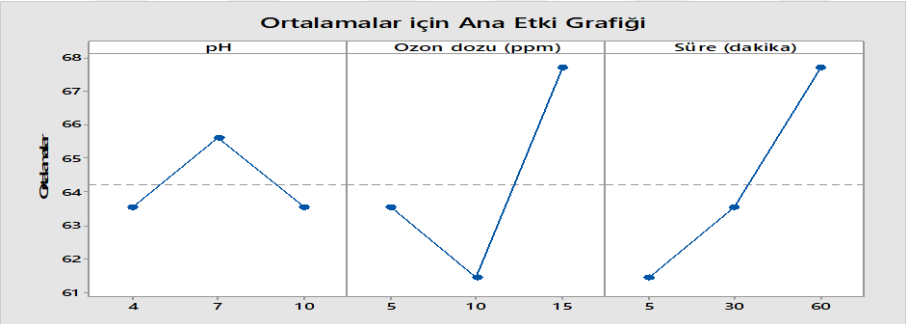
Arıtım sonrası mikroplastik türü olarak sadece fiber yapılar gözlenmiştir. Mikroplastiklerin maksimum uzunluğu 7, 94 mm'dir. En yüksek giderim verimine ulaşılan 3 numaralı deney şartında belirlenen mikroplastik türleri, renkleri ve boyutları Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Kasım 2022 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği

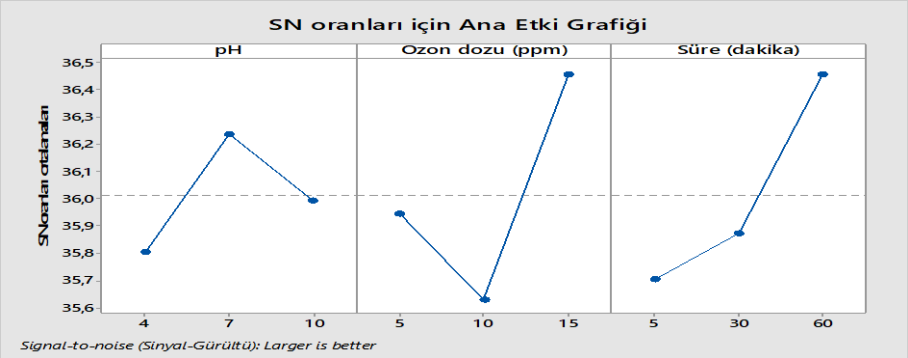
Tür/ Renk Fiber (Toplam 5 Adet/ L)	Boyut (mm)	
Siyah (2 Adet/ L)	3,08	0,74
Mavi (1 Adet/ L)	1,04	
Şeffaf (1 Adet/ L)	5,06	
Kahverengi (1 Adet/ L)	1,85	

Taguchi Analizi

Taguchi analizi Minitab 17 programı kullanılarak yapılmıştır. Ortalamalar (Şekil 4.1) ve SN (Sinyal /gürültü) oranları (Şekil 4.2) için ana etkiler grafiği sonuçlarına göre en iyi deney şartı; pH = 7, ozon dozu (ppm)= 15, süre (dk) = 60'dır. ANOVA Analiz sonucu mikroplastik giderim verimine etki eden pH, ozon dozu ve süre faktörlerinin performansları arasındaki farklılığını ortaya koyabilmek için (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA analizi ile bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir.



Şekil 4.1. Kasım 2022 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerleri



Şekil 4.2. Kasım 2022 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları

Tablo 4.3. Kasım 2022 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	0,2779	0,2779	0,139	0,01	0,987
Ozon dozu (ppm)	2	1,0447	1,0447	0,5223	0,05	0,951
Süre (dakika)	2	0,9395	0,9395	0,4697	0,05	0,956
Residual Error	2	20,4717	20,4717	10,2359		
Total	8	22,7338				

ANOVA analizinde bir parametrenin tepki üzerindeki etkisi önem/olasılık (P) değerine göre belirlenmekte, P <0,05 ve %95 güven aralığında parametrenin tepki üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Tablo 4.3 ve Tablo 4.4' e göre P değerleri her ikisinde de 0,05'ten büyük bulunmuştur. P değerlerine göre parametrelerin mikroplastik giderimi üzerinde tek başına etkili olmadığı belirlenmiştir. Parametreler arasındaki ikili etkileşimlerin mikroplastik giderim verimlerinde daha etkili olacaktır.

Tablo 4.4. Kasım 2022 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	8,68	8,68	4,34	0,01	0,992
Ozon dozu (ppm)	2	60,76	60,76	30,382	0,06	0,948
Süre (dakika)	2	60,76	60,76	30,382	0,06	0,948
Residual Error	2	1102,43	1102,43	551,215		
Total	8	1232,64				

4.2. Aralık 2022 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Aralık ayı numunesiyle sadece O_3 prosesi çalışılmıştır. Alınan numuneler ile yapılan ozon oksidasyon deneyinin deney şartları ve deney sonucundaki mikroplastik giderim sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Aralık 2022 için Giderim Verimleri

Deney No	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
1	4	5	5	5
2	4	10	30	75
3	4	15	60	81
4	7	5	30	68
5	7	10	60	90
6	7	15	5	44
7	10	5	60	79
8	10	10	5	56
9	10	15	30	68

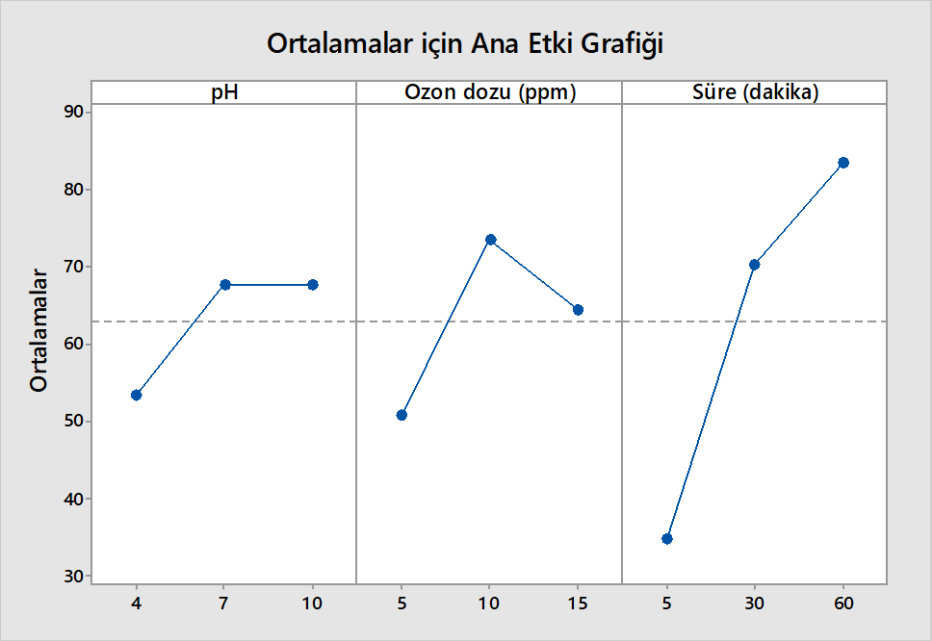
Tablo 4.4'e göre; maksimum %90 giderim verimine pH 4, 10 ppm ozon dozu ve 60 dakika reaksiyon süresi sonunda ulaşılmıştır. Arıtma sonrası mikroplastik tayininde sadece fiberler gözlenmiştir. Renklerin yoğunluk sıralaması çoktan aza doğru; siyah, mavi, kırmızı, kahverengi ve yeşildir. Mikroplastiklerin maksimum uzunluğu fiber türünde 13,65 mm'dir. En yüksek verimin elde edildiği 5 numaralı deneyin mikroplastik türleri, renkleri ve boyutları Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.6. Aralık 2022 için Ayı En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği

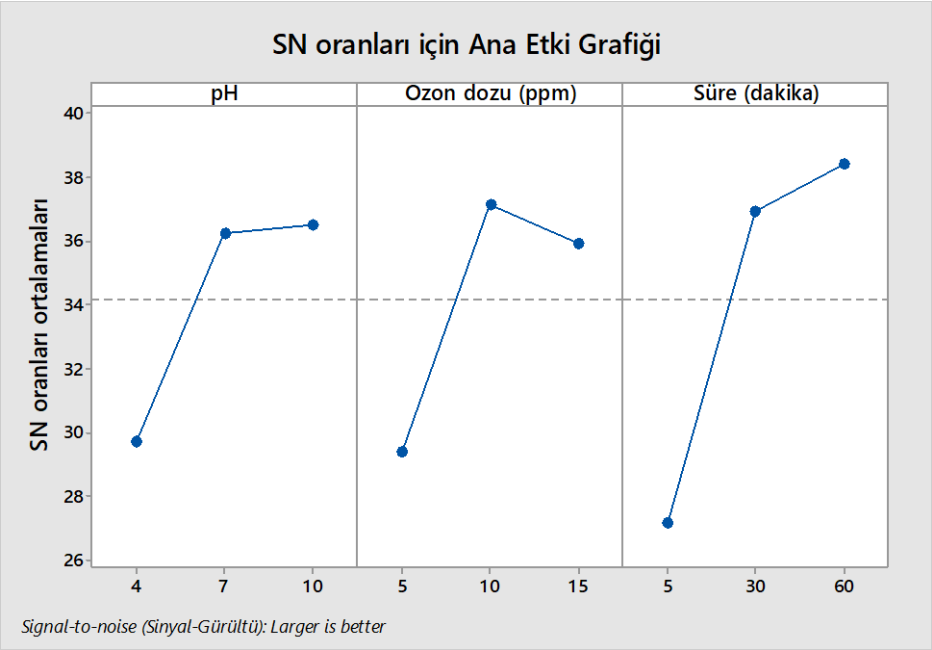
Tür/Renk	Boyut (mm)	
Fiber (Toplam 10 Adet/ L)		
Siyah (7 Adet/ L)	6,23	0,38
	0,66	0,61
	0,76	1,63
	1,35	
Mavi (2 Adet/ L)	0,47	0,37
Kırmızı (1 Adet/ L)	0,45	

Taguchi ve ANOVA Analizi

Ortalamalar ve SN (Sinyal /gürültü) oranları için ana etkiler grafiği sonuçlarına göre en iyi deney şartı; pH = 7 veya 10, ozon dozu (ppm)= 10, süre (dk) = 60'dır (Şekil 4.3 ve 4.4).



Şekil 4.3. Aralık 2022 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerleri



Şekil 4.4. Aralık 2022 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları

Tablo 4.7. Aralık 2022 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	89,08	89,08	44,54	1,03	0,493
Ozon dozu (ppm)	2	104,01	104,01	52	1,2	0,454
Süre (dakika)	2	225,65	225,65	112,83	2,61	0,277
Residual Error	2	86,56	86,56	43,28		
Total	8	505,3				

Tablo 4.8. Aralık 2022 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	410,8	410,8	205,4	1,25	0,445
Ozon dozu (ppm)	2	785,3	785,3	392,6	2,39	0,295
Süre (dakika)	2	3789,8	3789,8	1894,9	11,52	0,08
Residual Error	2	328,8	328,8	164,4		
Total	8	5314,7				

Tablo 4.7 ve 4.8'e göre P değerleri 0,05'ten büyüktür. Aralık numunesinde de parametrelerin mikroplastik giderimi üzerinde tek başına etkili olmadığı belirlenmiştir.

4.3. Şubat 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Alınan numuneler ile yapılan ozon oksidasyon deneyinin deney şartları ve deney sonucundaki mikroplastik giderim sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.9. Şubat 2023 için Ayı Giderim Verimleri

Deney No	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
1	**4**	**5**	**5**	**45**
2	**4**	**10**	**30**	**25**
3	**4**	**15**	**60**	**59**
4	**7**	**5**	**30**	**39**
5	**7**	**10**	**60**	**69**
6	**7**	**15**	**5**	**39**
7	**10**	**5**	**60**	**36**
8	**10**	**10**	**5**	**45**
9	**10**	**15**	**30**	**72**

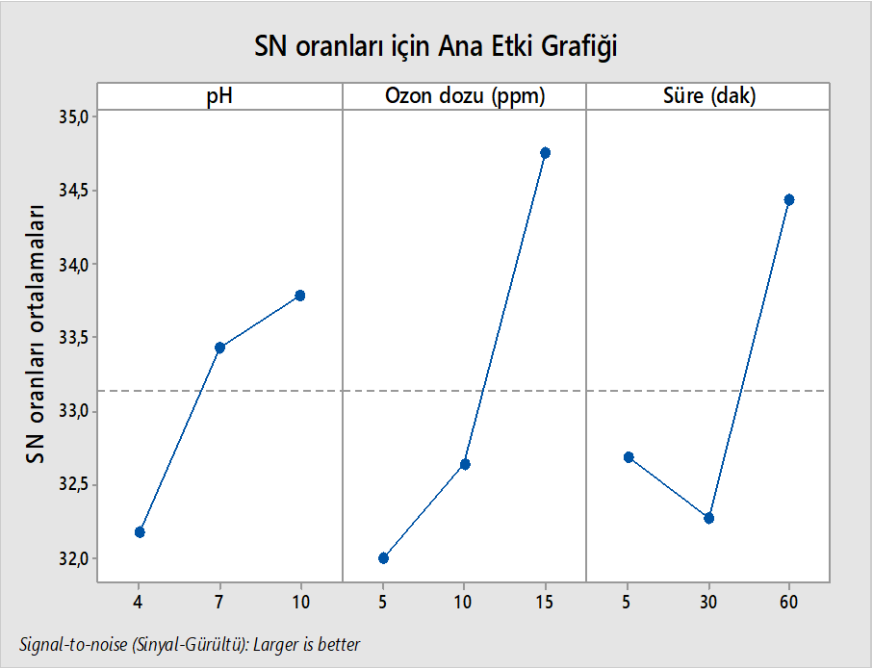
Tablo 4.7'e göre; elde edilen en yüksek verim %72 ile pH 10, O_3=15 ppm ve 30dk çalışma koşullarındadır. Mikroplastik analizleri sonucu belirlenen türler; fiber, film, boncuk ve pelet türleridir. Renklerin yoğunluk sıralaması çoktan aza doğru; siyah, mavi yeşil ve şeffaftır. Mikroplastiklerin maksimum uzunluğu fiber türünde 6,09 mm, film türünde ise 0,26 mm'dir. En yüksek verimin elde edildiği 9 numaralı deneyin mikroplastik türleri, renkleri ve boyutları Tablo 4.10' da verilmiştir.

Tablo 4.10. Şubat 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği

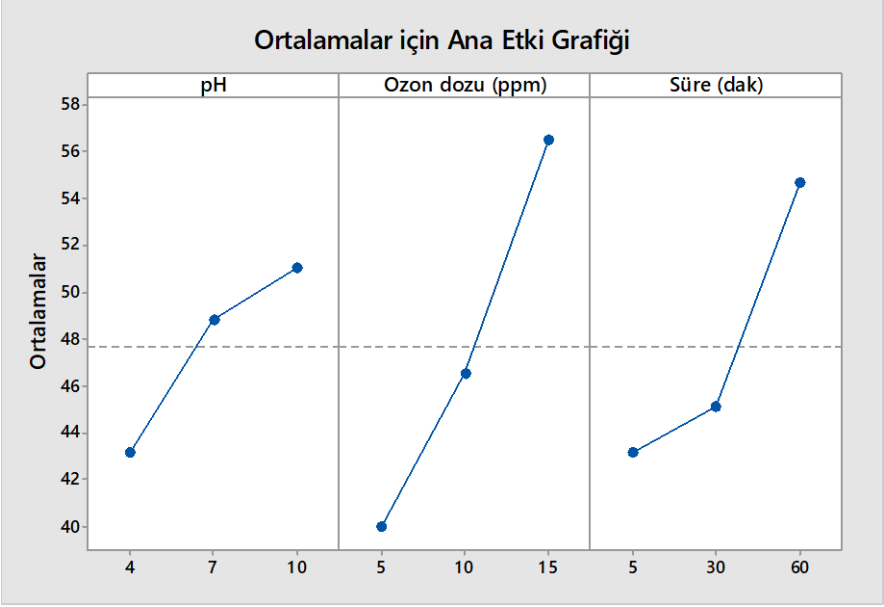
Tür	Boyut (mm)	
Fiber (Toplam 9 Adet/ L)		
Siyah (7 Adet/ L)	4,51	1,96
	1,23	1,02
	1,16	0,63
	0,34	
Mavi (2 Adet/ L)	0,2	1,91
Film (Toplam 2 Adet/ L)	Boyut (mm^2)	
Şeffaf (1 Adet/ L)	0,26	
Yeşil (1 Adet/ L)	0,19	

Taguchi ve ANOVA Analizi

En yüksek en iyi sonuçlara göre belirlenen optimum şart: pH=10 veya 7 olabilir Ozon dozu= 15 ppm Süre= 60 dk'dır (Şekil 4.5 ve 4.6).



Şekil 4.5. Şubat 2023 için Farklı Seviyelerdeki Ortalama Değerler



Şekil 4.6. Şubat 2023 için Farklı Seviyelerdeki S/N Oranları

Tablo 4.11. Şubat 2023 Çalışması Ortalama Değerlere Göre ANOVA

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	4,319	4,319	2,16	0,1	0,912
Ozon dozu (ppm)	2	12,526	12,526	6,263	0,28	0,781
Süre (dakika)	2	7,955	7,955	3,978	0,18	0,849
Residual Error	2	44,584	44,584	22,292		
Total	8	69,384				

Tablo 4.11 ve 4.12'e göre Şubat numunesinde de P değerleri 0,05'ten büyük bulunmuş ve mikroplastik giderimi üzerine parametrelerin tek başına etkili olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 4.12. Şubat 2023 Çalışması S/N Oranına Göre ANOVA Analizi

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
pH	2	99,8	99,8	49,9	0,08	0,927
Ozon dozu (ppm)	2	412,59	412,59	206,3	0,33	0,753
Süre (dakika)	2	227,88	227,88	113,94	0,18	0,847
Residual Error	2	1259,95	1259,95	629,97		
Total	8	2000,22				

4.4. Mart 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Mart ayı numunesinde, şubat ayı sonuçlarına göre belirlenen optimum şartlar çalışılmaya başlanmıştır. Optimum şartlar pH:7, Süre: 60 dakika ve ozon dozu 10 ppm'dir. Optimum şartlarda O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO ile arıtım çalışmaları yapılmıştır. Kullanılan ZnO katalizörü nano' dur. Alınan numuneler ile yapılan ozon bazlı deney şartları ve deney sonucundaki mikroplastik giderim sonuçları Tablo 4.13'da verilmiştir.

Tablo 4.13. Mart 2023 için Mikroplastik Giderim Verimleri

Proses	**pH**	**Ozon dozu (ppm)**	**Süre (dakika)**	**Mikroplastik Giderim Verimi (%)**
O_3	**7**	**10**	**60**	**74**
O_3	**7**	**10**	**60**	**76**
O_3+UVC	**7**	**10**	**60**	**62**
O_3+UVC	**7**	**10**	**60**	**63**
O_3+UVC+ TiO_2 (Nano)	**7**	**10**	**60**	**78**
O_3+UVC+ZnO	**7**	**10**	**60**	**70**

Yapılan deney sonuçlarına göre belirlenen türler fiber, film ve boncuk türleridir. Renklerin yoğunluk sıralaması çoktan aza doğru; siyah, mavi, kırmızı, kahverengi, şeffaf, pembe, sarı ve mordur. Mikroplastiklerin maksimum uzunluğu fiber türünde 11,02 mm, film türünde ise 2,58 mm^2'dir. En yüksek verimin elde edildiği deneyin mikroplastik türleri, renkleri ve boyutları Tablo 4.14' de verilmiştir.

Tablo 4.14. Mart 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği

Tür/Renk	Boyut (mm)	
Fiber (Toplam 11 adet/ L)		
Siyah (8 adet/ L)	0,7	0,67
	0,74	0,53
	0,65	0,65
	1,75	0,42
Mavi (3 adet/ L)	0,92	0,97
	0,75	

4.5. Nisan 2023 Örneklemesi ile Yürütülen Deneysel Çalışmalar

Nisan ayı numunesinde, şubat ayı sonuçlarına göre belirlenen optimum şartlar ile çalışma devam edilmiştir. Optimum şartlarda O_3, O_3/UVC, ve O_3/UVC/ZnO ile arıtım çalışmaları yapılmıştır. Kullanılan ZnO katalizörü nano olmayan katalizördür. Alınan numuneler ile yapılan ozon bazlı deney şartları ve deney sonucundaki mikroplastik giderim sonuçları Tablo 4.15'de verilmiştir.

Tablo 4.15. Nisan 2023 için Giderim Verimleri

Proses	**pH**	**Ozon dozu (ppm)**	**Süre (dakika)**	**Mikroplastik Giderim Verimi (%)**
O_3	**7**	**10**	**60**	**82**
O_3+UVC	**7**	**10**	**60**	**68**
O3+UVC+ZnO	**7**	**10**	**60**	**77**

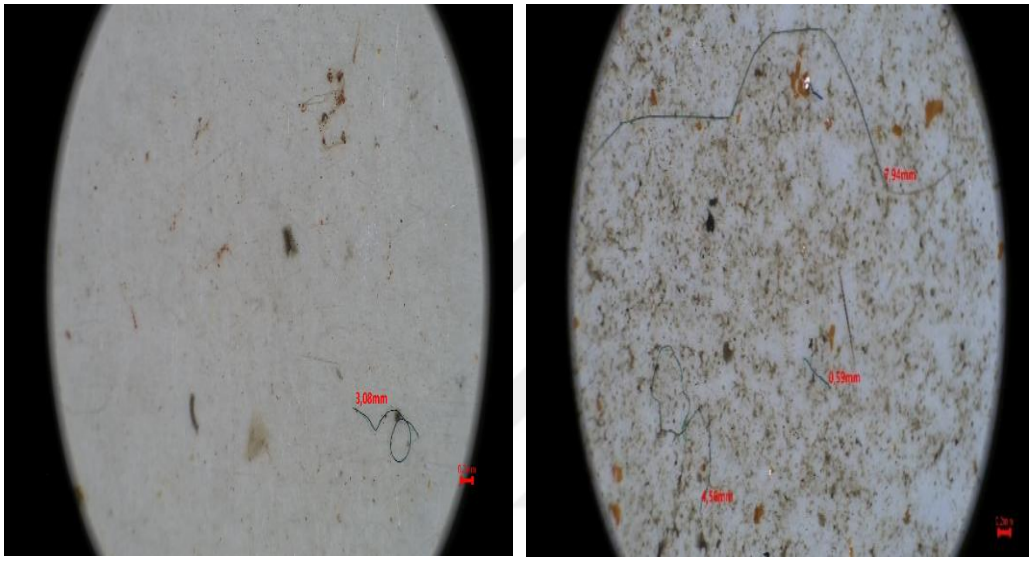
Yapılan deney sonuçlarına göre belirlenen türler fiber, film, boncuk, amorf/köpük türleridir. Renklerin yoğunluk sıralaması çoktan aza doğru; siyah, mavi, kırmızı, pembe, gri, kahverengi, sarı, şeffaf ve mordur. Mikroplastiklerin maksimum uzunluğu fiber türünde 11,76 mm, film türünde 0,18 mm^2, pelet türünde 0,42mm^2 ve köpük/amorf türünde ise 0,18mm^2'dir. En yüksek verimin elde edildiği 1 numaralı deneyin mikroplastik türleri, renkleri ve boyutları Tablo 4.16' de verilmiştir.

Tablo 4.16. Nisan 2023 için En Yüksek Verime Sahip Deneyin Mikroplastik Karakteristiği

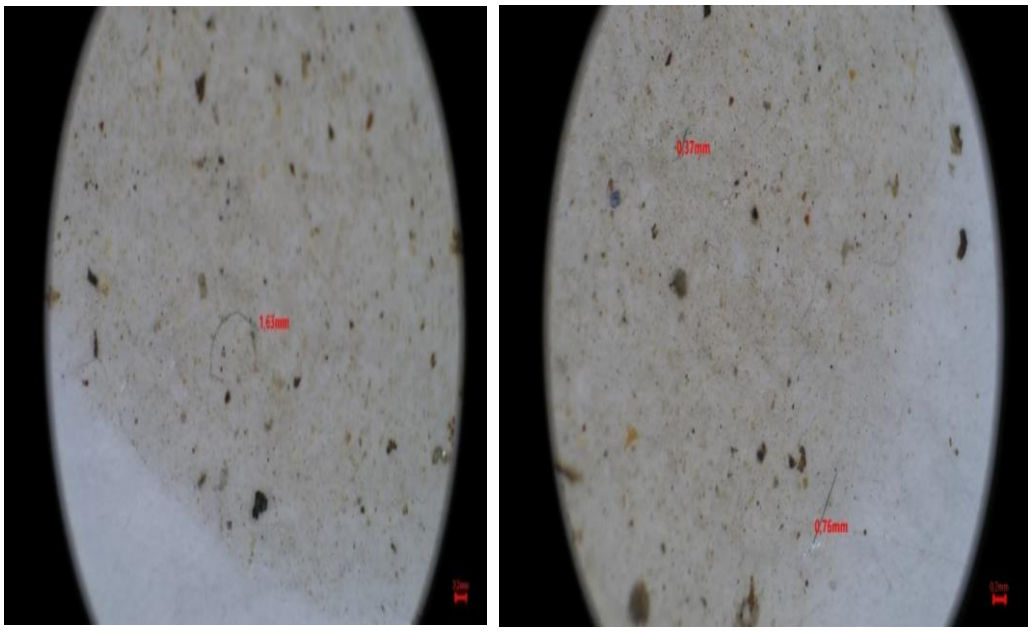
Tür	Boyut (mm)	
Fiber (Toplam 9 adet / L)		
Gri (3 adet/ L)	0,78	3,92
	0,75	
Siyah (2 adet/ L)	0,86	0,58
Pembe (2 adet/ L)	1,08	1,41
Mavi (1 adet/ L)	1,19	
Kahverengi (1 adet/ L)	3,31	
Film (Toplam 3 adet/ L)	Boyut (mm^2)	
Kahverengi (1 adet/ L)	0,01	
Şeffaf (1 adet/ L)	0,04	
Sarı (1 adet/ L)	0,06	

4.5.1. Mikroskop Görüntüleri

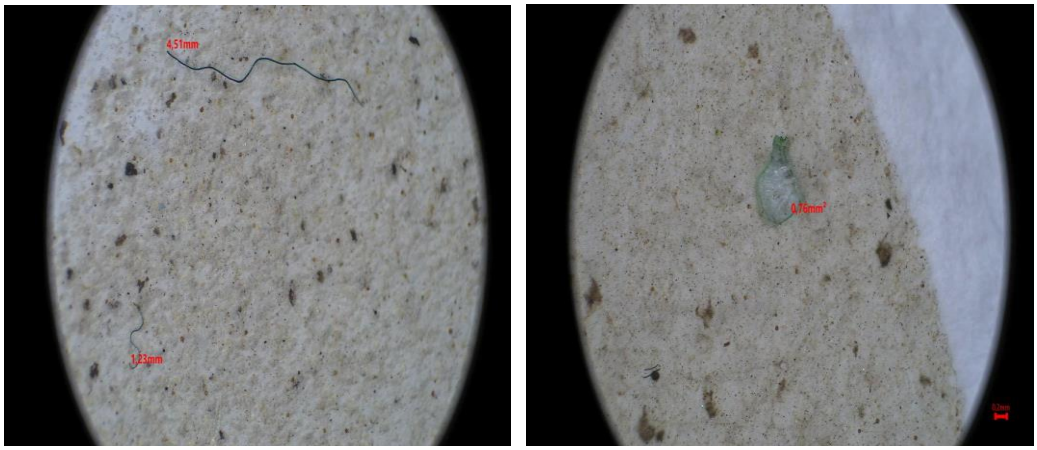
Ham atıksu mikroskop görüntüleri incelendiğinde yoğun olarak siyah fiber yapılı mikroplastikler bulunurken mevsimsel değişikliklere göre renk ve tür bakımından farklılıklar gözlemlenmiştir. Arıtım sonrası belirlenen mikroplastiklerin görselleri Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 ‘de verilmiştir. Ozon bazlı arıtma prosesleri ile mikroplastiklerin bertarafı sağlanırken, bazı mikroplastiklerin boyut olarak parçalanmaları sonucu arıtım sonrası sayılarında artış gözlenmiştir.



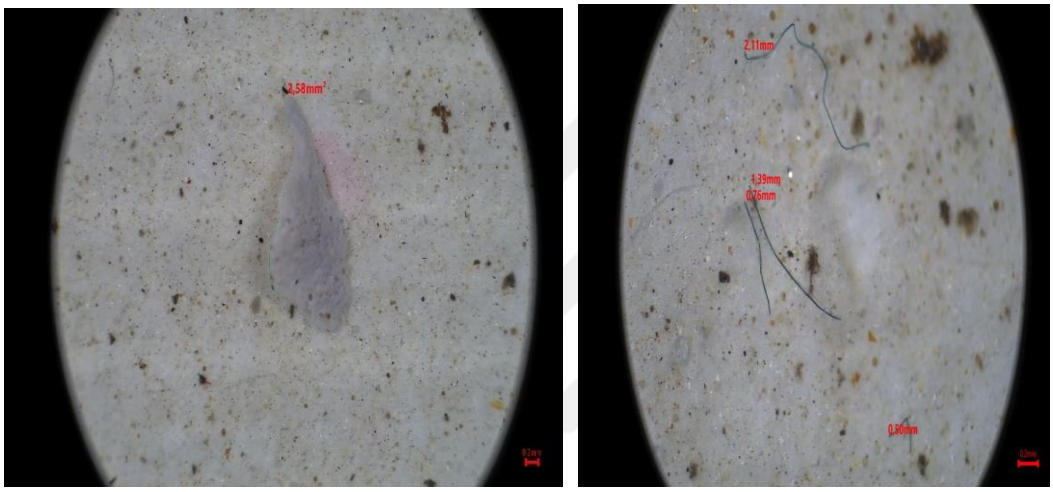
Şekil 4.7. Kasım 2022 Ayı Mikroskop Görüntüleri



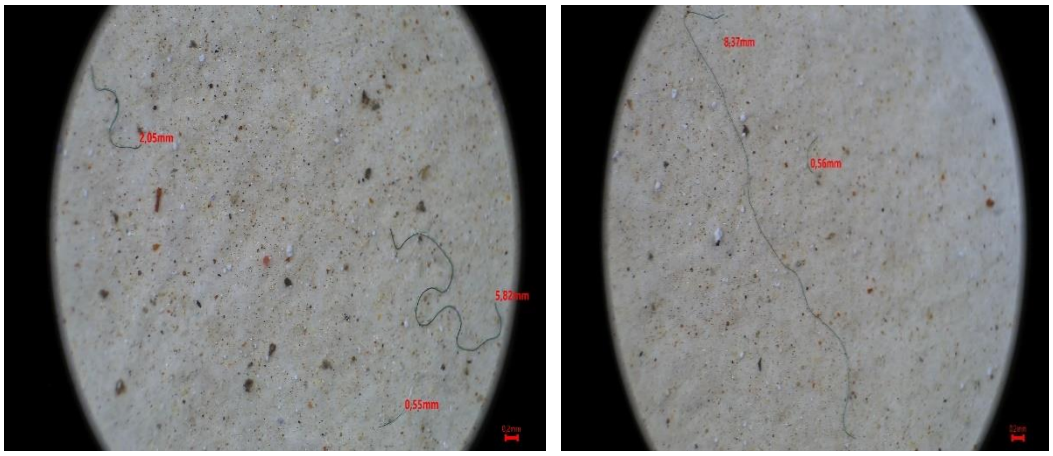
Şekil 4.8. Aralık 2022 Ayı Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.9. Şubat 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.10. Mart 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri



Şekil 4.11. Nisan 2023 Ayı Mikroskop Görüntüleri

4.5.2. Atıksuyun Orijinal pH Değerinde Yürütülen Çalışmalar

Örnekleme yapılan tesise öneriler sunabilmek için atıksuyun orijinal pH değerinde optimum ozon dozu ve süre esas alınarak arıtılabilirlik çalışmaları tekrar edilmiştir (Tablo 4.17). Bu sonuçlara göre atıksuyun kendi orijinal pH'ına göre arıtım sonuçlarında da oldukça iyi giderim verimleri elde edilmiştir.

Tablo 4.17. Atıksuyun Orijinal pH Değerinde Yapılan Çalışma Sonuçları

Proses	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
O_3	8,15	10	60	69
O_3+UVC	8,18	10	60	80

Tablo 4.14.'e göre**,** O_3+UVC prosesinde %80 giderim verimine ulaşılmıştır**.** pH ayarı yapılmadan da yüksek giderim elde edilmesi, daha düşük maliyet ile ozon bazlı oksidasyon proseslerinin mikroplastik gideriminde etkin olabileceğini göstermektedir.

4.6. Kontrol Deneyleri Sonuçları

Mart 2023 ve Nisan 2023 Numuneleri ile katalizör ve UVC prosesinin tek başına etkinliğini belirlemek için kontrol deneyleri yürütülmüş olup, sonuçları Tablo 4.18'de verilmiştir. Ayrıca pH ayarının mikroplastik giderimi üzerine etkisi olup olmadığını belirlemek için iki farklı pH değeri ile kontrol deneyleri yürütülmüştür. (Tablo 4.19).

Tablo 4.18. Kontrol Deneylerinin Sonuçları

Deney Şartı	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
ZnO (Nano)	7	-	60	11
ZnO	7	-	60	39
TiO_2	7	-	60	29
UVC	7	-	60	20

Tablo 4.19. pH için Kontrol Deneylerinin Sonuçları

Deney Şartı	pH	Ozon dozu (ppm)	Süre (dakika)	Mikroplastik Giderim Verimi (%)
Ham Atıksu	4	-	60	3
Ham Atıksu	10	-	60	28

5. DENEYSEL BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kasım, Aralık ve Şubat aylarındaki örneklemelere uygulanan Taguchi optimizasyon sonuçları her bir değişken için toplu olarak değerlendirilmiştir.

Kasım ayı örneklemelerinde optimum pH değeri 7 olarak, Aralık ve Şubat ayları örneklemelerinde ise pH 7 ve pH 10 değerlerinin aynı seviyede etkin oldukları görülmektedir. Proseslerin optimum pH değeri 7 olarak belirlenmiştir. Bu kararda, uygulamada atıksuyun pH değerine yakınlık ve minimum kimyasal kullanımı ile proses işletme maliyetini düşürmek önceliği rol oynamıştır.

Optimum ozon dozlarının farklı örneklemelerde 10 ve 15 ppm olduğu gözlenmiştir. Ozon dozu arttıkça verim artmaktadır. Ancak, 15 ppm ozon dozu ile yürütülen çalışmalarda jeneratör çalışma süresinin reaksiyon süresinden az olması ve işletme problemleri yaşanmasına bağlı olarak optimum ozon dozu 10 ppm seçilmiştir.

Optimum reaksiyon süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Süre arttıkça giderim veriminin de artacağı gözlenmiştir. Şubat örneklemesinde, 5 dakika ve 60 dakikada elde edilen sonuçlar yüksek iken jeneratörün 30 dakika çalıştığı deney şartında verim düşmüştür. Bu durumun deneysel hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, literatürde mevcut mikroplastik giderimi çalışmaları ile karşılaştırılmış olup Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Tablo 5.1. Çalışma Sonuçlarının Literatürdeki Mikroplastik Çalışmaları ile Karşılaştırılması

Yöntem	pH	Giderim Verimi %	Kaynak
Bioreaktör	-	91	Kwon, ve diğ., 2022
Membran Biyoreaktör	-	99	Kılıç, ve diğ., 2023
Damlatmalı Filtre	-	98	
Aktif Çamur	-	91	
Elektro-Hibrit Ozonlama-Koagülasyon	-	90	Luo, ve diğ., 2022

Tablo 5.2. (Devam) Çalışma Sonuçlarının Literatürdeki Mikroplastik Çalışmaları ile Karşılaştırılması

Yöntem	pH	Giderim Verimi %	Kaynak
Ultrafiltrasyon	-	98	Tadsuwan, ve diğ., 2022
Sorpsiyon	-	>90	Spacilova, ve diğ., 2023
UVC/H_2O_2	-	15	Easton, ve diğ., 2023
Elektrokoagülasyon-Elektroflotasyon	9	98	Akarsu, ve diğ., 2020
Elektrokoagülasyon	8	99	Perren, ve diğ., 2019
Adsorpsiyon	3	99	Chakraborty, ve diğ., 2023
Elektrokoagülasyon	4	99	Elkhatib, ve diğ., 2021
	7		
Elektrokoagülasyon	7	93	Şen, ve diğ., 2021
O_3	7	90	Bu Çalışma
O_3/UVC	7	68	
O_3/UVC/TiO_2	7	78	
O_3/UVC/ZnO	7	77	

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile evsel atıksu arıtma tesisi çıkış sularındaki mikroplastiklerin ozon bazlı oksidasyon prosesleri ile arıtabilirliğini değerlendirmek amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar Kasım 2022, Aralık 2022, Şubat 2023, Mart 2023 ve Nisan 2023 aylarında alınan 24 saatlik kompozit numuneler ile yapılmıştır. Bu örneklemelerde mevcut mikroplastiklerin sayısı, şekil, renk ve türleri belirlendikten sonra arıtılabilirlik çalışmaları kesikli deneyler ile laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

İlk üç örneklemede sadece O_3 prosesi arıtım çalışmaları taguchi deneysel optimizasyonu ile yürütülerek optimum şartlar belirlenmiştir. Belirlenen optimum şartlar pH 7, ozon dozu10 ppm ve reaksiyon süresi 60 dakikadır. Optimum şartlarda O_3, O_3/UVC, O_3/UVC/TiO_2 ve O_3/UVC/ZnO ile arıtım çalışmaları yapılmıştır.

Bu optimum şartlar ile Mart ve Nisan aylarında yürütülen ozon oksidasyonu arıtılabilirlik çalışmalarında elde edilen giderim verimleri sırasıyla %76 ve %82'dir. O_3/ UVC prosesi ile maksimum %63 ve %68 mikroplastik giderimlerine ulaşılmıştır.

0,5 gram katalizör ilavesi ile yürütülen O_3/UVC/TiO_2 prosesinde %78, O_3/UVC/ZnO (nano) prosesinde %69, O_3/UVC/ZnO prosesinde ise %77 mikroplastik giderimi elde edilmiştir. Kullanılan her iki katalizör türü için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Uygulanan katalizörün optimum miktarının belirlenmesi çalışmalara devam edilmelidir.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde yapılan deneysel çalışmalar ile mikroplastik gideriminde ozon bazlı oksidasyon yöntemlerinin etkili olduğu kanıtlamıştır. Arıtma sonrası yapılacak FTIR analizleri ile mikroplastiklerin kimyasal yapılarındaki değişimler belirlenerek, mikroplastiklerin ozon oksidasyonu mekanizması ile parçalanma süreçleri değerlendirilebilir. Parçalanma ürünleri çalışma kapsamı genişletilerek ele alınabilir. Mikroplastiklerin ozon prosesleri ile giderilmesi konusunda literatür eksikliği vardır. Gittikçe önem kazanan mikroplastik kirliliğinin önlenebilmesi için araştırmacıların, mikroplastiklerin giderilmesine yönelik çalışmaları arttırmaları gerekmektedir. Özellikle bu alanda proseslerin uygulanabilirlikleri enerji sarfiyatı ve maliyet faktörleri göz önüne alınarak ortaya konmalıdır.

KAYNAKLAR

Akarsu, C. (2022). İleri Atıksu Arıtma Metotlarının Mikroplastik Giderim Veriminin İncelenmesi. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 7*(2), 207-215. DOI: 10.35229/jaes.1092149

Akarsu, C., Deniz, F. (2021). Electrocoagulation/Electroflotation Process for Removal of Organics and Microplastics in Laundry Wastewater. *Clean–Soil, Air, Water, 49*(1). DOI: /10.1002/clen.202000146

Alagöz, B. A., Yenigün, O., & Erdinçler, A. (2018). Ultrasound Assisted Biogas Production from Co-Digestion Of Wastewater Sludges and Agricultural Wastes: Comparison with Microwave Pre-Treatment. *Ultrasonics Sonochemistry, 40,* 193-200. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.05.014

Alaton, İ. A. İleri Kimyasal Oksidasyon Teknolojileri ile Endüstriyel Kirletici Giderimine Genel Bakış. *Çevre İklim Ve Sürdürülebilirlik. 1*(1), 91-98.

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the Marine Environment. *Marine Pollution Bulletin, 62*(8), 1596–1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030

Arı, M., Öğüt, S. (2021). Mikroplastikler Ve Çevresel Etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi, 9*(2), 864-877. DOI: 10.29130/dubited.757698

Arslan, A., Topkaya, E., Bingöl, D., & Veli, S. (2018). Removal of Anionic Surfactant Sodium Dodecyl Sulfate from Aqueous Solutions by O_3/UV/H_2O_2 Advanced Oxidation Process: Process Optimization with Response Surface Methodology Approach. *Sustainable Environment Research, 28*(2), 65-71. DOI:10.1016/j.serj.2017.11.002

Aydoğdu, İ. B. (2014). Yerel ve Bölgesel Düzeyde Çevre Kirliliği Sorunları: Elazığ İli Örneği. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi, 1*(1), 133-148.

Bakkaloğlu, E. (2019). Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikroplastiklerin Akıbeti ve Taşınımı, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 594960.

Beram, A. (2016). Isıl İşlemin Bazı Geniş Yapraklı Ağaç Türlerinde Eğilme Direnci Üzerine Etkilerinin Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi. *Bilge International Journal Of Science And Technology Research, 5*(1), 55-60. DOI: 10.30516/bilgesci.888443

Blumenröder, J., Sechet, P., Kakkonen, J. E., & Hartl, M. G. J. (2017). Microplastic Contamination Of İntertidal Sediments of Scapa Flow, Orkney: A First Assessment. *Marine Pollution Bulletin, 124*(1), 112–120. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.07.009

Bozdaş, K., Üstün, G. E., & Aygün, A. Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikro Plastikler ve Giderim Yöntemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25*(3), 1577-1592. DOI: 10.17482/uumfd.758523

Can, T. 2022. Atıksu Arıtma Tesislerinde Mikroplastik Gideriminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 789572.

Cantemur, C. (2022). Su Kaynaklarında Mikroplastik Riski ve Arıtma Yöntemlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 734369.

Castelluccio, S., Alvim, C. B., Bes-Piá, M. A., Mendoza-Roca, J. A., & Fiore, S. (2022). Assessment of Microplastics Distribution in a Biological Wastewater Treatment. *Microplastics,1*(1), 141-155. DOI: 10.1016/j.serj.2017.11.00210.3390/microplastics1010009

Ceylan, B. (2017). Atıksulardaki Mikroplastik Kirliliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 461741.

Chakraborty, T. K., Audhikary, K., Ghosh, G. C., Rahman, M. S., Habib, A., Islam, M. S., Hossain, N. (2023). Adsorption of Acid and Basic Dye from the Simulated Wastewater Using Carbonized Microplastic Particles Synthesized from Recycled Polyethylene Terephthalate Plastic Waste Bottles: An İntegrated Approach for Experimental and Practical Applications. *Aqua-Water Infrastructure, Ecosystems And Society, 72*(4), 491-506. DOI: 10.2166/aqua.2023.211

Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., Goodhead, R., Moger, J., & Galloway, T. S. (2013). Microplastic İngestion by Zooplankton. *Environmental Science & Technology, 47*(12), 6646-6655. DOI: 10.1021/es400663f

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review. *Marine Pollution Bulletin, 62(*12), 2588-2597. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025

Çakmak, Ö., Acaröz, U. (2021). Su Kaynaklarında Mikroplastiklerin Varlığı ve İnsan Sağlığı Açısından Önemi. *Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni, 12*(2), 79-88. DOI: 10.38137/vftd.922677

Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic Fibers in Atmospheric Fallout: A Source of Microplastics in The Environment? *Marine Pollution Bulletin, 104*(1–2), 290–293. DOI: 10.1016/J.Marpolbul.2016.01.006.

Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in The Aquatic And Terrestrial Environment: Sources (With A Specific Focus on Personal Care Products), Fate and Effects. *Environmental Sciences Europe, 28*(1), 1-25.

Easton, T., Koutsos, V., & Chatzisymeon, E. (2023). Removal of Polyester Fibre Microplastics from Wastewater Using a UV/H_2O_2 Oxidation Process. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 11*(1). DOI: 10.1016/ j.jece.2022.109057

Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in Freshwater Systems: A Review of The Emerging Threats, Identification of Knowledge Gaps and Prioritisation of Research Needs. *Water Research, 75,* 63-82. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.012

Elkhatib, D., Oyanedel-Craver, V., & Carissimi, E. (2021). Electrocoagulation Applied for the Removal of Microplastics from Wastewater Treatment Facilities. *Separation And Purification Technology, 276*. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118877

Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., & Amato, S. (2013). Microplastic Pollution in The Surface Waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin, 77*(1–2), 177–182. DOI: 10.1016 /J.Marpolbul.2013.10.007.

Freeman, S., Booth, A. M., Sabbah, I., Tiller, R., Dierking, J., Klun, K., Rotter, A., Ben-David, E., Javidpour, J., & Angel, D. L. (2020). Between Source and Sea: The Role of Wastewater Treatment in Reducing Marine Microplastics. *In Journal of Environmental Management, 266*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110642

Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding A Consensus on the Definition. *Marine Pollution Bulletin, 138,* 145–147. DOI: 10.1016/ j.marpolbul.2018.11.022

Gao, Z., Chen, L., Cizdziel, J., & Huang, Y. (2023). Research progress on microplastics in wastewater treatment plants: A holistic review. *Journal of Environmental Management, 325*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116411

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, Use and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances, 3*(7), E1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

Gies, E. A., Lenoble, J. L., Noël, M., Etemadifar, A., Bishay, F., Hall, E. R., & Ross, P. S. (2018). Retention of Microplastics in A Major Secondary Wastewater Treatment Plant in Vancouver, Canada. *Marine Pollution Bulletin, 133,* 553–561. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.06.006

Gillibert, R., Balakrishnan, G., Deshoules, Q., Tardivel, M., Magazzù, A., Donato, M. G., Gucciardi, P. G. (2019). Raman Tweezers for Small Microplastics and Nanoplastics İdentification in Seawater. *Environmental Science & Technology, 53*(15), 9003-9013. DOI: 10.1021/acs.est.9b03105

Gomes De Aragão Belé, T., F. Neves, T., Cristale, J., Prediger, P., Constapel, M., & F. Dantas, R. (2021). Oxidation of Microplastics by O_3 And O_3/H_2O_2: Surface Modification and Adsorption Capacity. *Journal of Water Process Engineering, 41*. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102072

Gorito, A. M., Pesqueira, J. F. J. R., Moreira, N. F. F., Ribeiro, A. R., Pereira, M. F. R., Nunes, O. C., Almeida, C. M. R., & Silva, A. M. T. (2021). Ozone-Based Water Treatment (O_3, O_3/UV, O_3/H_2O_2) or Removal of Organic Micropollutants, Bacteria İnactivation and Regrowth Prevention. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*(4). DOI: 10.1016/j.jece.2021.105315

Guo, X., & Wang, J. (2019). The Chemical Behaviors of Microplastics in Marine Environment: A Review. *Marine Pollution Bulletin, 142,* 1-14. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.019

Hayatzadeh, M., Moosavi, V. Ve Aliramaee, R. (2023). Hayatzadeh, M., Moosavi, V., & Aliramaee, R. (2023). Assessment and Prioritization of Soil Erosion Triggering Factors Using Analytical Hierarchy Process and Taguchi Method. *International Journal of Sediment Research, 38*(3), 396-404. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2022.11.002

He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H., & Lü, F. (2019). Municipal Solid Waste (Msw)Landfill: A Source of Microplastics? -*Evidence of Microplastics in Landfill Leachate. Water Research, 159,* 38–45. DOI: 10.1016/J.Watres.2019.04.060

Hidayaturrahman, H., & Lee, T. G. (2019). A Study on Characteristics of Microplastic in Wastewater of South Korea: Identification, Quantification, and Fate of Microplastics During Treatment Process. *Marine Pollution Bulletin, 146,* 696-702. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.071

Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., & Lahive, E. (2017). Large Microplastic Particles in Sediments of Tributaries of The River Thames, Uk–Abundance, Sources and Methods for Effective Quantification. *Marine Pollution Bulletin, 114*(1), 218-226. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.004

Hu, J., Lim, F. Y., & Hu, J. (2023). Ozonation Facilitates the Aging and Mineralization of Polyethylene Microplastics from Water: Behavior, Mechanisms, and Pathways. *Science of the Total Environment, 866*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161290

Iyare, P. U., Ouki, S. K., & Bond, T. (2020). Microplastics Removal in Wastewater Treatment Plants: A Critical Review. *Environmental Science: Water Research & Technology, 6*(10), 2664-2675. DOI: 10.1039/D0EW00397B

Jihye, S. (2021). Oxidation Behaviors of Microplastics in Water During UV Photolysis and Ozonation. *School of Chemical and Biological Engineering The Graduate School, Seoul National University.*

Kanlı, İ. B., Kurt, Y. (2019). Türkiye'nin Çevre Politikaları Kapsamında Mikroplastik Kirlilik Üzerine Bir Değerlendirme. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi,* 495-514. DOI: 10.21733/ibad.585043

Khadir, A., Negarestani, M., Kheradmand, A., & Sillanpää, M. (2022). Microplastic Pollution in Water and Their Removal in Various Wastewater Treatment Plants. In Microplastics Pollution in Aquatic Media: Occurrence, Detection, and Removal. *Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*, 247-271. Singapore: Springer Singapore.

Khandey, U., & Arya, V. (2023). Optimization of Multiple Surface Roughness Characteristics of Mild Steel Turned Product Using Weighted Principal Component and Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings.* DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.298

Kılıç, E., Yücel, N., & Şahutoğlu, S. M. (2023). Microplastic Composition, Load and Removal Efficiency from Wastewater Treatment Plants Discharging into Orontes River. *International Journal of Environmental Research, 17*(2), 25.

Kim, S., Sin, A., Nam, H., Park, Y., Lee, H., & Han, C. (2022). Advanced Oxidation Processes for Microplastics Degradation: A Recent Trend. *Chemical Engineering Journal* Advances, *9*. DOI: 10.1016/j.ceja.2021.100213

Kirstein, I. V., Kirmizi, S., Wichels, A., Garin-Fernandez, A., Erler, R., Löder, M., & Gerdts, G. (2016). Dangerous Hitchhikers? Evidence for Potentially Pathogenic Vibrio Spp. on Microplastic Particles. *Marine Environmental Research, 120,* 1–8. DOI: 10.1016/j.marenvres.2016.07.004

Kreutz, G. K., Borba, F. H., Baroni, S., Mayer, I., Seibert, D., Inticher, J. J., Zorzo, C. F., & Guimarães, R. E. (2023). Reduction of The Environmental İmpact of Wastewater From the Pretreatment of Biodiesel Production: A Hybrid Proposal for Decontamination Via Photo-Electro-Fenton/Fered/O_3. *Journal of Environmental Management, 342*. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118080

Kwon, H. J., Hidayaturrahman, H., Peera, S. G., & Lee, T. G. (2022). Elimination of Microplastics at Different Stages in Wastewater Treatment Plants. *Water, 14*(15), 2404. DOI: 10.3390/w14152404

Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M., & Sillanpää, M. (2018). Occurrence, İdentification and Removal of Microplastic Particles and Fibers in Conventional Activated Sludge Process and Advanced Mbr Technology. *Water Research, 133,* 236–246. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.049

Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River Plastic Emissions to the World's Oceans. *Nature Communications, 8*(1), 15611. DOI: 10.1038/ncomms15611

Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Zhang, T. (2021). A Review of The Removal of Microplastics in Global Wastewater Treatment Plants: Characteristics and Mechanisms. *Environment International, 146*. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106277

Long, Z., Pan, Z., Wang, W., Ren, J., Yu, X., Lin, L., Lin, H., Chen, H., Jin, X. (2019). Microplastic Abundance, Characteristics, and Removal in Wastewater Treatment Plants in a Coastal City of China. *Water Research, 155,* 255–265. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.028

Luo, J., Jin, X., Wang, Y., & Jin, P. (2022). Advanced Treatment of Laundry Wastewater by Electro-Hybrid Ozonation–Coagulation Process: Surfactant and Microplastic Removal and Mechanism. *Water, 14*(24), 4138. DOI: 10.3390/w14244138

Magnusson, K., & Norén, F. (2014). Screening of Microplastic Particles in and Down-Stream a Wastewater Treatment Plant.

Moore, C. J. (2008). Synthetic Polymers in The Marine Environment: A Rapidly İncreasing, Long-Term Threat. *Environmental Research, 108*(2), 131–139. DOI: 10.1016/j.envres.2008.07.025

. Ngo, P. L., Pramanik, B. K., Shah, K., & Roychand, R. (2019). Pathway, Classification and Removal Efficiency of Microplastics in Wastewater Treatment Plants. *Environmental Pollution, 255*. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113326

Önder, S., Günal, Ç., & Dinçel, A. S. (2020). Plastikleri Attığımızda Ne Oluyor? Mikroplastikler. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, 3*(4), 181-186.

Özek, E. U., (2016) Ambalaj Sektörü ve Trb1. *Fırat Kalkınma Ajansı,* 13-16.

Perren, W., Wojtasik, A., & Cai, Q. (2018). Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *Acs Omega, 3*(3), 3357-3364. DOI: 10.1021/acsomega.7b02037

Priya, A., Anusha, G., Thanigaivel, S., Karthick, A., Mohanavel, V., Velmurugan, P., Chelliapan, S. (2023). Removing Microplastics from Wastewater Using Leading-Edge Treatment Technologies: A Solution to Microplastic Pollution—A Review. *Bioprocess and Biosystems Engineering, 46*(3), 309-321.

Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., Earn, A., Bucci, K., ... & Hung, C. (2019). Rethinking Microplastics as a Diverse Contaminant Suite. *Environmental Toxicology and Chemistry, 38*(4), 703-711. DOI: 10.1002/etc.4371

Ryan, P. G., Moore, C. J., Van Franeker, J. A., & Moloney, C. L. (2009). Monitoring The Abundance of Plastic Debris in the Marine Environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364*(1526), 1999-2012. DOI: 10.1098/rstb.2008.0207

Saravanathamizhan, R., & Perarasu, V. T. (2021). Improvement of Biodegradability İndex of İndustrial Wastewater Using Different Pretreatment Techniques. *In Wastewater treatment*, 103-136. DOI: 10.1016/B978-0-12-821881-5.00006-4

Sheikhmohammadi, A., Asgari, E., & Manshouri, M. (2021). The Synergistic Effect of O_3 And H_2O_2 on The Butyl P-Hydroxybenzoate Photo-Catalytic Degradability by UVC/ZnO: Efficiency, Kinetic, Pathway, Mechanism. *Optik, 239.* DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166673

Shen, M., Zhang, Y., Almatrafi, E., Hu, T., Zhou, C., Song, B., Zeng, G. (2022). Efficient Removal of Microplastics From Wastewater By an Electrocoagulation Process. *Chemical Engineering Journal, 428.* DOI: 10.1016/j.cej.2021.131161

Solís-Balbín, C., Sol, D., Laca, A., Laca, A., & Díaz, M. (2023). Destruction and Entrainment of Microplastics in Ozonation and Wet Oxidation Processes. *Journal of Water Process Engineering, 51*. DOI:.1016/j.jwpe.2022.103456

Spacilova, M., Dytrych, P., Lexa, M., Wimmerova, L., Masin, P., Kvacek, R., & Solcova, O. (2023). An Innovative Sorption Technology for Removing Microplastics from Wastewater. *Water, 15*(5), 892. DOI: 10.3390/w15050892

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., Van Loosdrecht, M. C. M., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Detection, Occurrence and Removal. *In Water Research 152,* 21–37. DOI: 10.1016/j.watres.2018.12.050

Sussarellu, R., Suquet, M., Thomas, Y., Lambert, C., Fabioux, C., Pernet, M. E. J.,Huvet, A. (2016). Oyster Reproduction is Affected by Exposure to Polystyrene Microplastics. *Proceedings of The National Academy of Sciences, 113*(9), 2430-2435. DOI: 10.1073/pnas.1519019113

Tadsuwan, K., & Babel, S. (2022). Microplastic Abundance and Removal Via an Ultrafiltration System Coupled to a Conventional Municipal Wastewater Treatment Plant in Thailand. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 10*(2), 107142. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107142

Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. Ve Setälä, O. (2017). Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., & Setälä, O. (2017). Solutions to Microplastic Pollution–Removal of Microplastics from Wastewater Effluent with Advanced Wastewater Treatment Technologies. *Water Research, 123,* 401-407. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.005

Topkaya, E. (2021). Su Ve Atıksu Ortamında Endokrin Bozucu Kimyasalların Ozon Ve Fotokatalitik Oksidasyon Yöntemleri İle Arıtılabilirliği: Kinetik Çalışmaları Ve Proses Değişkenlerinin Maliyet Değerlendirmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 702769.

Tutoğlu, N. (2019). Sucul Ortamdaki Mikroplastiklerin İnsan Sağlığına Etkisi Ve Arıtma Yöntemlerinin Araştırılması, Uzmanlık Tezi, T.C. Tarım Ve Orman Bakanlığı, Ankara.

Uogintė, I., Pleskytė, S., Pauraitė, J., & Lujanienė, G. (2022). Seasonal Variation and Complex Analysis of Microplastic Distribution in Different WWTP Treatment Stages in Lithuania. *Environmental Monitoring and Assessment, 194*(11), 829. DOI: 10.1007/s10661-022-10478-x

URL-1: https://www.tuketicipostasi.com/plastik-uretimi-yuzde-54-5-artti/1178/, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2023).

URL-2: https://www.istockphoto.com/tr/foto%C4%9Fraf/plastik-re%C3%A7ine-plastik-gran%C3%BCl-turuncu-ye%C5%9Fil-ve-pembe-polipropilen-gran%C3%BCl-gm953828474-260399576, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2023).

URL-3: https://turkish.alibaba.com/product-detail/PVC-raw-materials-prices-White-Powder-1600294533235.html, (Ziyaret tarihi: 13 Mayıs.2023).

URL-4: Yenigün, O., 2018, Mikroplastik Kirliliği Nedir? web sayfası: https://sarkac.org/2018/12/mikroplastik-kirliliği-nedir/, (Ziyaret tarihi: 29 Nisan 2023).

URL-5: https://www.bilgiustam.com/sudaki-mikroplastik-mpp-sorunu/, (Ziyaret tarihi: 15 Nisan 2023).

URL-6:Pınarbaşı, A. (2023). *Taguchi Metodu Nedir.* https://www.muhendisbeyinler.net/taguchi-metodu-nedir/, (Ziyaret tarihi:16 Mayıs 2023).

URL-7: Canlar, Y. (2021). *Her-Gun-Vucudumuza-Giren-Mikroplastikleri-Azaltmanin-6-Yolu*, https://dogaladogru.com/yasam/her-gun-vucudumuza-giren-mikroplastikleri-azaltmanin-6-yolu, (Ziyaret tarihi: 25 Nisan 2023)

Vardar, S. (2022). Removal and Dıscharge of Mıcroplastıcs from the Wastewater Treatment Plants in Istanbul, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 638687.

Yurtsever, M. (2015). Mikroplastikler'e Genel Bir Bakış. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 17*(50), 68-83.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Kuru, **S**., Arslan, A., 2023, Mikroplastiklerin Özellikleri, Sınıflandırılması, Tespit ve Giderim Yöntemleri, *4. Uluslararası Kapadokya Bilimsel Araştırmalar Kongresi,* Kongre Kitabı, 16-17 Nisan 2023/ Ürgüp/Nevşehir- 882-898.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 2016 yılında girdiğim Bursa Uludağ Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nü 2021 yılında Çevre Mühendisi olarak mezun oldu. 2021-2023 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir. C sınıfı İş Güvenliği uzmanıyım ve Nisan 2022'den beri ATATEK MAKİNA'da iş güvenliği uzmanı olarak çalışmaktadır.