

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KENTSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ KAYNAKLI
MİKROPLASTİK KİRLİLİK PROFİLİNİN BELİRLENMESİ:
DENİZLİ İLİ ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

PELİN KOYUNCUOĞLU

DENİZLİ, ARALIK - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KENTSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ KAYNAKLI
MİKROPLASTİK KİRLİLİK PROFİLİNİN BELİRLENMESİ:
DENİZLİ İLİ ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

PELİN KOYUNCUOĞLU

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından 2019FEBE009 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

PELİN KOYUNCUOĞLU

ÖZET

KENTSEL ATIKSU ARITMA TESİSİ KAYNAKLI MİKROPLASTİK KİRLİLİK PROFİLİNİN BELİRLENMESİ: DENİZLİ İLİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

PELİN KOYUNCUOĞLU

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. GÜLBİN ERDEN)

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Mikroplastik olarak adlandırılan 5 mm'den küçük plastik parçacıklar, son zamanlarda dikkat çeken önemli kirleticiler arasındadır. Atıksu arıtma tesisleri potansiyel mikroplastik kaynağı olarak görülmekte olup bu konudaki çalışmalar akademide hız kazanmıştır. Tez çalışması kapsamında, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınan atıksu ve arıtma çamuru numunelerinde mikroplastik kirliliğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik ilk olarak atıksu ve çamur ortamından mikroplastiklerin izole edilmesine yönelik metod optimizasyonu yapılmıştır. Mikroplastik izolasyonu için numunelerin organik yüküne bağlı olarak değişen reaksiyon sürelerinde (15-120 dk) ve dozlarda (7-50 mL) %50'lik H₂O₂ ile 70°C'de oksidasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Atıksu ve arıtma çamurlarından izole edilen mikroplastikler, stereo-mikroskop yardımıyla boyut (1000, 500 ve 100 µm), şekil (parça, lif ve film) ve renklerine (siyah, kahverengi, mavi-lacivert, kırmızı-pembe, şeffaf-beyaz ve yeşil-sarı) göre kategorize edilmiştir. Mikroplastik kirliliğine mevsimsel değişimin etkisinin incelenmesi amacıyla yağışlı (aralık, ocak ve şubat) ve kurak (temmuz, ağustos ve eylül) mevsimi temsilen toplam 6 ay süresince iki haftalık periyotlarda örnekleme yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, atıksu numunelerinde tespit edilen baskın mikroplastik boyutları 100-500 µm (%68,29-%81,71), şeffaf-beyaz renkte (%45,53-%83,65), ve lif (%43,50-%75,61) şeklinde olduğu görülmüştür. Arıtma çamurlarında da baskın mikroplastik boyutu 100-500 µm (%55,72-%81,42), şeffaf-beyaz renkte (%49,62-%89,45), ve lif (%40,24-%76,23) şeklinde olduğu tespit edilmiştir. Polimer türü tayini amacıyla gerçekleştirilen FTIR analizi sonuçlarında, kış mevsiminde yoğun olarak polietilen (%49,04) ve polietilen vinil asetat (%40,38) polimerleri tespit edilirken, yaz mevsiminde polietilen vinil asetat (%51,85) ve polietilen (%38,89) tespit edilmiştir. Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde mikroplastik kirliliği giderme verimi %95'in üzerinde olmasına rağmen, günlük olarak alıcı ortama deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonu oldukça yüksektir (ortalama kış: $2,22 \times 10^{10}$ MP/gün ve ortalama yaz: $9,14 \times 10^9$ MP/gün). Tesiste oluşan çamur keki, katı atık depolama sahasında bertaraf edilmekte olup, depolama sahasına gönderilen mikroplastik konsantrasyonu kış ve yaz mevsimi için sırasıyla ortalama $1,21 \times 10^{15}$ MP/gün ve $1,20 \times 10^{15}$ MP/gün olarak bulunmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Mikroplastik Kirliliği, Atıksu, Arıtma çamurları, Atıksu arıtma tesisi, Denizli, Kirlilik Profili.

ABSTRACT

DETERMINATION OF MICROPLASTIC POLLUTION PROFILE SOURCED BY MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT: A CASE STUDY OF DENİZLİ PROVINCE

PH.D THESIS

PELİN KOYUNCUOĞLU

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. GÜLBİN ERDEN)

DENİZLİ, DECEMBER 2021

Microplastic pollution have attracted attention recently. Wastewater treatment plants are seen as a potential source of microplastics, and studies on this subject have gained momentum in academia. Within the scope of the thesis, microplastic pollution investigated in wastewater and sludge samples taken from Denizli Central Wastewater Treatment Plant. For this purpose, a method optimization was performed for the isolation of microplastics from wastewater and sludge media. For microplastic's isolation, the oxidation process was carried out with 50% H₂O₂ at 70°C at varying reaction times (15-120 min) and doses (7-50 mL) depending on the organic load of the samples. Microplastics isolated from wastewater and treatment sludges were determined by stereo-microscope in terms of size (1000, 500 and 100 µm), shape (piece, fiber and film) and colors (black, brown, blue-dark blue, red-pink, transparent-white and green). -yellow) categorized. To examine the effect of seasonal change on microplastic pollution, sampling was carried out in two-week periods for a total of 6 months, representing the wet (December, January and February) and dry (July, August and September) seasons. As a result of experimental studies, the microplastics detected in wastewater samples were mostly 100-500 µm (68.29%-81.71%) in size, transparent-white in color (45.53%-83.65%). The dominant microplastic shape was observed as fiber (43.50%-75.61%) in wastewaters. All detected microplastics in sludge samples were mainly 100-500 µm (55.72%-81.42%) in size, while the dominant color was transparent-white (49.62-89.45%). As for the microplastics' shape in sludge samples, fibers (40.24%-76.23%) were the dominant. In the results of the FTIR analysis performed for the determination of the polymer type, polyethylene (49.04%) and polyethylene vinyl acetate (40.38%) polymers were detected intensively in winter, while polyethylene vinyl acetate (51.85%) and polyethylene (38.89%) were detected in summer. Although removal efficiency of microplastic pollution in Denizli Central Wastewater Treatment Plant is over 95%, the microplastic concentration daily discharged into the receiving environment is quite high (average winter: 2.22×10^{10} MP/day and average summer: 9.14×10^9 MP/day). The sludge cake formed in the facility is transferred to the landfill daily. The microplastic concentration which landfilled was found to be 1.21×10^{15} MP/day and 1.20×10^{15} MP/day, respectively, for the winter and summer seasons.

KEYWORDS: Microplastic Pollution, Wastewater, Sewage Sludge, Wastewater Treatment Plant, Denizli, Pollution Profile.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. MİKROPLASTİKLER.....	4
2.1 Mikroplastiklerin Doğadaki Döngüsü	8
2.1.1 Sucul Ekosistemlerde Mikroplastikler	10
2.1.2 Karasal Ekosistemlerde Mikroplastikler.....	13
2.1.3 Atmosferde Mikroplastikler.....	15
2.2 Mikroplastiklerin Diğer Kirleticilerle Etkileşimi	15
2.3 Mikroplastiklerin Canlılar Üzerine Etkileri	18
3. ATIKSU ARITMA TESİSİ KAYNAKLI MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ	23
3.1 Örnekleme Yöntemleri	28
3.2 Mikroplastik İzolasyon Yöntemleri.....	29
3.3 Metot Validasyonu ve Kontaminasyon Kontrolü.....	31
3.4 Mikroplastik Karakterizasyonu	33
4. LİTERATÜR TARAMASI	36
4.1 Atıksularda mikroplastikler	36
4.2 Arıtma çamurlarında mikroplastikler	45
4.3 Tezin Amacı	52
5. MATERYAL VE METOT	54
5.1 Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi	54
5.2 Numune Alma	55
5.3 Metot Validasyonu	57
5.4 Mikroplastik İzolasyonu Çalışmaları	61
5.5 Mikroplastiklerin Analizi	62
5.6 Kontaminasyon Kontrolü	63
5.7 İstatistiksel Analiz	63
6. BULGULAR	65
6.1 Atıksularda Tespit Edilen Mikroplastikler	68
6.1.1 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Boyut Analizi	70
6.1.2 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Renk Analizi.....	76
6.1.3 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Şekil Analizi.....	81
6.2 Arıtma Çamurlarında Tespit Edilen Mikroplastikler	87
6.2.1 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Boyut Analizi	90
6.2.2 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Renk Analizi.....	95
6.2.3 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Şekil Analizi	100
6.3 Mikroplastiklerin Polimer Türlerinin Tespiti	105

7. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
8. KAYNAKLAR.....	119
9. EKLER.....	142
10. ÖZGEÇMİŞ.....	146

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Birincil ve ikincil mikroplastikler.....	5
Şekil 2.2: Farklı şekillerdeki mikroplastiklere ait görüntüler (^a : Crawford ve Quinn, (2017), ^b : Silva ve diğ. (2018).....	6
Şekil 2.3: Mikroplastiklerin çevrede taşınımı (Huang ve diğ. 2021).....	10
Şekil 2.4: Farklı kirleticilerin mikroplastikler tarafından adsorpsiyon mekanizması ve etkileyen faktörler (Koyuncuoğlu ve Erden 2021).....	18
Şekil 3.1: Yayın başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “atıksu” anahtar kelimeleri bulunan araştırma ve derleme yayın sayıları (Web of Science).....	23
Şekil 3.2: Yayın başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “çamur” anahtar kelimeleri bulunan araştırma ve derleme yayın sayıları (Web of Science).....	24
Şekil 3.3: Atıksu arıtma tesislerindeki ünitelerde mikroplastik giderim verimleri (Sun ve diğ. 2019).....	26
Şekil 4.1: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik renk kategorileri.....	43
Şekil 4.2: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik şekilleri.....	44
Şekil 4.3: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik polimer türleri.....	45
Şekil 4.4: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik renk kategorileri.....	50
Şekil 4.5: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik şekil kategorileri.....	51
Şekil 4.6: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen polimer türleri....	51
Şekil 5.1: Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması ve örnekleme noktalarının gösterimi.....	56
Şekil 5.2: Atıksu ve çamur numunelerinden mikroplastik izolasyon prosedürü.....	62
Şekil 6.1: Kış ve yaz mevsimine ait atıksu (a-c) ve arıtma çamurunda (b-d) tespit edilen mikroplastik konsantrasyon verilerine uygulanan Friedman testi analiz sonuçları.....	66
Şekil 6.2: Atıksu (a, b, c, d) ve arıtma çamurlarında (e, f, g, h) tespit edilen parça, film ve lif şeklindeki mikroplastiklerin mikroskop altındaki örnek görüntüleri.....	67
Şekil 6.3: Kış ve yaz aylarında atıksularda tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu.....	68
Şekil 6.4: Kış ve yaz mevsiminde her bir atıksu numunesi alma noktasındaki (W1, W2, W3 ve W4) toplam mikroplastik konsantrasyonları yapılan Friedman testi (a-c) ve Wilcoxon işaretli sıra testi (b-d) sonuçları.....	69
Şekil 6.5: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi.....	72

Şekil 6.6: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı	72
Şekil 6.7: Kış mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	73
Şekil 6.8: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi	73
Şekil 6.9: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı	74
Şekil 6.10: Yaz mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	74
Şekil 6.11: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi	78
Şekil 6.12: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı	78
Şekil 6.13: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	79
Şekil 6.14: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi	79
Şekil 6.15: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı	80
Şekil 6.16: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	80
Şekil 6.17: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi	82
Şekil 6.18: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı	83
Şekil 6.19: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	83
Şekil 6.20: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi	84
Şekil 6.21: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı	85
Şekil 6.22: Yaz mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	85
Şekil 6.23: Kış ve yaz aylarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu	88
Şekil 6.24: Kış (a-b) ve yaz (c-d) mevsiminde her bir arıtma çamuru numunesi alma noktasındaki (S1, S2, S3 ve S4) toplam mikroplastik konsantrasyonlarında yapılan Friedman testi (a-c) ve Wilcoxon İşaretli Sıra Testi (b-d) sonuçları	89
Şekil 6.25: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi	91
Şekil 6.26: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı	92
Şekil 6.27: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	92

Şekil 6.28: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi	93
Şekil 6.29: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı	94
Şekil 6.30: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	94
Şekil 6.31: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi	97
Şekil 6.32: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı	97
Şekil 6.33: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	98
Şekil 6.34: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi	98
Şekil 6.35: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı	99
Şekil 6.36: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	99
Şekil 6.37: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi.....	101
Şekil 6.38: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı	102
Şekil 6.39: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	102
Şekil 6.40: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi.....	103
Şekil 6.41: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı	104
Şekil 6.42: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiki analiz sonuçları	104
Şekil 6.43: Film şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%93,90 polietilen)	106
Şekil 6.44: Parça şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%87,86 polipropilen)	107
Şekil 6.45: Lif şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%84,84 Polietilen vinil asetat).....	108
Şekil 6.46: Kış (a) ve yaz (b) mevsiminde FTIR analizi yapılan şüpheli mikroplastiklerin şekilsel dağılımı	109
Şekil 6.47: Kış (a) ve yaz (b) mevsiminde FTIR analizi yapılan şüpheli mikroplastiklerin mikroplastiklerin polimer türü dağılımı (ABS: Akrlonitril bütadien stiren; PA: Poliamid; PBA: Poli(11-bromoundesil akrilat); PTFE: Politetrafloroetilen; PMMA: Polimetil metakrilat; PP: Polipropilen; PET: Polietilen tereftalat; PEVA: Polietilen vinil asetat; PE: Polietilen; PES: Polyester)	110

Şekil 6.48: Kış mevsimine ait mikroplastik şekillerine göre polimer türü dağılımı.....	111
Şekil 6.49: Yaz mevsimine ait mikroplastik şekillerine göre polimer türü dağılımı.....	111

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Plastik parçacıkların boyut sınıflandırması (Crawford ve Quinn, 2017).....	4
Tablo 2.2: Mikroplastiklerin şekilleri ve fiziksel özellikleri (Free ve diğ. 2014)	7
Tablo 2.3: 2018 yılında en çok üretilen polimer türleri (PlasticEurope, 2019; Jones ve diğ. 2020).....	8
Tablo 3.1: Mikroplastik analiz yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Shim ve diğ. 2017).....	35
Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu.....	38
Tablo 4.2: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu.....	47
Tablo 5.1: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debi değerleri ve günlük katı atık depolama sahasına gönderilen çamur keki miktarı	54
Tablo 5.2: Denizli İline ait hava durumu verileri.....	56
Tablo 5.3: Atıksu numunelerinin karakterizasyonu	57
Tablo 5.4: Arıtma çamuru numunelerinin karakterizasyonu	57
Tablo 5.5: Farklı H ₂ O ₂ dozu ve reaksiyon süresinde elde edilen AKM giderim verimleri	60
Tablo 5.6: Mikroplastik geri kazanım oranları ve AKM giderim verimleri	61
Tablo 6.1: Kış ve yaz aylarında atıksularda tespit edilen mikroplastik giderim verimleri	70
Tablo 6.2: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi.....	71
Tablo 6.3: Arıtma kademelerinin farklı boyuttaki mikroplastiklerin giderimine etkisi	76
Tablo 6.4: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi.....	77
Tablo 6.5: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi	82
Tablo 6.6: Mikroplastiklerin şekillerine göre farklı ünitelerde giderim verimleri	87
Tablo 6.7: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi ..	91
Tablo 6.8: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi ...	96
Tablo 6.9: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi. 101	
Tablo 6.10: Çalışma kapsamında analiz edilen polimer türlerinin yoğunluk değerleri ve muhtemel kaynakları (Andrady (2011) uyarlanmıştır).	112
Tablo 7.1: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debileri ile hesaplanmış günlük tesise giren ve tesisten deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları	113
Tablo 7.2: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debileri ile hesaplanmış günlük tesise giren ve tesisten deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları (<i>Devamı..</i>)	114
Tablo 7.3: Literatürde tespit edilen ve alıcı ortama günlük deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları	116

Tablo 7.4: Numune alınan tarihlerde günlük katı atık depolama sahasında bertaraf edilen çamur keki miktarı ve içerdiği mikroplastik konsantrasyonu.....	117
Tablo 7.5: Literatürde arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastik yükleri	118

SEMBOL LİSTESİ

AAT	:	Atıksu arıtma tesisi
ABS	:	Akrilonitril bütadien stiren
ATR	:	Zayıflatılmış toplam yansıma (attenuated total reflection)
FTIR	:	Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
MP	:	Mikroplastik
PA	:	Poliamid
PBA	:	Poli(11-bromoundesil akrilat)
PBT	:	Polibütilen teraftalat
PC	:	Polikarbonat
PE	:	Poliyeten
PET	:	Poliyeten tereftalat
PES	:	Polyester
PEVA	:	Poliyeten vinil asetat
PLA	:	Polilaktik asit
PMMA	:	Polimetil metakrilat
PP	:	Polipropilen
PS	:	Polistiren
PTFE	:	Politetrafloroeten
PU	:	Poliüretan
POM	:	Polioksimeten
PVC	:	Polivinil Klorür

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimleri ile çalışmalarımda destek olan değerli danışmanım Prof. Dr. Gülbin ERDEN'e teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunarak tezime katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Osman Nuri AĞDAĞ ve Prof. Dr. Elif IŞGIN'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Roda Gökçe YILMAZ ÇİNÇİN'e ve Arş. Gör. Ebru ÖZKAN'a doktora sürecimde bana destek oldukları için çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen Neriman BAYLAN'a teşekkür ederim.

Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi personellerinden İbrahim BORA'ya ve Levent KÜÇÜCÜKKAPLAN'a numune alma konularındaki desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirebilmek için destek aldığım Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi birimine (2019FEBE009) teşekkür ederim.

Hayatımdaki en büyük şansım olan ve her daim beni destekleyip cesaretlendiren annem Hilal ALİCANOĞLU, babam Orhan ALİCANOĞLU ve kardeşim Çağlar ALİCANOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, deneysel çalışmalarım ve tez yazma sürecim dahil olmak üzere gerek akademik gerekse manevi yönden desteğini her zaman hissettiğim, bana moral ve motivasyon veren değerli eşim Mehmet Ulaş KOYUNCUOĞLU'na teşekkür ederim.

Pelin KOYUNCUOĞLU
Denizli, Aralık, 2021

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılda plastik endüstrisinin gelişimi ile plastik ürünlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Plastik ürünler hafif, dayanıklı, kolay işlenebilir ve ucuz olması nedeniyle günlük hayatta çok fazla kullanım alanına sahiptir (J. Li ve diğ. 2018a). Son 50 yılda, plastik kullanımının dünya çapında 20 kat arttığı ve önümüzdeki 20 yılda plastik kullanımının iki katına çıkacağı tahmin edilmektedir (Perren ve diğ. 2018). 2018 yılında küresel plastik üretimi 360 milyon tona ulaşırken, Avrupa'da 62 milyon ton olarak belirlenmiştir (PlasticEurope, 2019). Plastiklerin yaklaşık %40'ı ambalaj malzemesi olarak kullanılmaktadır ve kullanım ömrü kısa olan bu plastikler doğrudan atık haline gelmektedir (Mallow ve diğ. 2020). Plastikler kullanıldıktan sonra geri kazanılmasına rağmen, çevreye hala çok miktarda plastik salınmakta olup (Bui ve diğ. 2020), bu atıkların çoğu doğada neredeyse hiç değişmeden uzun bir süre kalmakta ve tam mineralleşmesinin yüzyıllar gerektirdiği tahmin edilmektedir (Eckert ve diğ. 2018).

Mikroplastikler, boyutları 5 mm'den küçük, suda çözünmeyen, kalıcı plastik parçacıklar olarak tanımlanmaktadır (Leslie ve diğ. 2017) ve özellikle ilk tanımlandığı yıl olan 2004'ten itibaren çevresel bir kirlenici olarak dikkat çekmektedir (Tagg ve diğ. 2017). Mikroplastikler kaynaklarına göre birincil ve ikincil mikroplastikler olarak iki grupta incelenmektedir. Birincil mikroplastikler temizlik ve hijyen ürünlerinde, kozmetik ürünlerinde ve deterjanlarda aşındırıcı bir bileşen olarak kullanılmaktadır ve özellikle mikroskobik boyutlarda üretilmektedir. İkincil mikroplastikler ise, daha büyük plastik parçaların fiziksel, kimyasal veya biyolojik etkilerle parçalanması yolu ile oluşmaktadır (Sol ve diğ. 2020). Parçalanma, tekstil ürünleri, boya ve lastik gibi malzemelerin kullanımı sırasında veya plastiklerin çevreye bırakılmasıyla meydana gelebilir (Talvitie ve diğ. 2017a). Plastik üretimi ve kullanımı zaman içinde artış gösterdiğinden dolayı, çevrede mikroplastiklerin oluşumu da aynı şekilde artmıştır ve bu yeni kirleniciler nehirlerde (Kataoka ve diğ. 2019), göllerde (Wang ve diğ. 2018), denizlerde (de Haan ve diğ. 2019; Zhu ve diğ. 2019), kıyı şeritlerinde (Song ve diğ. 2015) ve tarım topraklarında (Ragoobur ve diğ. 2021) tespit edilmektedir (Carr ve diğ. 2016).

Mikroplastikler geniş yüzey alanı ve hidrofobik yapısı nedeniyle bulunduğu ortamdaki antibiyotik, kalıcı organik kirleticiler, ağır metal ve patojenler gibi diğer kirleticiler için adsorban görevi görmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden 2021). Ayrıca plastikler, plastikleştiriciler, antioksidanlar, yağlayıcılar, yapıştırıcılar, korozyon önleyiciler, ısı dengeleyiciler veya alev geciktiriciler gibi katkı maddelerini ağırlıklarının %4'üne kadar içerebilmektedir (Hamidian ve diğ. 2021). Mikroplastikler ortamda bulunan diğer kirleticileri adsorbe ederken diğer taraftan plastik yapısında bulunan bu kimyasalları ortama vererek canlılara risk oluşturmaktadır (Prata ve diğ. 2020). Mikroplastiklerin sucul organizmalar üzerinde beslenme aktivitesinde azalma, oksidatif stres, genotoksisite, büyüme gecikmesi ve ölüm gibi çeşitli etkileri olduğu yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur (Gatidou ve diğ. 2019). Ayrıca, çeşitli organizmalar tarafından bünyeye alınan bu mikroplastikler birincil trofik seviyeden (Örneğin; fitoplankton ve zooplankton) besin zincirine geçerek insanlara kadar ulaşabilmektedir (D. He ve diğ. 2018).

Evsel kullanım, yüzeysel akış ve farklı endüstrilerden kaynaklanan ham atıksular yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içermektedir ve kanalizasyon yoluyla atıksu arıtma tesislerine ulaşmaktadır (Salmi ve diğ. 2021). Atıksu arıtma tesisleri mikroplastikleri oldukça yüksek verimlerle (>%90) gidermekle beraber, yüksek hacimde atıksu arıtması nedeniyle mikroplastiklerin alıcı ortama deşarjı ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Atıksulardan arıtma ünitelerinde yüksek verimlerle giderilen mikroplastikler ise arıtma çamurlarına transfer olmaktadır (Ziajahromi ve diğ. 2021). Mikroplastik içeriği atıksulardan oldukça yüksek olan arıtma çamurlarının gerek toprak iyileştiricisi/gübre olarak gerekse düzenli depolama sahalarında bertarafı sırasında karasal ortamda mikroplastik kirliliğine yol açmaktadır (Magni ve diğ. 2019). Bu nedenle, son zamanlarda yapılan çalışmalarda atıksu arıtma tesisleri, sucul ve karasal ekosistemler için noktasal mikroplastik kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Talvitie ve diğ. 2017b).

Literatür kapsamlı olarak incelendiğinde, Türkiye'de atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik kirliliği araştırması sınırlı sayıda (Akarsu ve diğ. 2020; Bilgin ve diğ. 2020; Gündoğdu ve diğ. 2018) ve Denizli ili bazında yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez kapsamında, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'ndeki kentsel nitelikli atıksuların mikroplastik içeriği, klasik biyolojik arıtma sonrasında alıcı ortama

verilen arıtılmış suda mikroplastik tür ve konsantrasyonu ve arıtma işlemleri sonunda oluşan çamurlarda mikroplastik tür ve konsantrasyonunu belirlemeye yönelik olarak yapılmış bütünlük bir çalışma ortaya konması hedeflenmiştir.

Bu amaçla, tez kapsamında ilk olarak kentsel nitelikli atıksuların arıtıldığı Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde belirlenen noktalardan temin edilen atıksu ve arıtma çamuru numunelerinde mikroplastiklerin izolasyonu yöntemi optimize edilmiştir. Yöntem belirlendikten sonra, atıksu ve arıtma çamuru numunelerindeki mevcut mikroplastik kirlilik konsantrasyonları tespit edilmiştir. Mikroplastik kirlilik yükü mevsimsel olarak değişebileceğinden Denizli'de yağışlı (aralık, ocak ve şubat) ve kurak mevsimi (temmuz, ağustos ve eylül) temsil eden aylarda ve iki haftalık periyotlarda olmak üzere, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nden örnekleme yapılmıştır. Stereo-mikroskop yardımıyla gerçekleştirilen görsel analiz sonucunda, tespit edilen mikroplastikler boyut, şekil ve renklerine göre kategorize edilmiştir. Görsel analiz yöntemiyle ön seçimi yapılan mikroplastiklerin, polimer türleri FTIR spektroskopisi kullanılarak saptanmıştır. Ayrıca, atıksu arıtma tesisinin her bir arıtma kademesindeki ve toplam mikroplastik giderme verimleri hesaplanmıştır. Arıtılmış atıksularla alıcı ortama deşarj edilen ve çamur keki ile katı atık depolama sahasında depolanan mikroplastik konsantrasyonu ortaya konmuştur.

2. MİKROPLASTİKLER

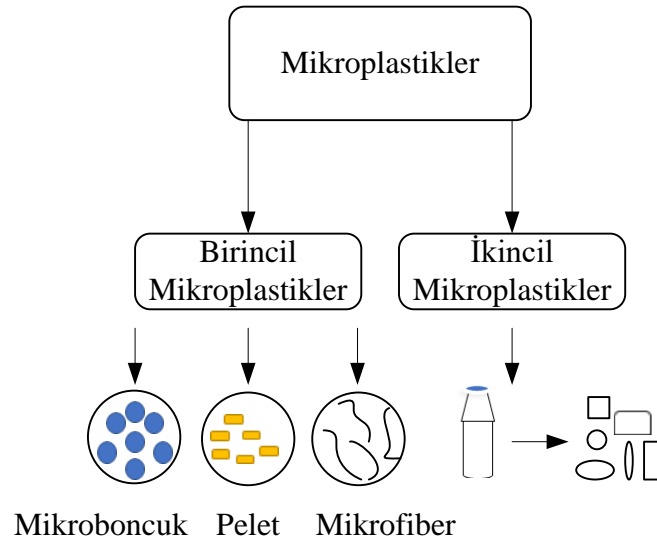
Plastikler, petrol veya gazdan ekstrakte edilen monomerlerin polimerizasyonundan türetilen sentetik organik polimerler olarak tanımlanmaktadır (Cole ve diğ. 2011). İlk sentetik plastik olarak bilinen “Bakalit” 1907 yılında ilk keşfedildiği günden beri hafif, kolay işlenebilir ve ucuz olması gibi pek çok avantaja sahip olması nedeniyle (Frias ve Nash, 2019) gıda ve ürün ambalajları, giyim, inşaat ve araba malzemeleri, ev eşyaları, tıbbi cihazlar, kişisel bakım ürünleri, oyuncaklar gibi günlük hayatın her alanında kullanılmaktadır (Y. L. Wang ve diğ. 2020). Özellikle “kullan-at” plastik ürünlerin (örneğin; ambalaj malzemeleri) yaygınlaşmasının da etkisi ile dünya çapında oluşan kentsel katı atıkların %10’unun plastiklerden oluştuğu bilinmekte olup, plastiklerin parçalanmasının yüzyıllar sürebileceği tahmin edilmektedir. Kentsel katı atıklara dahil olan bu plastikler katı atık depolama sahalarında depolanmaktadır (Cole ve diğ. 2011). Plastiklerin üretim oranının yüksek olması, yaygın kullanımı ve geri dönüşüm oranının düşük olması gibi nedenlerle kullanım ömrünü tamamlayan plastik atıklar uygun şekilde bertaraf edilmediği takdirde sucul ve karasal ortamlarda kirlilik oluşturmaktadır (Koyuncuoğlu ve Erden 2021). Çevrede bulunan bu plastik atıklar, zamanla fiziksel, kimyasal ve biyolojik yollarla küçük parçalara ayrılmaktadır (Chen ve diğ. 2019).

Mikroplastik kavramını ilk olarak Thompson ve diğ. (2004), deniz suyunda ve sedimanlarında bulunan plastik parçacıkları tanımlamak için kullanmıştır. Daha sonra 5 mm’den küçük plastik parçacıklar olarak tanımlanarak üst boyut sınırı getirilmiştir (Arthur ve diğ. 2009). Tablo 2.1’de günümüzde güncel olarak kabul edilmiş olan plastik parçacıkların boyut sınıflandırması verilmektedir.

Tablo 2.1: Plastik parçacıkların boyut sınıflandırması (Crawford ve Quinn, 2017)

Kategori	Boyut
Makroplastik	≥ 25 mm
Mezoplastik	< 25 mm-5 mm
Mikroplastik	< 5 mm
Mini-mikroplastik	< 1 mm-1 μ m
Nanoplastik	< 1 μ m

Su ortamında mikroplastikler genellikle daha büyük plastiklerin parçalanması yolu ile meydana gelse de, özellikle mikro boyutta üretilen plastiklerdeki mikrobuncuklar diş macunu, şampuan, deterjan gibi hijyen ürünlerinde aşındırıcı özelliğinden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır (Hidalgo-Ruz ve diğ. 2012). Benzer şekilde diğer birincil mikroplastiklerden olan peletler, eritilerek farklı plastik formlara dönüştürülmektedir (Gallagher ve diğ. 2016). Ayrıca, tekstil sektöründe kullanılan sentetik lifler de birincil mikroplastikler olarak kabul edilmektedir (Crawford ve Quinn, 2017). Dolayısıyla, endüstriyel kaynaklı olanlar birincil mikroplastikler olarak adlandırılırken, doğada zaman içinde büyük plastiklerden parçalananlar ise ikincil mikroplastikler olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.1) (Jones ve diğ. 2020).

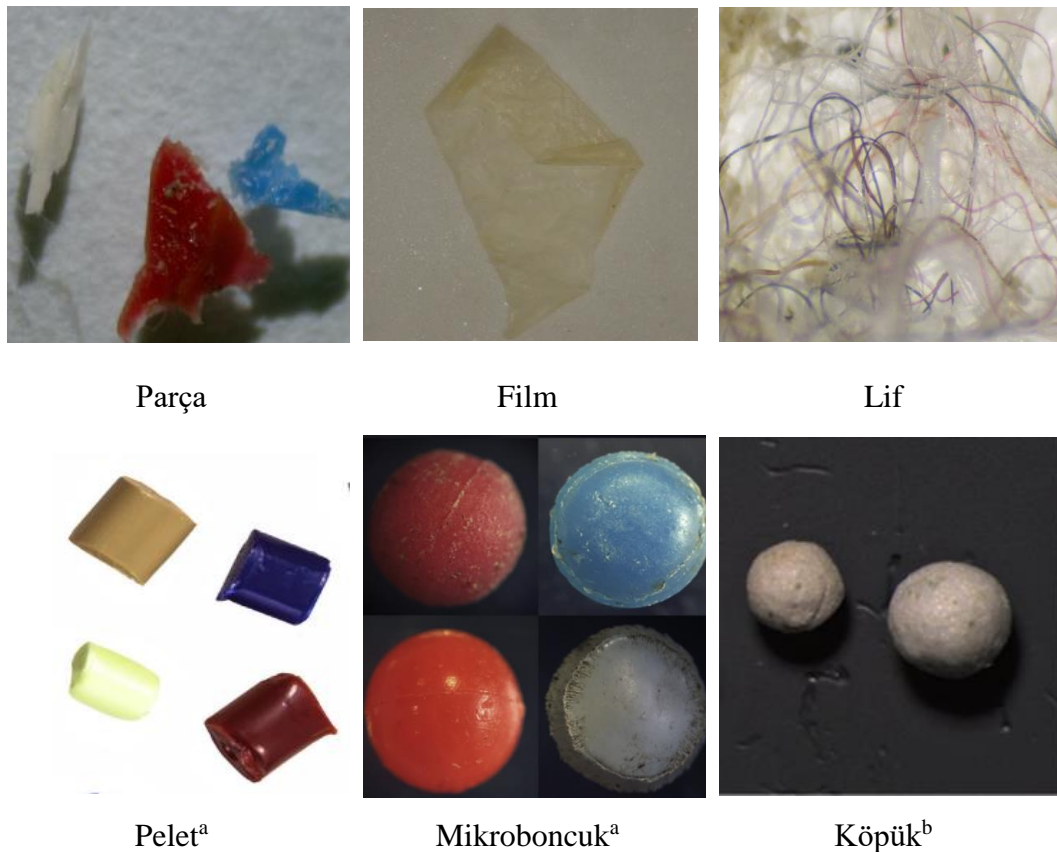


Şekil 2.1: Birincil ve ikincil mikroplastikler

Mikroplastikler çeşitli miktarlarda katkı maddeleri ve kirleticiler içeren ve çeşitli şekil, boyut ve renklere sahip kirleticilerdir (Lusher ve diğ. 2020). Mikroplastiklerin şekil ve renk gibi morfolojik özellikleri şüpheli parçacıkların görsel olarak mikroplastik olup olmadığı konusunda fikir vermektedir (W. Wang ve diğ. 2020). Birincil mikroplastikler küresel veya lifli düz bir yüzeye sahipken, ikincil mikroplastikler düzensiz şekilli parçacıklardır. Mikroplastiklerin şekil ve renklerine göre kategorize edilmesi kaynağının tahmin edilmesini de kolaylaştırmaktadır. Örneğin; Carr ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada atıksu numunelerinde tespit ettikleri mavi polietilen parçacıkların diş macunlarından izole edilen parçacıklarla aynı olduklarını keşfetmişlerdir. Ancak ikincil mikroplastiklerin kaynağının tespit edilmesi daha zordur (Mintenig ve diğ. 2017). Mikroplastik renk kategorileri çalışmaları

arasında farklılık göstermekle birlikte, Lusher ve diğ. (2020) renklerin siyah, beyaz, şeffaf ve ikincil renkler (kırmızı, turuncu, sarı, yeşil, mavi, mor) olarak kategorize edilmesini önermişlerdir. Ayrıca sucul ekosistemlerde mikroplastiklerin rengi, deniz canlıları tarafından doğal gıda kaynakları ile karıştırılmaya sebep olmaktadır ve dolayısıyla tüketilmesi noktasında önemli bir etkiye sahiptir (Crawford ve Quinn, 2017). Türkiye’de yapılan bir çalışmada balık midelerinde en çok mavi renkli mikroplastikler tespit edildiği gösterilmiştir (Güven ve diğ. 2017).

Mikroplastikler, çevresel numunelerde çeşitli formlarda (parça, film, lif, mikroboncuk, pelet, köpük vs.) bulunmaktadır. Mikroplastikler potansiyel kaynakların belirlenmesinde veya ortamlardaki partikül davranışı veya organizmalar tarafından tüketilmesi gibi konuların değerlendirilmesinde fayda sağlamaktadır (Lusher ve diğ. 2020). Şekil 2.2. ve Tablo 2.2’de literatürde sıklıkla kullanılan şekil kategorilerinin fiziksel özellikleri ve fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 2.2: Farklı şekillerdeki mikroplastiklere ait görüntüler (^a: Crawford ve Quinn, (2017), ^b: Silva ve diğ. (2018))

Tablo 2.2: Mikroplastiklerin şekilleri ve fiziksel özellikleri (Free ve diğ. 2014)

Şekil kategorisi	Fiziksel özellik
Parça	Sert, düzensiz şekilli
Film	İnce, esnek, düzensiz şekilli
Lif	İnce, uzun ipliksi
Pelet	Düzensiz şekilli ve katı
Mikroboncuk	Düzensiz yuvarlak şekilli ve katı
Köpük	Gözenekli, hafif, sünger benzeri

Plastikler termoplastik ve termosetler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Termoplastikler ısıtıldığında yumuşayıp ve yeniden kalıplanabilirken, termoset plastikler ise polimerlerdeki çapraz bağlanma nedeniyle yeniden yumuşatılıp kalıplanamayacağı anlamına gelmektedir (Bergmann ve diğ. 2015). Plastik malzemeler kullanım amacına yönelik olarak çok çeşitli şekilde üretilerek binlerce farklı son ürüne dönüştürülmektedir (PlasticEurope, 2019). 2018 yılındaki verilere göre yaygın olarak üretilen polimer türleri, kullanım alanları (PlasticEurope, 2019) ve yoğunluk değerleri (Jones ve diğ. 2020) özetlenmiş olup, Tablo 2.3'te verilmektedir. En düşük polimer yoğunluğunun (0,89-0,92 g/cm³) polipropilene ait olduğu görülürken, en yüksek yoğunluk değerinin ise 2,14-2,19 g/cm³ ile politetrafloroetilene ait olduğu görülmektedir.

Günlük hayatta yaygın olarak kullanılan polimer türleri çevresel numunelerde mikroplastik olarak karşımıza çıkmaktadır. Örnek olarak, Çin'de gerçekleştirilen bir çalışmada evsel nitelikli atıksulardan izole edilen mikroplastiklerin %54,6 oranla polipropilen (PP), %29,7 oranla polistiren (PS) ve %9,7 oranla polietilen tereftalat (PET) olduğu gözlemlenmiştir (Wei ve diğ. 2020). Türkiye'de gerçekleştirilen farklı bir çalışmada ise, atıksularda tespit edilen yedi farklı polimer türünden en sık rastlanan türler sırasıyla polyester (PES, %50,8), PE (%29,2) ve PP (%13,8) olarak bulunmuştur (Gündoğdu ve diğ. 2018).

Tablo 2.3: 2018 yılında en çok üretilen polimer türleri (PlasticEurope, 2019; Jones ve diğ. 2020)

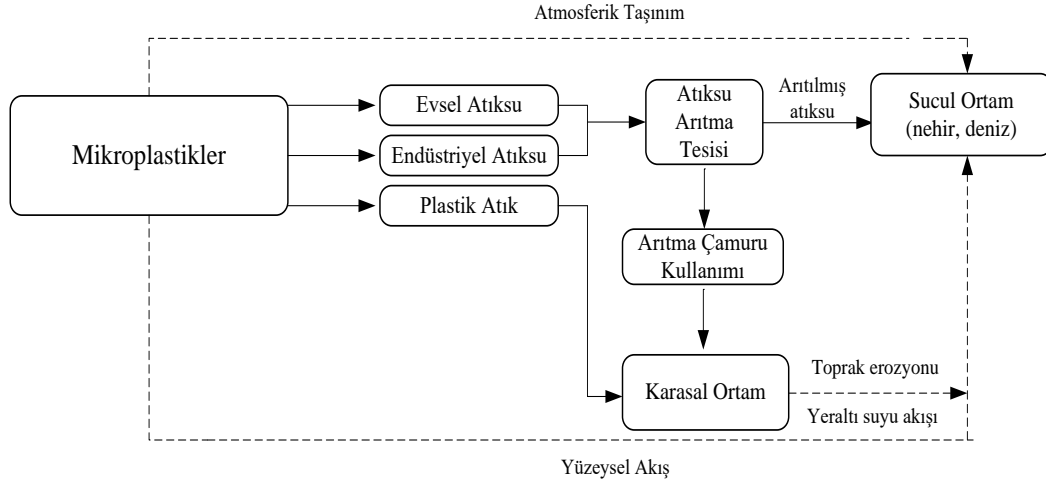
Polimer Adı (Kısaltması)	Yoğunluk (g/cm ³)*	Üretim Oranı (%)	Kullanım Alanları
Polipropilen (PP)	0,89-0,92	19,3	Gıda ambalajları, otomotiv sektörü
Alçak yoğunluklu polietilen (PE-LD)	0,91–0,97	17,5	Yeniden kullanılabilir poşetler, tepsiler ve kaplar, gıda ambalajları vb.
Lineer alçak yoğunluklu polietilen (PE-LLD)			
Yüksek yoğunluklu polietilen (PE-HD)		12,2	Oyuncaklar, süt şişeleri, şampuan şişeleri, borular, ev eşyaları vb.
Orta yoğunluklu polietilen (PE-MD)			
Polivinil Klorür (PVC)	1,3-1,45	10	Pencere kasaları, profiller, yer ve duvar kaplamaları, borular, kablo izolasyonları, bahçe hortumları, şişme havuzlar vb.
Poliüretan (PU)	1,01-1,21	7,9	Bina yalıtımı, yastıklar ve şilteler, buzdolapları için yalıtım köpükleri vb.
Polietilen tereftalat (PET)	1,37-1,38	7,7	Su, alkolsüz içecekler, meyve suları, temizleyiciler vb. için şişeler.
Polistiren (PS)	0,96-1,05	6,4	Gıda ambalajları, bina yalıtımı, elektrikli ve elektronik ekipman, buzdolapları için iç astar, gözlük çerçeveleri vb.
Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	1,0-1,05	19	Lastik jantları
Polibütilen tereftalat (PBT)	1,31-1,38		Optik kablolar
Polikarbonat (PC)	1,15-1,52		Göz lensleri
Polimetil metakrilat (PMMA)	1,17-1,20		Dokunmatik ekranlar
Politetrafloroetilen (PTFE)	2,14-2,19		Kablo kaplama, iletişim

2.1 Mikroplastiklerin Doğadaki Döngüsü

Mikroplastik kirliliğinin araştırılması çalışmaları genellikle göl (Liang ve diğ. 2022; W. Wang ve diğ. 2018; Q. Zhang ve diğ. 2021), nehir (S. Liu ve diğ. 2021; Tsering ve diğ. 2021), deniz (de Haan ve diğ. 2019; Zhu ve diğ. 2019), karasal (Ding ve diğ. 2020; Gao ve diğ. 2020; van den Berg ve diğ. 2020) ve atmosfer (Chen ve diğ. 2019; Gasperi ve diğ. 2018) gibi bağımsız ortamlarda gerçekleştirilmektedir. Fakat, mikroplastiklerin sucul ve karasal ortamlar arasında taşınımı birbiriyle oldukça bağlantılı olup hava ve çevre koşullarına bağlı olarak dağılımı değişkenlik

gösterebilmektedir (Horton ve Dixon 2017). Yayımlanan son çalışmalara göre, mikroplastik kirliliği deniz sedimanlarında bulunmasının yanı sıra, dünyanın en yüksek dağı olan Everest'in zirvesine yakın konumdan alınan kar örneklerinde de (3-119 MP/L) rastlanmış olup, mikroplastik konsantrasyonuna numune alınan konumun yüksekliği, turizm, rüzgar ve yağış gibi hava koşullarının etki ettiği gözlemlenmiştir (Napper ve diğ. 2020).

Şekil 2.3'te mikroplastiklerin çevredeki taşınım yolları gösterilmiştir. Kaynaklarına göre birincil ve ikincil olarak sınıflandırılan mikroplastikler çevreye salınımindan sonraki süreçte evsel/endüstriyel atıksularla veya katı atık olarak çevresel döngüye dahil olmaktadır. Mikroplastikler, evsel kullanım ve endüstriyel deşarj ile kanalizasyon sistemlerine girmekte ve atıksu arıtma tesislerine ulaşmaktadır. Atıksu arıtma tesisleri %90'ın üzerinde mikroplastik giderimi sağlamasına rağmen arıtılmış atıksular mikroplastik içermektedir (Talvitie ve diğ. 2017). Günlük olarak yüksek atıksu arıtma kapasitesi olan arıtma tesisleri dikkate alındığında, arıtılmış atıksu deşarjı ile ciddi boyutlara varan mikroplastik konsantrasyonları alıcı ortamlara doğrudan verilmektedir. Böylece mikroplastiklerin sucul ortamlara girmesi için bir yol oluşturmaktadır. Sucul ortama mikroplastik deşarjının diğer yollarının ise atmosferik taşınım ve yüzeysel akış olduğu literatürde yapılan çalışmalarda bildirilmiştir. Atmosferde bulunan mikroplastikler ilk olarak Paris'te yapılan bir çalışma ile ortaya konmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, mikroplastik konsantrasyonu ortalama 118/MP/m²/gün bulunmuş olup, %90 oranda fiber yapıda oldukları tespit edilmiştir (Dris ve diğ. 2015). Mikroplastiklerin karasal ortamlara girmesi için ise arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamurların gerek tarımsal amaçlı kullanımı gerekse düzenli depolama sahasına gönderilmesi ve yetersiz katı atık yönetimi nedeniyle gerçekleşmektedir. Mikroplastiklerin sucul ve karasal ortamlardaki davranışları bir sonraki bölümde daha detaylı incelenmiştir.



Şekil 2.3: Mikroplastiklerin çevrede taşınımı (Huang ve diğ. 2021)

2.1.1 Sucul Ekosistemlerde Mikroplastikler

Deniz ortamlarındaki mikroplastik kirliliği ve dağılımı, yapılmış çalışmalarla geniş çapta incelenmiştir. Denizlere ulaşan mikroplastiklerin esas kaynağının %75-%90 oranla karasal akış kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir (W. C. Li 2018). Diğer kaynaklara ise nehirlerden gelen mikroplastik yükü, evsel ve endüstriyel deşarjlar, balıkçılık faaliyetleri ve yasadışı atık boşaltma gibi sebepler sayılabilmektedir (Horton ve Dixon 2017). Bu nedenle denizler genellikle çevredeki tüm plastikler için nihai alıcı ortam olarak kabul edilmektedir. Mikroplastikler, deniz ortamına bir kez girdikten sonra, çoğu plastik polimerin yüksek düzeyde “korozyona dayanıklı” olması nedeniyle okyanuslarda uzun süre kalabilmektedir (W. C. Li 2018). Mikroplastiklerin sucul ortamdaki davranışları üç kategoride incelenebilmektedir (Crawford ve Quinn 2017):

- ✓ Fiziksel: Birikme, sedimentasyon ve taşınım,
- ✓ Kimyasal: Kirleticilerin adsorpsiyonu ve absorpsiyonu,
- ✓ Biyolojik: Organizmalar tarafından yiyecek olarak tüketilme ve trofik transfer.

Plastiklerin birçok farklı polimerden oluşması nedeniyle kimyasal kompozisyonları, yoğunlukları ve şekilleri çeşitlilik göstermektedir (Cole ve diğ. 2011). Bu durum ise mikroplastiklerin su ortamındaki fiziksel davranışlarını etkilemektedir. Yoğunluğu sudan az olan plastikler su üzerinde yüzmeye eğilimi

gösterirken, ağır olanlar ise çökme eğilimindedir. Burada tek faktör yoğunluk olmamakla birlikte mikroplastığın şekli de önemli bir parametredir. 2016 yılında gerçekleştirilen laboratuvar ölçekli bir çalışmada, yoğunluğu düşük olan PA (1,14 g/cm³), yoğunluğu yüksek olan PVC (1,56 g/cm³) polimerinden daha yüksek oranda suda çökme eğilimi göstermiş olup, çökme hızının yalnız yoğunluğa bağlı olmayıp mikroplastik şeklinin de önemli bir parametre olduğu ortaya konmuştur (Kowalski ve diğ. 2016). Polimer yoğunluğu, şeklinin dışında biyo-kirlenme ve çevresel koşullar (güneş ışığı, rüzgar, kimyasal, biyolojik veya mekanik kuvvetler) altında bozunmuş mikroplastik yüzeyi de mikroplastiklerin sudaki çökme eğilimlerini önemli ölçüde etkilemektedir (Kowalski ve diğ. 2016; Koyuncuoğlu ve Erden 2021). Biyo-kirlenme, mikroplastiklerin polimer türü, yüzey alanı, enerjisi ve pürüzlülüğünün etkisi altında, yüzeylerde organizmaların büyümesi olarak tanımlanmaktadır (Coyle ve diğ. 2020). Deniz ortamında bulunan mikroplastiklerin üzerinde mikrobiyal biyofilmler hızla birikmekle birlikte, mikroplastik yüzeyinde alg ve omurgasızların kolonizasyonu ile partikülün yoğunluğunu arttırmaktadır (Cole ve diğ. 2011). Böylece yoğunluğu sudan fazla olan ya da çeşitli etkenlerle yoğunluğu artan mikroplastikler deniz ortamında bentik bölgelere taşınmaktadır (Y. Li ve diğ. 2020). Bentik bölge haricinde mikroplastiklerin deniz ortamındaki dağılımı dikey olarak düşünüldüğünde, su yüzeyinde, su kolonlarında, kumsallarda ve sedimanlarda bulunmaktadır (Choy ve diğ. 2020; Mahat 2017). Su üzerinde yüzmeye eğilimi gösteren mikroplastikler, rüzgarların yönüne, okyanus akıntılarına ve kıyı şeridinin coğrafi konumuna bağlı olarak uzun mesafeler kat edebilmektedir (W. C. Li 2018). Mikroplastiklerin yatay dağılımının söz konusu olduğu bu durumda, Antartika (Reed ve diğ. 2018) ve Kuzey Buz Denizi'nde (Ross ve diğ. 2021) mikroplastikler tespit edilmiş olup, atmosferik taşıma ve okyanus akıntılarının buna sebep olacağı ileri sürülmüştür.

Mikroplastik kirliliği ilk olarak deniz ortamında yapılan araştırmaların yoğunluğu nedeniyle yalnızca denizlerde karşılaşılan bir kirlilik olarak görülmekteydi. Ancak son zamanlarda yapılan çalışmalarda tatlı su (göl ve nehir) sistemlerinde mikroplastik kirliliği sıklıkla tespit edilmektedir (Chaukura ve diğ. 2021). Tatlı su ekosistemleri, mikroplastik kirliliğinin doğrudan deşarj edildiği alıcı ortam olmakla birlikte, diğer ekosistemlere taşıyan kaynak ortam olarak hareket etmektedir (Bank ve Hansson 2021). Göllerdeki su kalitesinin ve hidrolojik ortamın nehirlere göre nispeten sabit olması nedeniyle, su kütlesi ve sediman özellikleri değişkenlik

göstermemektedir. Bu nedenle, nehirlerden daha uzun süre su tutarak daha fazla mikroplastığın istikrarlı bir şekilde birikmesine izin vermektedir (S. Yang ve diğ. 2022). Çin’de bulunan 20 farklı gölde mikroplastik kirliliği W. Wang ve diğ. (2017) tarafından araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, mikroplastik konsantrasyonlarının $1660,0 \pm 639,1$ ile 8925 ± 1591 MP/m³ arasında değiştiği ve antropojenik faktörlerin bu konsantrasyonlar üzerinde etkili olduğunu rapor edilmiştir. Tespit edilen mikroplastiklerin %80’inin boyutunun 2 mm’den küçük olduğu gözlemlenirken, baskın mikroplastik şeklinin lif, polimer türlerinin ise sırasıyla PET ve PP olduğu gözlemlenmiştir. Hindistan’da yapılan farklı bir çalışmada gölden alınan su numunelerinde ortalama mikroplastik konsantrasyonu 5,9 MP/L bulunurken, sediman numunelerinde 27 MP/kg olarak bulunmuştur (Gopinath ve diğ. 2020). Taihu Gölü’nde (Çin) mikroplastik kirliliğinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise, su numunesinde mikroplastik konsantrasyonu 1,7-8,5 MP/L, sediman numunelerinde ise 460-1380 MP/kg olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, boyutu 100 µm’den küçük olan mikroplastikler göl yüzeyinde yalnızca %28 oranda bulunurken, sedimanlarda bu oran %70’e kadar yükselmektedir. Çalışma sonucunda küçük boyutlu mikroplastiklerin daha kolay çökerek sedimanlarda biriktiği belirlenmiştir (Q. Zhang ve diğ. 2021).

Bir diğer tatlı su ekosistemi olan nehir ekosistemleri de, mikroplastikleri su ortamında ve çoğunlukla sedimanlarda biriktirerek deniz ortamlarına mikroplastik taşıyan bir yol olarak görülmektedir (Kumar ve diğ. 2021). Ganj Nehri’nde yapılan bir çalışmada, su ve sediman numunelerinde mikroplastik kirliliği hem sayısal hem de kütleli olarak hesaplanmıştır (Singh ve diğ. 2021). Çalışmanın sonuçlarına göre mikroplastik konsantrasyonu su numunesinde sayısal olarak 466,48 MP/1000 m³ bulunurken, kütleli olarak 240,91 mg/1000 m³ ile ifade edilmiştir. Benzer şekilde, sediman numunelerinde sayısal ve kütleli olarak sırasıyla 25,2 MP/kg ve 34,93 mg/kg kuru ağırlık olarak tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin görsel analizi sonucunda beyaz renkli ve film şeklinde oldukları gözlemlenmiş olup, baskın polimer türü ise PE’dir.

Sucul ekosistemlerde gerçekleştirilen mikroplastik araştırmaları ışığında, mikroplastiklerin taşınımı tatlı su ve deniz ekosistemlerinde yüzey akıntıları gibi ortak mekanizmalarla meydana gelmektedir. Tatlı su ekosistemlerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu şekil ve boyutları bakımından deniz ekosistemleri ile

kıyaslandığında, kirletici kaynaklara yakınlığı dolayısıyla öngörülebilir farklılıklar göstermektedir (Chaukura ve diğ. 2021).

2.1.2 Karasal Ekosistemlerde Mikroplastikler

Karasal ekosistemlerde mikroplastik kirliliğinin araştırılması, sucul ortamlara kıyasla oldukça yeni bir araştırma alanıdır. Karasal emisyonlar baskın mikroplastik kaynağı olmasına rağmen, toprak ortamı oldukça kompleks bir yapı olduğu için mikroplastik kirliliğinin tespit edilmesi, izlenmesi, akıbeti ve etkisinin belirlenmesi zordur (Campanale ve diğ. 2022). Karasal ortamda mikroplastik kaynakları arasında, tarımsal uygulamalar (malç filmleri), arıtma çamurlarının arazide kullanımı, kompost uygulamaları, arıtılmış atıksuların tarımsal sulamada kullanılması, araç lastiklerine ait parçacıklar ve atmosferik birikim sayılmaktadır (J. Li ve diğ. 2020). Toprağa giren mikroplastikler, depolama, yer değiştirme, erozyon, bozunma ile yeraltı suyuna kadar ulaşabilmektedir (He ve diğ. 2018). Okyanusla karşılaştırıldığında, karasal ortam mikroplastikler için daha önemli bir alıcı ortamdır, çünkü karasal ortama salınan yıllık plastiklerin okyanusa salınandan 4-23 kat daha yüksek olduğu tahmin edilmektedir (Horton ve diğ. 2017). Toprakta mikroplastik birikimi halinde toprağın fiziksel özellikleri ve verimliliği, yerleşik mikrobiyal topluluklar, toprak kalitesi ve besin döngüsü olumsuz yönde etkilenebilmektedir (B. Xu ve diğ. 2020).

Arıtma çamurları ve atıksular, topraklardaki mikroplastik kirliliğine katkıda bulunan en önemli kaynaklardır (Q. Li ve diğ. 2019). Evsel/Kentsel atıksu arıtma tesisleri günlük olarak tonlarca arıtma çamuru üretmekte olup, pek çok ülkede stabilize edilmiş arıtma çamurları tarımsal arazilerde toprak iyileştiricisi ve/veya gübre olarak kullanılmaktadır (Corradini ve diğ. 2019). Ham atıksularda çok yüksek konsantrasyonlarda bulunan mikroplastikler yüksek giderim verim oranlarında arıtılmakla birlikte, sudan giderilen mikroplastikler arıtma çamurlarında konsantre hale gelmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden 2021). Çok miktarda mikroplastik içeren arıtma çamurları toprağa uygulandığında doğrudan karasal ortama dağılmaktadır. Nizzetto ve diğ. (2016) arıtma çamurlarının tarımsal uygulamalarda kullanımı sonucunda her yıl toprağa giren mikroplastik miktarını Avrupa'da $6,3 \times 10^7 - 4,3 \times 10^8$ kg, Kuzey Amerika'da ise $4,4 \times 10^7 - 3 \times 10^8$ kg olarak tahmin etmişlerdir. Çin'de

gerçekleştirilen bir çalışmada, arıtma çamurunun nihai bertaraf yöntemi olarak toprak ortamına uygulanma oranının artışı ile toprakta mikroplastik sayısının arttığı gözlemlenmiştir. Yıllık 30 ton/ha ve 15 ton/ha arıtma çamuru uygulanan topraklarda mikroplastik konsantrasyonu sırası ile 545,9 ve 87,6 MP/kg olarak bulunurken, uygulama yapılmayan toprakta ise mikroplastik konsantrasyonu 5 MP/kg olarak bulunmuştur (L. Zhang ve diğ. 2020). Kanada’da yapılan farklı bir çalışmada ise, mikroplastik içeren arıtma çamurlarının uygulandığı tarımsal topraklarda mikroplastik kirliliği araştırılmıştır. Çalışmada, hiç çamur uygulanmamış bir tarımsal alan da kontrol amaçlı örneklenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kontrol sahasındaki konsantrasyonlara oranla arıtma çamuru uygulaması yapılan alanlarda çok yüksek miktarda ($8,7 \times 10^3 - 1,4 \times 10^4$ MP/kg) mikroplastik bulunmuştur. Yıllık bazda mikroplastik birikimi ise $4,1 \times 10^{11} - 1,3 \times 10^{12}$ MP/kg olarak hesaplanmıştır (Crossman ve diğ. 2020).

Toprak ortamına giren mikroplastikler, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir (Gao ve diğ. 2020). Yüksek konsantrasyonlarda bulunan mikroplastiklerin toprakta çözülmüş organik karbon, organik azot ve fosfor, humus ve fulvik asit konsantrasyonlarını artırabildiği ve enzim aktivitesini etkileyebildiği ortaya konmuştur (H. Liu ve diğ. 2017). Ayrıca mikroplastiklerin şekillerine bağlı olarak toprakta bulunan bakteriler, mikroplastikler üzerine kolaylıkla kolonize olabilmektedir (M. Zhang ve diğ. 2019). Ayrıca, mikroplastikler toprak-su ilişkisini ve toprak agregaların stabilizasyonu da etkileyebilmektedir (Sarker ve diğ. 2020).

Mikroplastiklerin toprak ekosistemi üzerindeki olası olumsuz etkileri, yeraltı sularına karışma potansiyeli ve bitkiler tarafından bünyeye alınması detaylı olarak incelenmelidir. Suda yaşayan organizmalarda mikroplastiklerin biyo-birikimi geniş çapta araştırılmış olmasına rağmen, toprak organizmaları ve bitkiler hakkındaki bilgiler çok sınırlıdır. Bitkiler tarafından mikroplastik alımı, mikroplastiklerin besin zincirine girmesi için bir yol açmakta ve bu nedenle insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır (Koyuncuoğlu ve Erden 2021).

2.1.3 Atmosferde Mikroplastikler

Sucul ve karasal ekosistemlerde gerçekleştirilen mikroplastik araştırma sayılarına bakıldığında, atmosferde mikroplastik kirliliği konusunda çok sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan ilki 2015 yılında Paris'te gerçekleştirilmiş olup, çoğunluğu liflerden oluşan mikroplastik konsantrasyonu 29-280 MP/m²/gün rapor edilmiştir (Dris ve diğ. 2015). Hamburg'da atmosferde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu 275 MP/m²/gün olarak bulunurken (Klein ve Fischer 2019), Londra'da ise 771±167 MP/m²/gün olarak analiz edilmiştir (Wright ve diğ. 2020).

Fransa'da yapılan bir diğer çalışmada atmosferdeki mikroplastiklerin araştırılması amacıyla, şehirden ve sanayi merkezlerinden uzakta bulunan bozulmamış bir dağ havzasında (Pireneler) beş ay boyunca örnekleme yapılmıştır. Bu uzak bölgede kaydedilen ortalama mikroplastik konsantrasyonu 365±69 MP/m²/gündür. Ayrıca çalışma sonuçları, mikroplastiklerin 95 km'ye kadar bir mesafe boyunca atmosferde taşınabileceğini göstermiştir (Allen ve diğ. 2019). Literatürdeki çalışmalardan anlaşılacağı üzere, mikroplastikler atmosferde de bir kirlenici olarak karşımıza çıkmaktadır. Atmosferde bulunan mikroplastiklerin önemli bir kısmı lif şeklindedir bu durum esas olarak tekstilde kullanılan sentetik liflerin üretimi ve günlük kullanımından ileri gelmektedir (Chen, Fu, ve diğ. 2020). Sentetik liflere ek olarak, büyük plastiklerin aşınması, endüstriyel emisyonlar, trafikte salınan plastik parçacıklar, egzoz ve sokaktaki tozların yeniden süspansiyon haline gelmesi atmosferdeki mikroplastiklerin artmasına katkıda bulunmaktadır (Chen, Feng, ve diğ. 2020). Diğer yandan atmosferdeki mikroplastik konsantrasyonları, antropojenik faaliyetler, nüfus yoğunlukları ve sanayileşme seviyeleri ile ilintili olmakla birlikte hava koşulları (kar/yağmur yağışları ve rüzgar) da oldukça etkilidir (Chen, Fu, ve diğ. 2020; K. Liu ve diğ. 2019). Atmosferik mikroplastikler doğrudan solunum yolu ile insan sağlığı için bir risk oluşturmaktadır (Klein ve Fischer, 2019).

2.2 Mikroplastiklerin Diğer Kirlenicilerle Etkileşimi

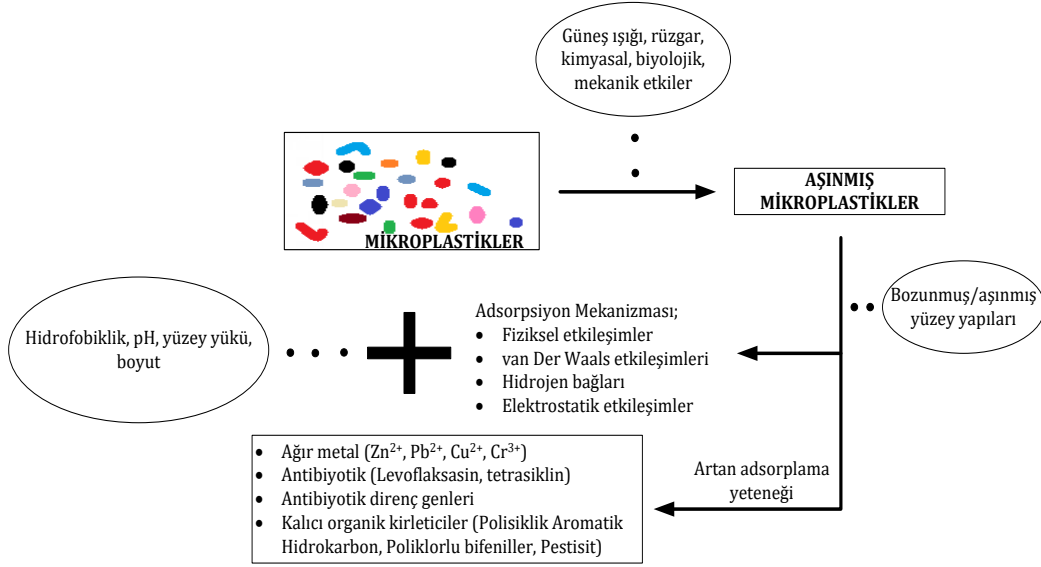
Mikroplastikler çevrede yarattığı risklere ilave olarak, buldukları ortamda diğer kirlenicilerle etkileşime geçerek bir vektör görevi görmektedir. Boyutlarının küçük olması, yüzey alanlarının geniş olması ve hidrofobik yapıları nedeniyle, kalıcı

organik kirleticileri (Antunes ve diğ. 2013; L. C. Wang ve diğ. 2021), ağır metalleri (Deng ve diğ. 2020; Guo ve Wang, 2021) ve antibiyotikleri (M. Sun ve diğ. 2021; Yu, Li, ve diğ. 2020) adsorbe edebilmektedir. Mikroplastiklerin, kalıcı organik kirleticiler (KOK) gibi farklı toksik kimyasalları da adsorbe etmesi nedeniyle, sucul canlılara potansiyel olumsuz etkileri son zamanlarda ilgi gören konular arasındadır (Tan ve diğ. 2019). Kalıcı organik kirleticilerden olan poliklorlu bifeniller (PCB), kullanımı yasaklanmasına rağmen halen su ortamlarında sıklıkla rastlanan kirleticiler arasındadır (Antunes ve diğ. 2013). Polistiren (PS) mikroplastiklerinin PCB (decachlorobiphenyl) adsorpsiyonunun analiz edildiği bir çalışmanın sonuçlarından elde edilen verilerin, yalancı-ikinci derece kinetiğe ($R^2=0,9832$) uygun olduğu gözlemlenmiştir. Adsorpsiyon deneylerinde ham PS mikroplastikler kullanılmış olup, farklı PCB başlangıç konsantrasyonları (0,01-0,8 mg/L), reaksiyon süreleri (0-144 sa) kullanılarak deneysel çalışma yürütülmüştür. Ek olarak adsorpsiyon davranışı, adsorplanan PCB moleküllerin mikroplastiklerin yüzeyinde tek tabaka halinde bulunduğunu, Langmuir izotermi ($R^2=0,982$, $K_L=549,97$ L/mg, $Q_{max}= 0,016$ mg/kg) ile açıklamışlardır (Tan ve diğ. 2019).

Ağır metaller, genellikle kanalizasyon deşarjları, e-atıklar ve madencilik faaliyetlerinin bir sonucu olarak su ortamında kirliliğe neden olmaktadır (M. Sun ve diğ. 2021). Sucul ve karasal ekosistemlerde bulunan ağır metaller mikroplastiklere adsorbe olarak ekstra bir kirlilik yükü getirmektedir. Mikroplastikler, ağır metallerin bulunduğu ortamdaki konsantrasyonlardan 10-100 kat daha fazla ağır metal adsorbe edebilmektedir (Khalid ve diğ. 2021). 2019 yılında yapılan bir çalışmada, işlenmemiş (ham) mikroplastiklerin (düşük yoğunluklu polietilen; HDPE) üzerine Cd^{2+} (5 g/L) adsorpsiyonu test edilmiştir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi, test edilen mikroplastik boyutları (1–2 mm, 0,6–1 mm ve 100–150 μ m) arasından en küçük mikroplastik boyutlarında elde edilmiş olup, maksimum adsorpsiyon kapasitesi 40-55 μ g/g arasında değişkenlik göstermiştir (reaksiyon süresi: 90 dk). Mikroplastik yüzeyinde yeni oluşan fonksiyonel grupların gözlenmemesi nedeniyle adsorpsiyon prosesinde fiziksel etkileşimlerin hakim olduğu rapor edilmiştir (F. Wang ve diğ. 2019). Tang ve diğ. (2020), bozunmuş/aşınmış naylon mikroplastikler üzerine Pb(II) adsorpsiyonu üzerine deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Naylon mikroplastiklerin Pb(II) giderme verimi %91 olarak saptanmış olup, maksimum adsorpsiyon kapasitesi

ise 1,05 mg/g olarak tespit edilmiştir (Pb(II) başlangıç konsantrasyonu: 9 mg/L, pH:6, mikroplastik dozu: 3 g/L).

Antibiyotikler, sucul ekosistemdeki mikrobiyal topluluklar üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle literatürde sıklıkla araştırma konusu olan bir kirletici sınıftır (J. Li ve diğ. 2018b). Yu, Yang, ve diğ. (2020), tipik bir antibiyotik olan tetrasiklinin (TC) farklı tür ve boyutlardaki işlenmemiş mikroplastiklerin yüzeyinde adsorpsiyon davranışını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, kullanılan farklı mikroplastik türleri (PE, PS, PET) arasından en yüksek adsorpsiyon kapasitesi (1,227 mg/g; Freundlich izotermi) ile PE (5 mg/L) olmuştur. PE'nin partikül boyutunun artması ile adsorpsiyon kapasitesi azalmıştır. Sun ve diğ. (2021) antibiyotiklerin (Azitromisin; AZI ve Klaritromisin; CLA) dört farklı polimer türüne ait mikroplastikler (polietilen tereftalat; PET, polilaktik asit; PLA, polioksimetilen; POM ve polistiren; PS) üzerine adsorpsiyonu konusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, her iki antibiyotiğin de (AZI: 500 µg/L, CLA: 1000 µg/L) test edilen tüm mikroplastik çeşitlerine adsorbe olduğu gözlemlenmiştir (135 dev/dk; reaksiyon süresi: 4 sa; sıcaklık: 28°C). AZI antibiyotiği test edilen tüm mikroplastiklerde önemli bir farklılık göstermeksizin $0,00178 \pm 0,00078$ ile $0,00270 \pm 0,00018$ mg/g aralığında adsorbe olmuştur. CLA antibiyotiğinin ise test edilen mikroplastik türleri arasında en yüksek adsorpsiyon kapasitesine ($0,00487 \pm 0,00018$ mg/g) PS türünün sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ham mikroplastikler siyanobakteriler üzerinde olumsuz bir etkiye sebep olmazken, antibiyotik adsorblayan mikroplastikler siyanobakterilere toksik etki yaratarak büyümesini inhibe etmiştir. Farklı bir çalışmada ise ham mikroplastiklerin ve UV ışığı altında aşındırılmış mikroplastiklerin (PS ve PVC) siproflaksasin (CIP: 10 g/L) antibiyotiğinin adsorpsiyonu üzerine deneysel çalışma yürütülmüştür. Her iki polimer türünde de aşınmış mikroplastiklerin ham olanlara göre daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu bildirilmiştir. Aşınmış mikroplastiklerdeki oksijen içeren fonksiyonel grupların, partiküllerin hidrofobikliğini azaltarak adsorpsiyon kapasitesinin artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Mikroplastikler, çevreye girdiklerinde güneş ışığından, rüzgardan, kimyasal, biyolojik veya mekanik kuvvetlerden etkilenmektedir (Şekil 2.4) (Silva ve diğ. 2018). Böylece, daha küçük parçalara ayrılıp yüzey deformasyonu oluşabilmekte, dolayısıyla daha fazla potansiyel adsorpsiyon bölgelerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır (J. Li ve diğ. 2018a).



Şekil 2.4: Farklı kirleticilerin mikroplastikler tarafından adsorpsiyon mekanizması ve etkileyen faktörler (Koyuncuoğlu ve Erden 2021)

2.3 Mikroplastiklerin Canlılar Üzerine Etkileri

Mikroplastikler, deniz, tatlı su, sediment ve karasal ortamlar dahil olmak üzere doğal ortamlarda yaygın olarak (X. Li ve diğ. 2018) bulunması nedeniyle canlıların maruz kalması kaçınılmazdır. Ancak bu maruziyetin doğuracağı sonuçlar henüz tam olarak anlaşılabilmiş değildir (Prata ve diğ. 2019). Mikroplastiklerin deniz organizmaları tarafından yutulması sonucunda, besin zinciri yoluyla daha yüksek trofik düzeydeki organizmalara aktarılması söz konusu olup biyo-birikim ile deniz organizmasından insana kadar ulaşip zarar verebilirler (Andrady 2011). Son yıllarda mikroplastiklerin alıcı ortamda tespitine yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar tüm dünyada artış göstermiş ve önemi kavranmaya başlanmıştır. Özellikle son 10 yılda deniz ortamındaki mikroplastiklerin tespiti ve sucul yaşam üzerindeki etkileri detaylı olarak çalışılmaktadır (Canniff ve Hoang 2018; Lei ve diğ. 2018; Ma ve diğ. 2016; Mendoza ve diğ. 2015; Urbano ve diğ. 2017). Farklı organizmalar üzerinde yapılan çalışmalarda mikroplastik etkilerinin organizmaya özgü olmasının yanı sıra, mikroplastik dozuna, canlı morfolojisine ve polimer tipine bağlı olduğu görülmektedir (Payton ve diğ. 2020). Küçük boyutlarından ve doğal gıda maddelerine benzerliklerinden dolayı, mikroplastikler birçok deniz canlısı tarafından kolayca tüketilmektedir (W. Wang ve diğ. 2020). Örneğin; zooplanktonlar, birçok ikincil

tüketici için önemli bir besin kaynağıdır. Zooplanktonların mikroplastikleri tüketmesi dolayısıyla mikroplastiklerin besin zincirine girebileceği ve daha yüksek trofik seviyelere transfer olabileceği ortaya konmuştur (Botterell ve diğ. 2019). Berglund ve diğ. (2019) tatlı su midyeleri üzerinde yaptıkları bir çalışmada, analiz edilen tüm midyelerin mikroplastik içerdiğini ve midyelerde bulunan mikroplastik sayısının midyenin boyutuyla arttığını rapor etmişlerdir. İncelenen 32 adet midyede toplam 1620 adet fiber yapıda mikroplastik bulunmuş olup yedi farklı renkte (%29 siyah, %25 şeffaf, %14 kırmızı, %13 yeşil, %10 gri, %5 mavi ve %5 mor) olduğu saptanmıştır.

Bugüne kadar mikroplastikler, tatlı su ve deniz ortamında olmak üzere 150'den fazla balık türü bünyesinde tespit edilmiştir (Jabeen ve diğ. 2017). Türkiye'de bulunan Karasu Nehri'nde tatlısu kefali (*Squalius cephalus*), sazan balığı (*Cyprinus carpio*) ve mosul kasvetli balığı (*Alburnus mossulensis*) olmak üzere üç farklı balık türünün gastrointestinal sistemlerinde mikroplastik varlığı araştırılmıştır (Atamanalp ve diğ. 2021). Elde edilen sonuçlara göre, tüm balıklarda toplamda 232 adet mikroplastik tespit edilmiştir. Baskın mikroplastik rengi siyah (%39-%58) olarak bulunurken baskın şekil ise lif (%88) olarak tespit edilmiştir. ATR-FTIR analizi yardımıyla tespit edilen polimer türleri ise polietilen, polyester, polivinil stearat, polietilen tereftalat, polipropilen ve selüloz olmuştur. Güven ve diğ. (2017) tarafından Akdeniz'de gerçekleştirilen farklı bir çalışmada, 1337 adet balık numunesinde mikroplastik varlığı araştırılmıştır. Balıkların mide ve bağırsaklarında toplamda 1822 adet mikroplastik tespit edilmiştir. Bu mikroplastiklerin %70 oranında lif ve sert plastiklerden (%20,8) oluştuğunu ve çoğunluğunun mavi renkli olduğunu rapor etmişlerdir. Mikroplastiklerin bünyeye alınması yalnızca balık üzerinde fiziksel etkilere (örneğin mekanik hasar ve sindirim sistemi tıkanması) neden olmakla kalmamakta, aynı zamanda bazı tehlikeli maddelerin (örneğin plastik katkı maddeleri, ortam matrislerinden adsorbe edilen toksik kimyasallar) sudaki besin zincirine karışması için potansiyel bir yol sağlamaktadır (W. Wang ve diğ. 2020). Nobre ve diğ. (2015) mikroplastiklerden sızan kimyasal maddelerin deniz kestanesinin (*Lytechinus variegatus*) embriyonik gelişimine vereceği muhtemel zararı belirlemişlerdir. İşlenmemiş granül polietilene maruz kalan deniz kestanelerinde anormal embriyonik gelişimin %66,5 oranında arttığı belirtilmiştir.

Jin ve diğ. (2019) memeli hayvan olan fareler üzerinde mikroplastiklerin etkisini incelemek için 5µm boyutunda polistiren mikroplastiklere fareleri 6 hafta boyunca maruz bırakmışlardır. Mikroplastiklerin farelerin bağırsaklarındaki biyotanın bozulmasına, bağırsak mukusunda fonksiyon bozukluğuna ve metabolik bozukluklara sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Polistiren mikroplastiklerin dışı fareler üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmanın sonuçlarına göre, farelerin mikroplastiklere 35 günlük maruziyetinin sonunda kalp, karaciğer, akciğer, böbrek, beyin, bağırsaklar, yumurtalıklarında birikim yaptığı belirlenmiştir. Ayrıca, mikroplastik maruziyetinin dışı farelerde üreme toksisitesine sebep olabileceği öne sürülmüştür (Z. Liu ve diğ. 2021). Karasal ortamda yaşayan toprak solucanları ise mikroplastik çalışmalarında model organizma olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Lahive ve diğ. 2019; Qi ve diğ. 2018; W. Sun ve diğ. 2021). Il Kwak ve An, (2020) toprak solucanlarının mikroplastikleri bünyelerine alıp sindirim yolu ile nanoplastikleri oluşturduğunu gözlemlemiştir. Toprak solucanları üzerine mikroplastiklerin olumsuz etkileri mikroplastik dozuna, boyutuna ve polimer türüne bağlı olarak değişmekle birlikte, olumsuz etkileri arasında yüzey hasarı, oksidatif stres, ilave kirleticilerin biyolojik birikiminde artış, büyüme ve üreme hızında azalma ve sperm DNA hasarları olarak sayılabilmektedir (Y. Cheng ve diğ., 2020; C. Huang ve diğ., 2021).

Mikroplastikler, son zamanda yapılan çalışmalarla ortaya konduğu üzere şişe su (Oßmann ve diğ. 2018), bal (Mühlschlegel ve diğ. 2017), bira (Lachenmeier ve diğ. 2018), poşet çay (Hernandez ve diğ. 2019), sofraya tuzu (Gündoğdu 2018; Lee ve diğ. 2019; D. Yang ve diğ. 2015) gibi farklı besin maddelerinde de tespit edilmiştir. Hem atmosferik mikroplastiklerin solunumu yoluyla hem de gıda maddelerinden kaynaklı mikroplastikler insan sağlığı için tehdit oluşturmaktadır. Günlük hayatta sıklıkla kullanılan sofraya tuzlarının üretiminde, denizlerden veya göllerden alınan sular mikroplastikleri, organik malzemeleri ve kum parçacıklarını içerebilmektedir (Gündoğdu 2018). Türkiye’de sofraya tuzlarında mikroplastiklerin tespiti üzerine iki farklı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada, marketlerden satın alınan 16 farklı sofraya tuzu markasında mikroplastik kirliliği araştırılmıştır (Gündoğdu 2018). Çalışmanın sonuçlarına göre, deniz tuzlarında 16-84 adet/kg, göl tuzlarında 8-102 adet/kg ve kaya tuzlarında 9-16 adet/kg mikroplastik tespit edilmiştir. En yaygın plastik polimerler ise polietilen (% 22,9) ve polipropilen (% 19,2) olarak belirtilmiştir (Gündoğdu 2018). Sofraya tuzlarının içerdiği mikroplastiklerin tespitine yönelik yapılmış diğer çalışmada,

10 farklı markaya ait deniz, göl ve kaya tuzları incelenmiştir. Sonuç olarak, kaya tuzlarında ortalama 28 MP/200g, deniz tuzlarında 56 MP/200g ve göl tuzlarında 63 MP/200g tespit edilmiştir (Yurtsever 2018).

Mikroplastikler, içme suyu kaynaklarında da bulunmaktadır. Örneğin; Çin’de gerçekleştirilen bir çalışmada, 20 milyon insana içme suyu kaynağı olarak kullanılan Taihu Gölü’nde farklı nokta ve zamanlarda alınan numunelerde mikroplastik miktarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçlarına göre, yüzey sularında 3,4-25,8 mikroplastik/L, yüzey altı (30-40 cm derinlik) numunelerinde $0,01 \times 10^6$ - $6,8 \times 10^6$ mikroplastik/km² ve sediman örneklerinde ise 11,0-234,6 mikroplastik/kg kuru ağırlık olarak tespit edilmiştir (Su ve diğ. 2016). İçme sularında mikroplastiklerin tespiti için, Pivokonsky ve arkadaşları tarafından 2018 yılında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Üç farklı içme suyu arıtma tesisi seçilerek ham ve arıtılmış sular analiz edilmiştir. Çalışma sonucuna göre, arıtma tesisine bağlı olarak, mikroplastik konsantrasyonlarının ham sularda 1473 ± 34 MP/L ile 3605 ± 497 MP/L, arıtılmış sulara ise 338 ± 76 MP/L ile 628 ± 28 MP/L arasında değiştiği saptanmıştır (Pivokonsky ve diğ. 2018).

Tarımsal araziler mikroplastikler dahi olmak üzere pek çok kirleticiye maruz kalmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda bakla (Jiang ve diğ. 2019), soğan (De Souza Machado ve diğ. 2019), mısır (Urbina ve diğ. 2020), buğday (L. Li ve diğ. 2020) gibi çeşitli bitkilerde mikroplastiklerin etkileri araştırılmaktadır. Bu konu oldukça yeni bir araştırma alanı olması nedeniyle sınırlı sayıda yayın bulunmaktadır. Yine de, mikroplastiklerin doğrudan veya dolaylı olarak toprak özelliklerini değiştirmesi ve/veya tohum gözeneklerine tutunarak su almasını engelleyerek olumsuz etkiler yarattığı bilinmektedir (Khalid ve diğ. 2020). Boots ve diğ. (2019), polilaktik asit ve yüksek yoğunluklu polietilen ve sentetik mikroplastik liflerle kontamine olmuş toprak ortamında İngiliz çimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. 30 günlük mikroplastik maruziyeti üzerine elde edilen sonuçlarda sürgün yüksekliğinde ve biyokütlede azalmanın yanı sıra daha az sayıda tohumun çimlendiği rapor edilmiştir. Yakın zamanda yapılan bir çalışma ile yenilebilir meyve (elma ve armut) ve sebzelerde (havuç, marul, brokoli ve patates) 10 µm’nin altında boyuttaki mikroplastik varlığı araştırılmış olup yetişkin bireyler ve çocuklar için günlük bünyeye mikroplastik alımı tahmin edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, analiz edilen meyvelerin,

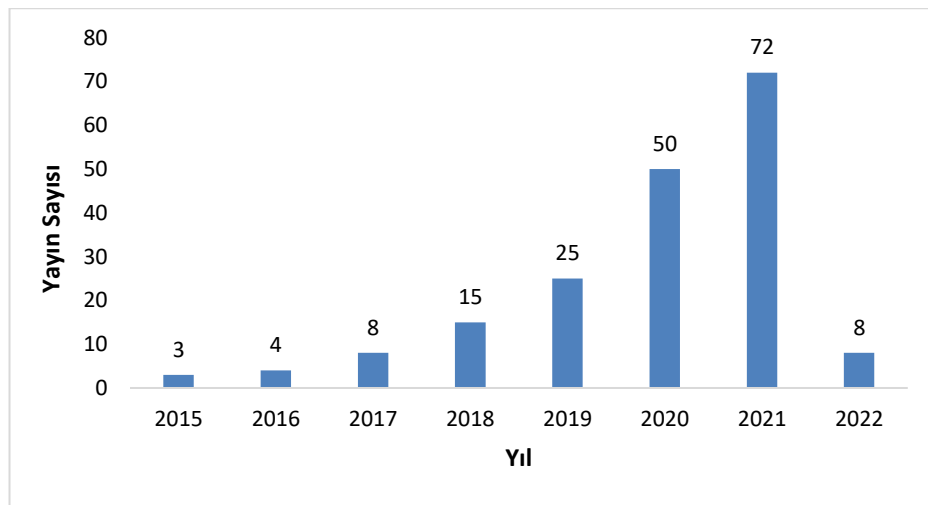
sebzelere oranla mikroplastik kontaminasyonu daha yüksek bulunmuştur. Tespit edilen mikroplastik konsantrasyonları meyve ve sebze çeşitlerine bağlı olarak 52,050-233,000 MP/g arasında değiştiği ve analiz edilen meyveler/sebzeler arasından mikroplastikle en çok kontamine olanın elma; en az kontamine olanın ise marul olduğu bildirilmiştir. Yetişkin bireyler ve çocuklar için elma üzerinden tahmin edilen günlük bünyeye alınan mikroplastik sayıları ise sırasıyla $4,62 \times 10^5$ ve $1,41 \times 10^6$ olarak bulunmuştur (Oliveri Conti ve diğ. 2020).

Mikroplastiklerin canlı bünyesindeki muhtelif etkileri yukarıda özetlenmiştir. Bununla birlikte en ilgi çekici olan 2021 yılında insan plasentasında mikroplastik tespiti üzerine gerçekleştirilen çalışmadır. Ragusa ve diğ. (2021) inceledikleri altı adet insan plasentasından dört tanesinde mikroplastik tespit edilmiş olup küresel ve düzensiz şekilli olarak kaydedilmiştir. Toplamda 12 adet mikroplastik (5-10 μm) tespit edilmiş olup, kimyasal kompozisyonu Raman Mikrospektroskopisi ile analiz edilmiştir. 12 mikroplastikten üç tanesi polietilen olarak tanımlanmıştır. Diğer dokuz adet mikroplastığın ise hepsi insan yapımı olan kaplamalar, boyalar, yapıştırıcılar, sıvalar, polimerler ve kozmetikler ve kişisel bakım ürünlerinde kullanılan pigmentler olarak belirlenmiştir. Plasentanın fetüsün gelişimini desteklemedeki kritik rolü nedeniyle, potansiyel olarak zararlı (plastik) parçacıkların varlığı büyük bir endişe konusu olduğu vurgulanmıştır.

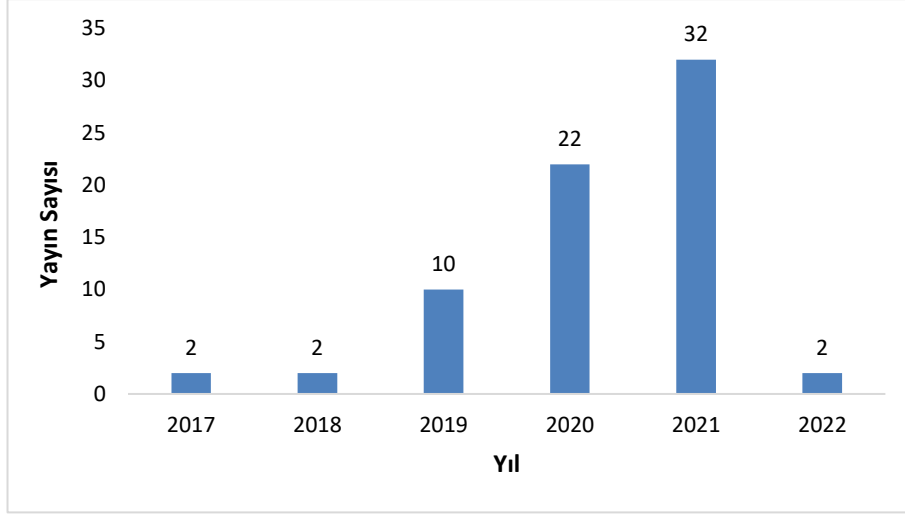
Farklı organizmalar üzerinde yapılmış çalışmalar, mikroplastiklere maruz kalmanın insan sağlığı üzerindeki olası etkileri hakkında temel veri sağlamaktadır (Jin ve diğ. 2019). Ancak insan sağlığı üzerindeki etkiyi değerlendirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Mikroplastiklerin insan sağlığı üzerine etkileri hakkındaki bilgiler etik kısıtlamalar, insan örneklerini işlemek için sıkı biyolojik güvenlik önlemleri ve tespit tekniklerindeki zorluklar nedeniyle sınırlıdır (Prata ve diğ. 2019).

3. ATIKSU ARITMA TESİSİ KAYNAKLI MİKROPLASTİK KİRLİLİĞİ

Milyonlarca mikroplastik içeren ham atıksular, kanalizasyon sistemleri ile toplanarak atıksu arıtma tesislerine ulaşmaktadır (Sol ve diğ. 2020). Mikroplastiklerin, büyük ölçekli evsel/kentsel atıksu arıtma tesislerinde %90'ın üzerindeki yüksek verimlerle giderilmesine rağmen, arıtılmış atıksularla alıcı ortama çok ciddi boyutlara varan konsantrasyonlarda mikroplastik deşarj edildiği bilinmektedir (Ziajahromi ve diğ. 2021). Ayrıca, yüksek giderim verimleri ile atıksudan giderilen mikroplastikler arıtma çamurlarında birikmekte ve gerek çamurların arazide kullanımı gerekse düzenli depolanması yolu ile karasal ortamlara dağılmaktadır (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021). Bu nedenle, atıksu arıtma tesisleri hem sucul hem de karasal çevre için potansiyel mikroplastik kaynağı olarak kabul edilmektedir (Talvitie ve diğ. 2017). Dolayısıyla, literatürde mikroplastiklerin atıksu ve arıtma çamurlarındaki varlığı, atıksu arıtma tesislerindeki akıbeti son yıllarda oldukça dikkat çeken konular arasında yer almıştır. Şekil 3.1'de Web of Science veritabanında taranan ve başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “atıksu” bulunan, Şekil 3.2'de ise Web of Science veritabanında taranan ve başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “çamur” bulunan araştırma ve derleme yayın sayıları gösterilmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 atıksu ve arıtma çamurlarında mikroplastiklerin araştırılması konusunda yapılan yayın sayılarının artış eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1: Yayın başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “atıksu” anahtar kelimeleri bulunan araştırma ve derleme yayın sayıları (Web of Science)



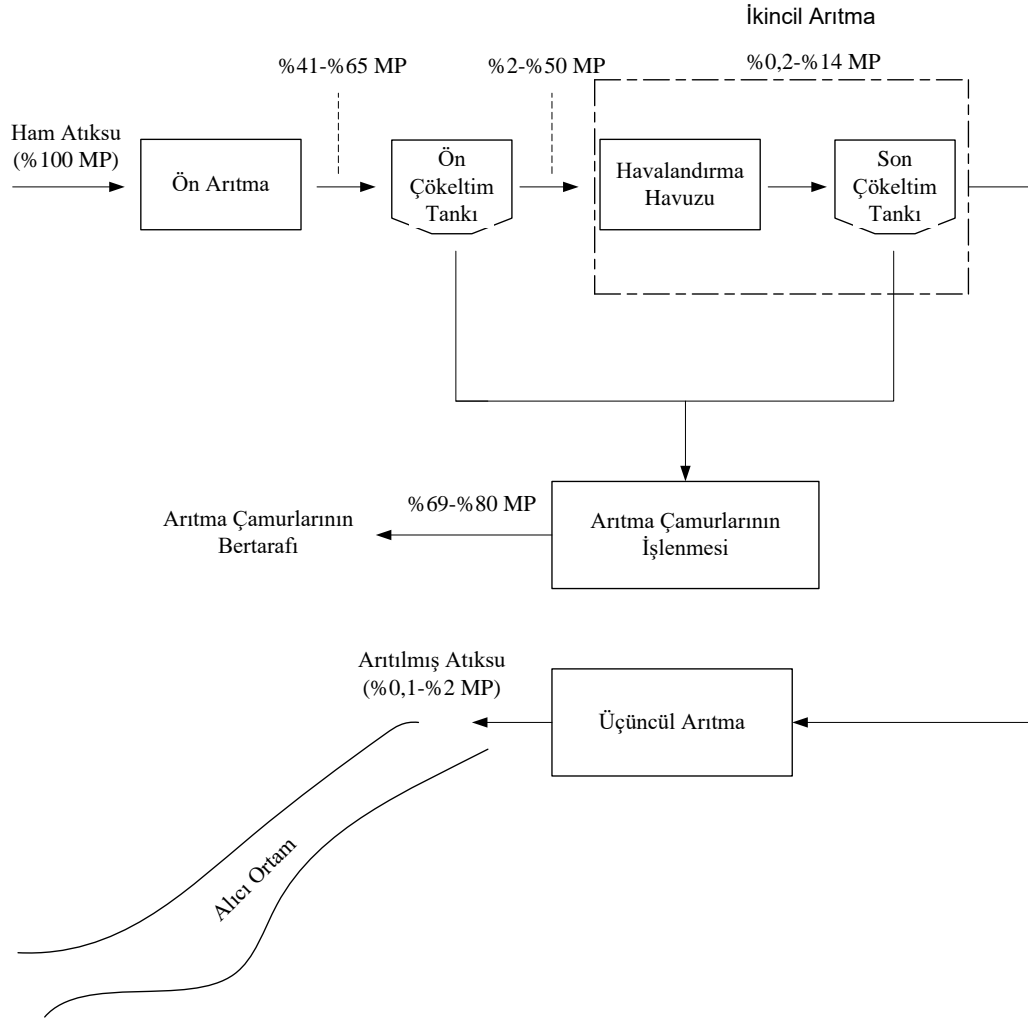
Şekil 3.2: Yayın başlıklarında “mikroplastikler veya mikroplastik” ve “çamur” anahtar kelimeleri bulunan araştırma ve derleme yayın sayıları (Web of Science)

Evsel/Kentsel atıksu arıtma tesisleri, birincil arıtma, ikincil arıtma ve üçüncül arıtma üniteleri olmak üzere farklı arıtma kademelerinden oluşmaktadır (Sol ve diğ. 2021). Birincil arıtma kademelerinde (kaba ve ince ızgaralar, kum tutucular ve ön çökeltim havuzları), biyolojik arıtma öncesinde suda yüzen ve çökelebilen büyük iri parçacıkların uzaklaştırılması amacıyla kullanılmaktadır (Bakaraki Turan ve diğ. 2021). Literatürde yapılmış çalışmalarda genellikle birincil arıtma kademelerinde mikroplastiklerin yüksek oranda giderildiği görülmüştür. Örneğin, iki farklı atıksu arıtma tesisine ait ham atıksularda bulunan mikroplastiklerin %69-%79 ızgara ve kum tutucu ünitelerinde giderildiği hesaplanmıştır (Ziajahromi ve diğ. 2021). Farklı bir çalışmada kum tutucu ve ön çökeltim tanklarında, sıyırma ve çökeltme yoluyla yüksek oranda (%56,8-%64,4) mikroplastik giderimi gerçekleştirdiği rapor edilmiştir (Hidayaturrahman ve Lee, 2019b). Atıksu arıtma tesislerinde kullanılan tüm arıtma üniteleri özel olarak mikroplastik giderimine yönelik olarak tasarlanmamış olmasına rağmen, özellikle birincil arıtma ünitelerinde yüksek oranda mikroplastik giderimi sağlanmaktadır.

Birincil arıtmadan çıkan sular, atıksulardaki organik madde yükünün giderilmesi amacıyla, genellikle aerobik sistemlerin kullanıldığı ikincil arıtma kademesine geçmektedir (Bakaraki Turan ve diğ. 2021). Mikroplastiklerin ikincil arıtma kademelerinde %7-%20 oranında giderimi sağlanmaktadır (Blair ve diğ. 2019). İskoçya’da bulunan bir atıksu arıtma tesisinin toplam mikroplastik giderim verimi %98,4 olarak hesaplanmıştır. Arıtma tesisinde bulunan tüm kademelerdeki giderim

verimleri hesaplandığında ise, kum tutucuda en yüksek oranda (%44,59) mikroplastik giderimi sağlanmıştır. Ön çökeltim çıkışında mikroplastikler %33,75 oranında giderilirken, ikincil arıtma çıkışında ise bu oran %20,07 olarak bulunmuştur.

Bazı atıksu arıtma tesislerinde yasal gereklilikler ve suyun tekrar kullanılması gibi durumlarda üçüncül arıtma üniteleri de kullanılmaktadır (Sol ve diğ. 2021). Bu amaçla UV, O₃, klorlama, biyolojik aktif filtrasyon (BAFs), disk filtreler (DFs), membran biyoreaktör (MBR) ve hızlı kum filtreleri (RSFs) gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır (Hamidian ve diğ. 2021). Üçüncül arıtma ile arıtılmış atıksuda, ham atıksudaki mikroplastik konsantrasyonunun %0,2 ile %2'si oranında mikroplastik tespit edildiği rapor edilmiştir (Sun ve diğ. 2019). İngiltere'de yayınlanan bir çalışmanın sonuçlarına göre, birincil arıtma, ikincil arıtma ve üçüncül arıtma ünitelerinde toplam mikroplastik konsantrasyonları sırasıyla %68, %92 ve %96 oranında giderildiği tespit edilmiştir (Blair ve diğ. 2019). Kullanılan farklı teknolojiler arasından, mikroplastik gideriminde en etkili olan prosesler filtrasyon bazlı teknolojiler olup (Liu ve diğ. 2021), MBR sistemleri %99'un üzerinde mikroplastik giderme verimi sağlamaktadır (Bayo ve diğ. 2016; Lv ve diğ. 2019; Michielssen ve diğ. 2016; Talvitie ve diğ. 2017). Şekil 3.3'te, atıksu arıtma tesislerinde bulunan her bir ünitedeki mikroplastik giderim verimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Atıksu arıtma tesislerindeki ünitelerde mikroplastik giderim verimleri (Sun ve diğ. 2019)

Atıksu arıtma tesisleri, arıtma işlemleri sonucunda günlük olarak tonlarca arıtma çamuru üretmektedir (Mahon ve diğ. 2017). Arıtma çamurları, bertaraf edilmeden veya yeniden kullanılmadan önce hacmin azaltılması, patojenlerin yok edilmesi ve ekolojik olarak kabul edilebilir hale getirilmesi gerekmekte olup üç temel aşamadan (yoğunlaştırma, stabilizasyon ve susuzlaştırma) geçirilmektedir (Enfrin ve diğ. 2019). Yüksek verimlerle atıksulardan giderilen mikroplastikler arıtma çamurlarında birikmektedir (Sun ve diğ. 2019). Arıtma çamurlarının, ham atıksulara göre çok daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içerdiği bilinmektedir (B. Zhang ve diğ. 2020). Konu ile ilgili sınırlı sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, farklı çamur işleme ünitelerinin, mikroplastiklerin morfolojisini ve konsantrasyonlarını etkilediği bilinmektedir (Gatidou ve diğ. 2019). Örneğin, kireç

stabilizasyonu mikroplastiklerin boyutlarının küçülmesine neden olurken, anaerobik çürütme mikroplastik konsantrasyonlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Termal kurutma ise mikroplastiklerin yüzey deformasyonuna ve erimesine neden olmaktadır (Mahon ve diğ. 2017).

Diğer yandan arıtma çamurlarındaki mikroplastik içeriğinin, anaerobik çürütücülerin çalışma performansını etkilediğini gösteren çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır (He ve diğ. 2021). Laboratuvar ölçekli çalışmalarda, mikroplastiklerin doğrudan ilavesi ile, anaerobik mikroorganizmalar için sito-toksisiteye neden olarak atık aktif çamurun anaerobik parçalanmasını inhibe ettiği gözlemlenmiştir (Wei ve diğ. 2019). PS nanoplastiklerin, anaerobik çürütme sistemlerinde (ortalama boyutu 54.8 nm) etkileri araştırılmıştır. PS nanoplastiklerin, anaerobik çürüme sırasında mikroorganizmaların hücre zarına tutunarak büyüme metabolizmalarını etkilediği ve dolayısıyla metan üretiminin azaldığını göstermiştir (Fu ve diğ. 2018). Mikroplastiklerin konsantrasyon, şekil, boyut ve polimer türleri gibi faktörlerin yanı sıra, mikroplastiklerden salınan kimyasal katkı maddelerinin de anaerobik çürütücüler üzerinde etkileri gözlemlenmiştir. PVC mikroplastiklerinin atık aktif çamurun anaerobik çürümesi üzerine etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, 20, 40 ve 60 MP/g KM gibi yüksek konsantrasyonlardaki mikroplastiklerin kontrol reaktörüne göre, sırasıyla %90,6±0,3, %80,5±0,1 ve %75,8±0,2 oranında metan üretimini inhibe ettiği gözlemlenmiştir. PVC mikroplastiklerinden salınan Bisfenol-A (BPA) kimyasalının hidroliz-asidifikasyon proseslerine etki ederek metan üretimini inhibe ettiği sonucuna varmışlardır (Wei ve diğ. 2019). Ayrıca sınırlı sayıda bulunan çalışmalarda mikroplastiklerin, arıtma çamurlarının bertarafında önemli bir konu olan çamur karakteristikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çin'de gerçekleştirilen bir çalışmada, farklı polimer türlerinin (PS, PE ve PVC) ve boyutlarının (213,7 nm ~ 4,2 mm) arıtma çamurlarının su verme özelliklerine etkisi analiz edilmiştir (J. Xu ve diğ. 2021). 60 günlük laboratuvar ölçekli aerobik çürüme süreci sonucunda, arıtma çamurlarının su verme özelliklerine polimer boyutları, polimer türlerinden daha yüksek oranda etki etmiştir. Boyutları yaklaşık 4 mm olan mikroplastikler, fiziksel mekanizmalarla (çamur floklarının yapısını bozarak) çamurun su verme özelliklerini %29,6~%47,7 oranında azaltmıştır. Nanometre boyutundaki plastikler de benzer şekilde çamurun su verme özelliğini azaltmıştır fakat buradaki mekanizma biyolojik toksisite (mikrobiyal aktivite inhibisyonu) nedeniyle kompozisyonu ve dağılımı değişen hücre dışı

polimerik maddeler (EPS) olarak açıklanmıştır. Benzer şekilde düşük konsantrasyonlardaki (0,1 g/L) PS nanoplastikler, endojen solunumu inhibe ederek, bakterilerde sitotoksik etkiye yol açarken, çamurdaki kütle transferine de etki etmektedir. Çamur yüzeyindeki ve EPS'deki zeta potansiyeli değişimleri nedeniyle floklaşma düşük oranda görülmüştür. PS nanoplastiklerin konsantrasyonu 5 g/L'ye çıkarıldığında ise, çamurun çökebilirliğinin %50 oranında azaldığı belirlenmiştir (Li ve diğ. 2020).

Mikroplastiklerin atıksu arıtma tesislerindeki akıbetinin net olarak ortaya konabilmesi için, öncelikle tanısının yapılması ve miktarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu amaçla, mikroplastik tespitine yönelik çalışmalarda ilk adım örneklemedir. Örneklerin bir dizi ön işlemden geçirilmesi suretiyle mikroplastikler buldukları ortamdan izole edilmektedir. Son aşamada ise izole edilen mikroplastikler, görsel ve/veya kimyasal yöntemlerde analiz edilmektedir. Bu aşamalar aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak verilmekle birlikte, literatürde yapılmış çalışmalar arasında standart örnekleme, izolasyon ve analiz yöntemi henüz bulunmamaktadır.

3.1 Örnekleme Yöntemleri

Mikroplastiklerin tespitinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için, öncelikle alınan numunelerin bütünü temsil etmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde atıksuların, kompozit (Alavian Petroody ve diğ. 2021; Ruffell ve diğ. 2021; Talvitie ve diğ. 2017) veya anlık (Tagg ve diğ. 2015; Ziajahromi ve diğ. 2021) olarak örneklendiği görülmektedir. Kompozit numune alma yöntemi ile, genellikle 24 saat boyunca 1 veya 2 saat aralıklarla aynı hacimde atıksu örneklenebilir. Bu nedenle, atıksu numunelerindeki gün içinde meydana gelen mikroplastik konsantrasyonları daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Bakaraki Turan ve diğ. 2021). Anlık numune, tek bir zamanda tek bir noktadan alınmakta olup, atıksu karakteristiğindeki günlük değişiklikler tolere edilememektedir (Alavian Petroody ve diğ. 2021). Fakat her iki numune alma yönteminde de yalnızca birkaç litre atıksu örneği alınabilmektedir (Hamidian ve diğ. 2021). Diğer taraftan, pompa ve filtrasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen yerinde numune alma yöntemleri ile atıksu

hacmi yüzlerce litreye kadar çıkabilmektedir (Carr ve diğ. 2016; Mintenig ve diğ. 2017; Talvitie ve diğ. 2015). Ziajahromi ve diğ. (2017) bir örnekleme cihazı geliştirmişlerdir. Cihaz, dört farklı boyuttaki (500, 190, 100 ve 25 µm) çıkarılabilir paslanmaz çelik elekten meydana gelmektedir. Bu sayede, atıksu kirlilik durumuna göre, istenilen hacimde suyun örneklenmesi mümkün olmaktadır.

Arıtma çamuru numuneleri ise yaygın olarak doğrudan cam veya plastik numune alma kaplarına alınmaktadır. Arıtma çamurları yüksek oranda organik madde, mikroorganizma ve inorganik madde içermesi nedeniyle, atıksu numuneleri gibi kolaylıkla filtrelenmemektedir. Bu nedenle, yalnızca anlık olarak belirli miktarda çamur cam (Bayo ve diğ. 2016) veya plastik (van den Berg ve diğ. 2020) numune alma kaplarına aktararak örnekleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Çamur numunelerinin anlık olarak toplanması kolay bir işlem olmakla birlikte, günlük atıksu karakteristiklerinden etkilenebilmesi nedeniyle çamur numunelerindeki mikroplastik konsantrasyonlarının farklı zaman dilimlerinde izlenmesi faydalı olabilmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021).

3.2 Mikroplastik İzolasyon Yöntemleri

Mikroplastiklerin başlangıç matrisinden ayrılması için, atıksu ve arıtma çamuru numuneleri genellikle eleme, parçalama, yoğunluk farkı ile ayırma ve filtrasyon olmak üzere genellikle bu yöntemlerin kombinasyonu kullanılmaktadır (Rolsky ve diğ. 2020). Bununla birlikte, literatür araştırmalarında mikroplastiklerin başlangıç matrisinden ayrılması için standardize edilmiş bir ön işlem metoduna rastlanmamıştır. Özellikle atıksu ve arıtma çamurlarında bol miktarda bulunan organik maddeler, mikroplastiklere tutunarak görsel ve spektroskopik tespitini zorlaştıran en önemli faktördür (Okoffo ve diğ. 2019). Bugüne kadar yürütülmüş olan çalışmalar incelendiğinde, organik materyalin elimine edilmesi için enzimatik veya kimyasal oksidasyon prosesleri kullandığı görülmektedir. Enzimler yardımıyla organik maddelerin giderimine yönelik çalışmalarda genellikle proteaz, lipaz ve selülaz gibi enzimler kullanmakla birlikte organik maddelerin eliminasyonu 13 güne kadar sürebilmektedir (Mintenig ve diğ. 2017). Enzimatik oksidasyon proseslerinin aksine kimyasal oksidasyon prosesleri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla genel

olarak hidrojen peroksit (H_2O_2), Fenton reaktifleri ($H_2O_2+Fe(II)$), hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO_3) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanıldığı görülmüştür (Bakaraki Turan ve diğ. 2021). Ancak asidik ve alkali oksidasyon prosesleri ile kıyaslandığında, literatürde atıksu ve arıtma çamurlarından organik madde giderimi amacıyla sıklıkla H_2O_2 (Leslie ve diğ. 2017; Mahat, 2017; Mason ve diğ. 2016) ve Fenton reaktifleri (Dyachenko ve diğ. 2017; L. Zhang ve diğ. 2021) kullanılmaktadır. Oksidasyon proseslerinde temel amaç mikroplastiklerin tespitini zorlaştıran organik madde giderimi olsa da, kullanılan kimyasalların mikroplastiklere kütle, hacim, boyut ve gerekli ise renk açısından zarar vermemesi esastır (Pfeiffer ve Fischer, 2020). Asit ve alkali oksidasyon proseslerine bazı polimer türlerinin (PA ve PET) dayanıklı olmadığı gözlemlenmiştir (Gao ve diğ. 2020). H_2O_2 oksidanın ise yüksek oranda organik madde giderimi sağlarken, mikroplastikler üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir (Kang ve diğ. 2020). Hurley ve diğ. (2018) mikroplastiklerin kompleks katı matristen ekstraksiyonu sırasında organik maddeleri uzaklaştırmak için dört farklı prosedür (H_2O_2 ile oksidasyon, Fenton prosesi ve alkali ön işlem (NaOH ve KOH)) araştırmışlardır. Bu çalışma, NaOH'in çeşitli polimer tiplerinin yüzeylerinde bozunmaya sebep olduğunu ortaya koymuştur. Denenmiş dört farklı yöntemden, Fenton reaktifinin mikroplastik bütünlüğüne zarar vermemesi nedeniyle en uygun proses olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca kimyasal oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmak amacıyla, sıcaklık katalizörlerinin ($60-70^{\circ}C$) kullanımı literatürde sıklıkla görülmektedir (Hamidian ve diğ. 2021). Literatürde Fenton oksidasyonu kullanılan çalışmalarda genellikle numuneler $75^{\circ}C$ 'de 30 dakika süre ile reaksiyona tabii tutulmuştur (Franco ve diğ. 2020; Jiang ve diğ. 2020). Oksidasyon prosesin en önemli değişken parametreleri olan H_2O_2 konsantrasyonu ve reaksiyon süresiyle ilgili genellikle bir optimizasyon çalışmasının olmadığı görülmüştür. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda, H_2O_2 kurutulmuş veya orijinal örneklere herhangi bir doz optimizasyonu yapılmadan ilave edilerek hafta mertebesindeki uzun temas sürelerine maruz bırakıldığı kaydedilmiştir (Adomat ve Grischek, 2021; Gies ve diğ. 2018). Ayrıca, çalışmalarda genellikle organik maddenin giderim verimleri ölçülmemiş olup, H_2O_2 ile oksidasyonunda çözelti renginin kahverengiden sarı-şeffaf rengine dönüşmesi veya oksidasyon sırasında meydana gelen hava kabarcıklarının bitmesi organik maddenin gideriminde bir ölçü olarak kullanılmaktadır (Dyachenko ve diğ. 2017). Bu nedenle organik madde giderim verimi için optimum oksidasyon koşullarının belirlenmesi tavsiye edilmektedir (Okoffo ve diğ. 2019).

Literatürde, inorganik madde giderimi konusunda ise yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Atıksu ve arıtma çamuru numuneleri yüksek yoğunluklu çözeltilerle karıştırıldığında yoğunluğu çözeltiden hafif olan mikroplastikler yüzme eğilimi göstermektedir. Yüzeyde kalan mikroplastikler ise doğrudan filtrasyon veya santrifüj yöntemi ile çözeltiden kolayca ayrılmaktadır. PTFE hariç ($2,20 \text{ g/cm}^3$) ham plastiklerin yoğunluğu $0,90-1,6 \text{ g/cm}^3$ arasında değişmektedir. NaCl tuzu ucuz ve çevre dostu bir tuz olması nedeniyle yoğunluk farkına dayalı ayırma proseslerinde en çok kullanılan kimyasaldır fakat yoğunluk değeri ($1,2 \text{ g/cm}^3$) tüm polimer türlerini ayırmak için düşüktür. Bu nedenle, etkili bir yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemi gerçekleştirmek için daha yüksek yoğunluklu çözeltiler (NaI: $1,8 \text{ g/cm}^3$, ZnCl_2 : $1,5-1,7 \text{ g/cm}^3$, sodyum politungstat: $1,4-1,5 \text{ g/cm}^3$) kullanılması gerekmektedir. Fakat bu kimyasalların maliyeti ve çevreye zararlarının yanı sıra, çözeltiden yoğun olan mikroplastiklerin dibine çökerek hatalı sonuçlara sebebiyet vermesi söz konusudur (Bretas Alvim ve diğ. 2020; Lares ve diğ. 2018).

Filtrasyon ise genellikle mikroplastik izolasyonunda son adımdır. Yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemi ile yüzeyde kalan mikroplastikler, uygun gözenek çapına ve boyutlarına sahip membran filtreler kullanılarak sıvı ortamdan ayrılmaktadır (Bakaraki Turan ve diğ. 2021).

3.3 Metot Validasyonu ve Kontaminasyon Kontrolü

Çevresel numunelerde mikroplastik analizi gerçekleştirilmeden önce, mikroplastik izolasyon yönteminin etkinliğinin ölçülmesi gereklidir. Numune alma sırasında, laboratuvarında mikroplastiklerin izolasyonu ve analizi çalışmaları sırasında kayıp veya kontaminasyon nedeniyle mikroplastik konsantrasyonlarında hatalara yol açmaktadır (Gies ve diğ. 2018). Bu nedenle, mikroplastik geri kazanım testlerinin uygulanması ve kontaminasyon kontrolü yapılması mikroplastik konsantrasyonu tespitinde hatalı sonuçların minimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Mikroplastik geri kazanım testi kullanılan izolasyon yönteminin etkinliğinin oransal bir ifadesi olup, bu amaçla, gerçek çevresel örneklerde karşılaşılan çeşitli mikroplastik standartları kullanılmaktadır. Mikroplastik geri kazanımı yapılan çalışmalarda, mikroplastik standartlarının genellikle büyük plastiklerden çeşitli fiziksel yöntemlerle öğütülerek

(Mahat, 2017), kişisel bakım ürünlerinden ekstrakte edilerek (Raju ve diğ. 2020) veya bazı firmalardan satın alınarak (G. Xu ve diğ. 2021) elde edildiği görülmektedir. Mikroplastik geri kazanım oranının hesaplanmasında, belirli boyut, şekil ve renklere sahip olan, sayısı ve/veya kütlesi bilinen mikroplastik standartları atıksu/arıtma çamuru numunelerine ilave edilerek izolasyon yöntemi uygulanır. İzolasyon sonucunda, geri kazanım oranı aşağıdaki denklem (3.1) yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$E (\%) = \frac{MP_{Belirlenen}}{MP_{Eklenen}} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada;

E= Sayısal/kütlesel olarak mikroplastik geri kazanım oranı

MP_{Eklenen}= Numuneye eklenen mikroplastik sayısı/kütlesi

MP_{Belirlenen}= İzolasyon işlemleri sonrasında numunede belirlenen mikroplastik sayısı/kütlesi

Bir izolasyon prosedürünün başarılı kabul edilebilmesi için, farklı polimer türleri ve boyutlarında bile yüksek geri kazanım oranlarının elde edilmesinin yanı sıra tekrarlanabilir ve kolay uygulanabilir olması önemlidir (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021). Öte yandan genel olarak yapılan çalışmalarda geri kazanım oranı belirlenirken, bir veya iki farklı polimer türü ve şekli kullanılmaktadır. Bu durumda, çevresel numunelerde bulunabilecek farklı tür ve şekillerdeki mikroplastikleri temsil edecek bir izolasyon yöntemi olarak görülmemektedir (Lares ve diğ. 2019). Sujathan ve diğ. (2017) kişisel bakım ürünlerinden ekstrakte ettikleri mikroplastik standartları ile aktif çamur numunesinde mikroplastik geri kazanım oranını %78±8 olarak belirlemişlerdir. Way ve diğ. (2022) derleme makale kapsamında farklı çevresel numunelerde tespit edilen mikroplastik çalışmalarında gerçekleştirilen geri kazanım oranlarını irdemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, atıksu ve arıtma çamuru ile ilgili yapılmış çalışmalarda geri kazanım oranları %76-%89 arasında değiştiği görülmüştür.

Mikroplastik analizi çalışmalarında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus laboratuvar kaynaklı kontaminasyonun önlenmesidir. Bu amaçla, pamuklu laboratuvar önlüklerinin kullanılması, çeker ocak altında izolasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi, tüm çalışma alanlarının ve kullanılan ekipmanların etanol gibi kimyasallarla temizlenmesi başta olmak üzere, literatürde çeşitli kontaminasyon önleyici yöntemler

uygulanmaktadır (Lv ve diğ. 2019; Mahon ve diğ. 2017; Mason ve diğ. 2016; Mintenig ve diğ. 2017; Murphy ve diğ. 2016).

3.4 Mikroplastik Karakterizasyonu

Mikroplastik analizleri genellikle fiziksel ve kimyasal karakterizasyon olmak üzere iki ana başlıkta incelenmektedir (Hamidian ve diğ. 2021). Fiziksel analiz yönteminde, mikroplastiklerin boyut, renk ve şekil gibi özellikleri çeşitli mikroskoplar yardımıyla kategorize edilmektedir (Bretas Alvim ve diğ. 2020a). Bu analiz yöntemi, mikroplastikleri diğer maddelerden (organik madde, metal, cam vd.) görsel yolla ayrılması için genellikle tüm çalışmalarda zorunlu bir adım olarak kullanılmaktadır (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021). Çalışmalarda kullanılan mikroskop türleri arasında, ışık mikroskobundan daha yüksek çözünürlüğe sahip olması nedeniyle stereo mikroskop yaygın olarak kullanılmaktadır (G. M. Priyanka ve Udayashankara, 2018). Hidalgo-Ruz ve diğ. (2012), mikroskobik analiz sırasında mikroplastiklerin yanlış tanımlanmasını ve/veya eksik tahmin edilmesini önlemek için plastikleri plastik olmayan maddelerle ayırt etmek için bazı kurallar önermişlerdir. Bu kurallar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

- i. Nesne hücresel veya organik yapıya sahip olmamalıdır.
- ii. Lifler tüm uzunluk boyunca aynı kalınlığa sahip olmalıdır.
- iii. Parçacıkların rengi baştan sona homojen olmalıdır.

Mikroskop altında analiz edilen numuneler genellikle bir filtre üzerinde veya petri kabına alınarak analiz edilmektedir (Hamidian ve diğ. 2021). Bu yöntem, mikroplastikleri tanımlamada basit ve ucuz olması gibi avantajlarına rağmen, analiz süresi oldukça uzun olup analiz yapan kişiye bağlı olarak değişebilen subjektif sonuçlara yol açmaktadır (Bakaraki Turan ve diğ. 2021). Literatürdeki bazı çalışmalarda hatalı mikroplastik tanımlamalarını minimize etmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, yüksek sıcaklıkta ısıtılmış bir metal (iğne) yardımıyla şüpheli parçacığın erime karakteristikleri karar vermede faydalı bir yöntem olarak görülmektedir (Karlsson ve diğ. 2017). Diğer bir yaklaşım ise, Rose-Bengal solüsyonu yardımıyla, numunede bulunan doğal parçacıklar pembe renge boyanarak plastik olanlardan ayrılması mümkün hale gelmektedir (Ziajahromi ve diğ. 2017). Literatürde

yapılmış çalışmalarda, mikroskop altında analiz edilen mikroplastiklerin belirli kurallar çerçevesinde değerlendirilmesi ve yukarıda bahsedildiği üzere ek teknikler uygulanmasına rağmen, hata oranları %20-%70 arasında değiştiği belirtilmiştir (Bretas Alvim ve diğ. 2020; Shim ve diğ. 2017). Bu durumun sebebi olarak ise doğal ve sentetik malzemelerin görüntülerinin birbirine benzemesi olarak gösterilmektedir. Örneğin Mintenig ve diğ. (2017) arıtılmış atıksularda görsel olarak analiz ettikleri liflerin %50'si sentetik polimer yapıya sahip olduğunu bildirmişlerdir. Mikroskobik inceleme ile mikroplastik konsantrasyonları hakkında kaba sonuçlar elde edildiğinden, genellikle ek analiz tekniklerinin kullanılması önerilmektedir (Tagg ve diğ. 2015). Mikroskop yardımıyla analiz edilen şüpheli parçacıkların ön seçiminden sonra genellikle spektroskopik teknikler kullanılarak polimerlerin kimyasal kompozisyonu tespit edilmektedir (Gatidou ve diğ. 2019). Güncel olarak kullanılan çeşitli kimyasal analiz yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler spektroskopik (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi; FTIR ve Raman) ve termal analiz yöntemleri (Piroliz-gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi; Py-GC-MS, termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz; TGA-DSC ve termal desorpsiyon-gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi; TD-GC-MS) olarak iki grupta incelenmektedir (Dümichen ve diğ. 2017; Franco ve diğ. 2020; Funck ve diğ. 2021; Klein ve Fischer, 2019; Majewsky ve diğ. 2016). Bu farklı analitik yöntemler arasında literatürde en sık kullanılan yöntemler spektroskopik tekniklerdir (Sun ve diğ. 2019). FTIR spektroskopisi kullanılarak karbon bazlı polimerlere ait farklı bağ kompozisyonları, plastikleri diğer organik ve inorganik parçacıklardan ayıran benzersiz spektrumlar üretmektedir (Shim ve diğ. 2017). FTIR spektroskopisi, mikroplastiklere (>10 µm) ait spektrumların bilinen plastiklerin spektrumları ile eşleştirilmesi ile polimer türü hızlı ve doğrudan tanımlanabilmektedir (Silva ve diğ. 2018). Mikroplastiklerin tanımlanmasında kullanılan analitik yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 3.1'de özetlenmektedir.

Tablo 3.1: Mikroplastik analiz yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları (Shim ve diğ. 2017)

Analiz Yöntemi	Avantaj	Dezavantaj
Mikroskobik Analiz	<ul style="list-style-type: none">- Kolay ve ucuzdur.	<ul style="list-style-type: none">- Zaman alıcıdır.- Analiz yapan kişiye bağlı değişkenlik gösterebilir.- Fazla/eksik tahmin etmeye yol açabilir.- Kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi vermez.
FTIR Spektroskopisi	<ul style="list-style-type: none">- Mikroplastiklere zarar vermez.- Hızlı ve güvenilir veri sağlar.- 20 µm boyutlarına kadar analiz edilebilir.- Kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi verir.	<ul style="list-style-type: none">- Pahalıdır.- Eğitimli uzman personel gereksinimi vardır.
Raman Spektroskopisi	<ul style="list-style-type: none">- Mikroplastiklere zarar vermez.- Daha küçük boyutlarda (1-20 µm) kullanılabilir.- Hızlı kimyasal haritalandırma yapar.	<ul style="list-style-type: none">- Pahalıdır.- Eğitimli uzman personel gereksinimi vardır.
Piroliz-gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (Py-GC-MS)	<ul style="list-style-type: none">- Hızlı tanımlama yapar.- Kimyasal kompozisyonu ve plastik katkı maddeleri tespit edilebilir.	<ul style="list-style-type: none">- Pahalıdır.- Mikroplastiklere zarar verir.- Tekrar edilebilir değildir.

4. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde atıksu ve arıtma çamurlarında mikroplastiklerin tespiti üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar özetlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda tespit edilen mikroplastikler konsantrasyon, renk, şekil ve polimer türü açısından irdelenmiştir.

4.1 Atıksularda mikroplastikler

Tablo 4.1’de atıksu numunelerinde mikroplastiklerin tespiti üzerine farklı ülkelerde yayınlanan çalışmalar arıtma teknolojileri, atıksuların tipi (evsel, endüstriyel veya kentsel) ve analiz teknikleri özetlenmektedir. Atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik giderim verimlerinin yanı sıra, analiz edilen mikroplastik konsantrasyonları, şekil, renk ve polimer türleri açısından irdelenmiştir.

Tablo 4.1’de özetlenen çalışmalarda, mikroplastik analizinde kullanılan teknikler incelendiğinde, genellikle mikroskop yardımıyla görsel analiz yapılmakta olduğu ve ek olarak mikroplastiklerin polimer türünün tespiti için FTIR veya Raman spektroskopisinin kullanıldığı görülmektedir (Bilgin vd., 2020; Gies vd., 2018; Gündoğdu vd., 2018; Kittipongvises vd., 2022; Lares vd., 2018; Magni vd., 2019; Ziajahromi vd., 2021).

Mikroplastik konsantrasyonları ham (giriş) ve arıtılmış atıksularda (çıkış) açısından değerlendirildiğinde, çalışmalar arasında oldukça büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Ham atıksularda gözlemlenen konsantrasyonlar $2,5 \pm 0,3$ ile 127000 MP/L aralığında değişirken, arıtılmış atıksularda, 0-5800 MP/L aralığında değişmektedir (Kittipongvises vd., 2022; Magni vd., 2019; Vollertsen ve Hansen, 2017). Mikroplastik konsantrasyonlarındaki farklılıklar, atıksu arıtma tesislerinin hizmet verdiği nüfus, atıksu tipi ve karakteristiği ve insanların günlük yaşamdaki alışkanlıkları başta olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır (W. Liu vd., 2021). Ayrıca, numune alma, izolasyon ve analiz tekniklerinde standart bir yöntem olmaması nedeniyle, mikroplastik konsantrasyonlarında farklılıklar meydana gelmektedir. Diğer önemli husus ise, çalışmalarda analiz edilen mikroplastik boyutlarının konsantrasyonlar üzerindeki etkisidir. İncelenen çalışmalarda kullanılan elek boyutları

oldukça farklılık göstermektedir. Bu durum, çalışmalardan elde edilen mikroplastik konsantrasyonlarının kıyaslanmasını zorlaştırmaktadır.

Ham ve arıtılmış atıksularda mikroplastik konsantrasyonları belirlendikten sonra, atıksu arıtma tesisinin mikroplastik giderme verimi hesaplanabilmektedir. Tablo 4.1’de incelenen çalışmalar arasında yalnız üç çalışmada mikroplastik giderme verimleri belirtilmemiştir (Kittipongvises vd., 2022; Talvitie vd., 2015; Vollertsen ve Hansen, 2017). Geri kalan tüm çalışmalarda mikroplastik giderme verimleri belirtilmiş olup %73-%99,2 arasında değişen değerler elde edilmiştir. Atıksu arıtma tesisleri, son yıllarda önemli bir kirlilik olarak görülen mikroplastiklerin giderimine yönelik tasarlanmamış olmalarına rağmen, mevcut arıtma kademeleri yüksek giderme verimleri ile mikroplastikleri atıksulardan uzaklaştırmaktadır (Talvitie, Mikola, Koistinen, vd., 2017).

Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu

Ülke	Arıtma Tipi / Atıksu Tipi	Elek Boyutu	Analiz Tekniği	Tespit Edilen Mikroplastiklerin					
				Konsantrasyonu (MP/L)		Giderim Verimi (%)	Rengi	Şekli	Polimer Türü
				Giriş	Çıkış				
Tayland (Kittipongvises vd., 2022)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	0,3-5,0 mm	Mikroskop, FTIR spektroskopisi	Yağışlı mevsim; 76-192 Kurak mevsim: 36-68	Yağışlı mevsim; 0-6 Kurak mevsim: 0-2	-	Beyaz, siyah, kahverengi, sarı, mavi	Parça, film, lif, diğer	PES, PE, Modifiye Selüloz, PP, PA, Poliakrilat, PET, PS, Diğer
Finlandiya (Salmi vd., 2021)	Üçüncül arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	20, 100, 300 µm	Stereo- mikroskop, Raman spektroskopisi	61	0,8	%99	-	Parça, lif	PP, PE, PET, Diğer
Avustralya (Ziajahromi vd., 2021)	3 farklı AAT / İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	500, 190,100, 25 µm	Diseksiyon mikroskobu, µ-FTIR	55-98	0,18-0,96	%92-%99	Siyah, mavi, şeffaf, beyaz	Mikroboncuk, parça, lif	PET, PE, PP, Naylon

Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu...(Devamı)

Ülke	Arıtma Tipi / Atıksu Tipi	Elek Boyutu	Analiz Tekniği	Tespit Edilen Mikroplastiklerin					
				Konsantrasyonu (MP/L)		Giderim Verimi (%)	Rengi	Şekli	Polimer Türü
				Giriş	Çıkış				
Çin (J. Jiang vd., 2020)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	3–5mm, 1-3 mm, 0,5-1 mm, 0,1–0,5 mm, 0,02–0,1 mm	Stereo- mikroskop, Raman spektroskopisi	126,0 ± 14,0	30,6 ± 7,8	%75,7	Şeffaf, gri, beyaz, siyah, mavi, kırmızı, yeşil, sarı	Lif, parça, film, köpük, pelet	PES, PA, PE, PET, PP, PS, Diğer
Türkiye (Bilgin vd., 2020)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	<50 µm, 50-330 µm, 330 – 1000 µm, 1-5 mm	Işık mikroskobu, FTIR spektroskopisi	30,7	6,3	%79	-	Lif, film, parça	PP, PE, PA, PET, PVC, PES, Diğer
İtalya (Magni vd., 2019)	Üçüncül arıtma / Evsel nitelikli atıksu	5–1mm, 1–0,5 mm, 0,5–0,1 mm, 0,1–0,01 mm	Stereo- mikroskop, FTIR spektroskopisi	2,5 ± 0,3	0,4 ± 0,1	%84	-	Lif, film, parça	Poliakrilat, PES, PA

Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu...(Devamı)

Ülke	Arıtma Tipi / Atıksu Tipi	Elek Boyutu	Analiz Tekniği	Tespit Edilen Mikroplastiklerin					
				Konsantrasyonu (MP/L)		Giderim Verimi (%)	Rengi	Şekli	Polimer Türü
				Giriş	Çıkış				
Güney Kore (Hidayaturrahman ve Lee, 2019a)	3 farklı AAT Üçüncül arıtma / Endüstriyel ve Kentsel nitelikli atıksu	-	Işık mikroskobu	4200-31400	33-297	%98,9- %99,2	-	Mikroboncuk, lif, film, parça	-
Danimarka (Simon vd., 2018)	10 farklı AAT / Evsel- Endüstriyel nitelikli atıksu	500 µm, 1 mm, 2 mm	FTIR mikroskobu	2223-10044 (7216)	19-447 (54)	%99,3	-	-	Akrilat, PP, PES, PE, PVC, PS, Diğer

Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu...(Devami)

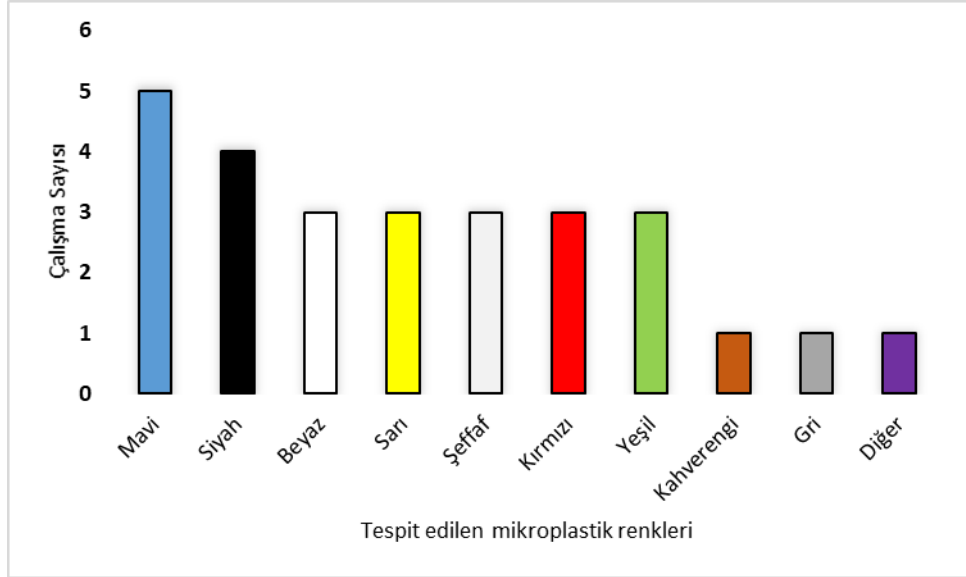
Ülke	Arıtma Tipi / Atıksu Tipi	Elek Boyutu	Analiz Tekniği	Tespit Edilen Mikroplastiklerin					
				Konsantrasyonu (MP/L)		Giderim	Rengi	Şekli	Polimer Türü
				Giriş	Çıkış	Verimi (%)			
Finlandiya (Lares vd., 2018)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	>5 mm 1–5mm, 0,5–1,0 mm, 0,25–0,5 mm, <0,25 mm	Stereo- mikroskop, FTIR ve/veya Raman spektroskopisi	57,6 ± 12,4	1,0 ± 0,4	%98,3	-	Lif, parça, küre	PES, PA, PE, Diğer
Türkiye (Gündoğdu vd., 2018)	İki farklı AAT İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	1–5mm, 0,5–1,0 mm, 0,1–0,5 mm, <0,1 mm	μ-Raman spektroskopisi	23,444 ± 4100- 26,555±3175 MP/m ³	2,040,639 ± 343,859-4,825,697 ± 575,630 MP/m ³	%73-%79	-	Lif, film, parça	PE, PET, PVC, ABS, POM, Naylon, PP
Kanada (Gies vd., 2018)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	63 μm	Stereo- mikroskop, FTIR spektroskopisi	31,1 ± 6,7	0,5 ± 0,2	%98,3	Mavi, yeşil, kırmızı, siyah, sarı	Lif, parça	PS, naylon, PES, PA, Modifiye selüloz

Tablo 4.1: Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu...(Devami)

Ülke	Arıtma Tipi / Atıksu Tipi	Elek Boyutu	Analiz Tekniği	Tespit Edilen Mikroplastiklerin					
				Konsantrasyonu (MP/L)		Giderim	Rengi	Şekli	Polimer Türü
				Giriş	Çıkış	Verimi (%)			
Danimarka (Vollertsen ve Hansen, 2017)	10 farklı AAT/ Kentsel nitelikli atıksu	20, 500 µm	FTIR mikroskobu	Ort: 127000	Ort: 5800	-	-	-	PE, Naylon, PP, PVC, Çinko stearat
İskoçya (Murphy vd., 2016)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	65 µm	Diseksiyon mikroskobu, FTIR spektroskopisi	15,70 ± 5,23	0,25 ± 0,04	%98,41	Kırmızı, mavi, yeşil, diğer	Parça, lif, film, mikroboncuk, köpük	Alkid, PS, PES, PU, akrilik, PA, PP, PE, PET
Finlandiya (Talvitie vd., 2015)	İkincil arıtma / Kentsel nitelikli atıksu	200, 100, 20 µm	Stereo- mikroskop	Lif: 180 Parça: 430	Lif: 4,9 ± 1,4 Parça: 8,6 ± 2,5	-	-	Lif, parça	-

ABS: Akrilonitril bütadien stiren, AAT: Atıksu arıtma tesisi, PA: Poliamid, PE: Polietilen, PES: Polyester, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PU: Poliüretan, POM: Polioksimetilen, PS: Polistiren, PVC: Polivinil klorür, µ-Raman: mikro-Raman, µ-FTIR; mikro-FTIR

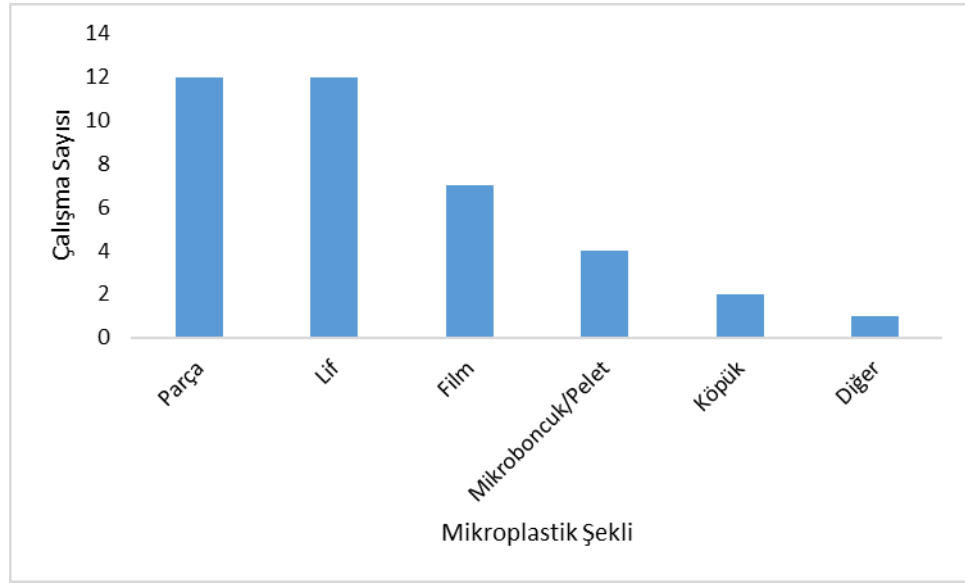
Yapılan çalışmalarda mikroplastikler, genellikle renk ve şekillerine göre mikroskopik analiz yöntemi ile kategorize edilmektedir. Mikroplastiklerin şekil ve renk gibi morfolojik özellikleri şüpheli parçacıkların görsel olarak mikroplastik olup olmadığı konusunda fikir vermesinin yanı sıra mikroplastiklerin kaynağının tahmin edilmesinde yardımcı olmaktadır (W. Wang vd., 2020). Tablo 4.1’de incelenen 14 çalışmanın sadece 5 tanesinde (Gies vd., 2018; J. Jiang vd., 2020; Kittipongvises vd., 2022; Murphy vd., 2016; Ziajahromi vd., 2021) mikroplastikler renklerine göre kategorize edilmiş olup, atıksuların çok çeşitli renklerde mikroplastik içerdiği görülmektedir. Çalışmalarda en çok tespit edilen renkler sırasıyla mavi, siyah, beyaz, sarı, şeffaf, kırmızı ve yeşil olduğu görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik renk kategorileri

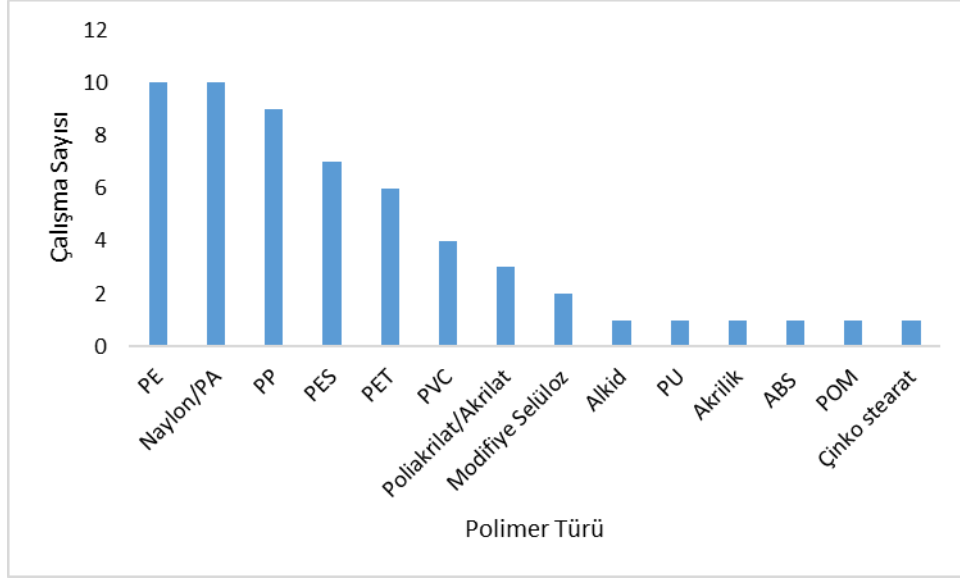
Şekil, mikroplastiklerin sınıflandırılması için kullanılan önemli bir göstergedir. Mikroplastiklerin şekli atıksu arıtma tesisindeki giderme verimini etkilemekle birlikte, atıksuda bulunan diğer kirleticiler ve mikroorganizmalar ile etkileşiminde de rol oynamaktadır (J. Sun vd., 2019). İncelenen çalışmalarda (Tablo 4.1) mikroplastikler genellikle şekillerine göre sınıflandırılmış olup yalnız iki çalışmada bu sınıflandırmaya yer verilmemiştir (Simon vd., 2018; Vollertsen ve Hansen, 2017). Geriye kalan çalışmaların hepsinde parça ve lif şeklinde mikroplastiklerin bulunduğu görülmüş olup, bu sonuç Şekil 4.2’de özetlenmiştir. Diğer sık rastlanan şekiller ise film ve mikrobuncuk/ pelet iken en az rastlanan ise köpük şekilli mikroplastikler olmuştur. Lif

şeklindeki mikroplastiklerin, sentetik tekstil ürünlerinin çamaşır makinesinde yıkanması ile kanalizasyona deşarj edildiği bilinmektedir (X. Zhang vd., 2020). Parça şeklindeki mikroplastiklerin günlük yaşamda kullanılan büyük plastiklerin aşınmasıyla meydana gelmekte, film ve köpük şeklindeki mikroplastikler ise çoğunlukla ambalaj ürünlerinden kaynaklanmaktadır (J. Sun vd., 2019). Mikroboncuk/peletler ise çoğunlukla kişisel bakım ürünleri kaynaklıdır (Carr vd., 2016).



Şekil 4.2: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik şekilleri

Mikroplastiklerin polimer türleri, incelenen çalışmalarda (Tablo 4.1) genellikle FTIR ve Raman spektroskopisi gibi tekniklerle analiz edilmiş olup, yalnız üç çalışmada bu analiz gerçekleştirilmemiştir (Hidayaturrahman ve Lee, 2019a; Talvitie vd., 2015; Vollertsen ve Hansen, 2017). Mikroplastiklerin polimer türlerinin belirlendiği diğer çalışmalarda ise atıksu numunelerinde 14 farklı polimer türü analiz edilmiştir (Şekil 4.3). En sık rastlanan polimer türleri sırasıyla PE, Naylon/PA, PP, PES, PET, PVC ve Poliakrilat/Akrilat şeklindedir. Diğer polimer türlerine (modifiye selüloz, alkid, PU, akrilik, ABS, POM ve çinko stearat) ise az sayıda çalışmada rastlanmıştır. PES, PET ve PA, sentetik giysilerde yaygın olarak kullanılırken, PE, kişisel bakım ürünlerinin yanı sıra gıda ambalaj filmleri ve su şişeleri dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılmaktadır (J. Sun vd., 2019).



Şekil 4.3: Tablo 4.1’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik polimer türleri

4.2 Arıtma çamurlarında mikroplastikler

Atıksu arıtımı sonrasında oluşan arıtma çamurları, neredeyse sıvı halde, kokulu bir atıktır. Arıtma tesisleri, atıksulardan %99’a varan mikroplastik giderimi sağlamakla birlikte giderilen mikroplastikler, arıtma çamurlarında konsantre hale gelmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021). Arıtma çamurlarının, ham atıksulara göre çok daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içerdiği bilinmektedir (B. Zhang vd., 2020). Arıtma çamurlarının, tarımsal arazilerde toprak iyileştiricisi/gübre olarak bertarafı, toprağın verimliliğini artırmada kullanılan ekonomik bir yöntemdir (Corradini vd., 2019). Fakat yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içeren arıtma çamurlarının tarımsal arazilerde kullanılması ile, toprak ortamına henüz etkileri tam olarak bilinmeyen mikroplastiklerin girmesi için bir yol oluşturmaktadır. Bu nedenle, arıtma çamurlarındaki mikroplastiklerin analizi önemli bir araştırma alanıdır. Tablo 4.2’de farklı ülkelerde arıtma çamurlarında mikroplastik tespitine yönelik olarak gerçekleştirilmiş çalışmalar özetlenmektedir. Analiz edilen mikroplastik konsantrasyonunun ifade edildiği birimler, çalışmalar arasında farklılık göstermektedir. Bu durum, tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarının karşılaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Örneğin Çin’de gerçekleştirilen bir çalışmada, iki farklı arıtma çamurunda mikroplastik konsantrasyonları, litre başına tespit edilen mikroplastik kütlesi ($0,224 \pm 0,01$ mg MP/L ve $4,536 \pm 0,00$ mg MP/L) olarak ifade

edilmiştir (Lv vd., 2019). Tablo 4.2’de incelenen diğer çalışmalarda arıtma çamurlarındaki mikroplastik konsantrasyonları MP/g kuru ağırlık (Bretas Alvim, Bes-Piá, vd., 2020; J. Jiang vd., 2020; Kazour vd., 2019; Mintenig vd., 2017; M. Priyanka ve Saravanakumar, 2019; Sujathan vd., 2017, Q. Xu vd., 2020) veya MP/kg yaş ağırlık (Leslie vd., 2017) olarak ifade edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise mikroplastik konsantrasyonları MP/kg veya MP/g olarak ifade edilmiş olup, arıtma çamurlarının kuru veya yaş ağırlığı belirtilmemiştir (Chand vd., 2021; EL Hayany vd., 2020; Gies vd., 2018; Ren vd., 2020). Çalışmalarda tespit edilen mikroplastik konsantrasyon, renk, şekil ve polimer türlerindeki farklılıklar, atıksu numunelerinde olduğu gibi arıtma çamurlarında da, nüfus yoğunluğu, plastik kullanımı, mevsimsel değişim, atıksu karakteristiği, atıksu arıtma tesislerindeki arıtma proseslerinin farklılığı, numune alma ve analiz yöntemlerindeki farklılık gibi faktörlerle ilişkilendirilebilmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden, 2021).

Tablo 4.2’de listelenen çalışmalar analiz teknikleri açısından incelendiğinde, iki çalışmada yalnızca mikroskop kullanılarak görsel analiz gerçekleştirilmiştir (Gies vd., 2018; M. Priyanka ve Saravanakumar, 2019). Bu durumda mikroplastiklerin polimer türleri tayin edilememiştir. Diğer çalışmalarda ise çeşitli mikroskoplar ile görsel analizi gerçekleştirilen mikroplastiklerin, polimer türleri FTIR ve Raman spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir.

Tablo 4.2: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu

Ülke	Arıtma Çamuru Türü	Analiz Tekniği	Mikroplastik Konsantrasyonu	Mikroplastik Rengi	Mikroplastik Şekli	Polimer Türü
İsveç (Chand vd., 2021)	Yoğun çamur	FTIR mikroskopu, μ -	4,59-3,84 $\times 10^6$ MP/kg	-	-	PE, PES, PP,
	Anaerobik çürük çamur	FTIR spektroskopisi	5,12-7,86 $\times 10^6$ MP/kg	-	-	Akrilik, PS, PU
İspanya (Bretas Alvim, Bes-Piá, vd., 2020)	Aktif Çamur	Stereo-mikroskop, FTIR spektroskopisi	112 MP/g kuru ağırlık	Mavi, siyah, kırmızı, yeşil, turuncu, mor	Lif, parça	PE, PP, PS
Çin (J. Jiang vd., 2020)	Geri devir çamuru	Stereo-mikroskop,	36,3 \pm 5,7 MP/g kuru ağırlık	Şeffaf, gri, beyaz,	Parça, lif, pelet, film, köpük	PET, PA, PES, PS,
	Çamur keki	Raman spektroskopisi	46,3 \pm 6,2 MP/g kuru ağırlık	siyah, mavi, kırmızı, yeşil, sarı		
Çin (Q. Xu vd., 2020)	Çamur keki	Stereo-mikroskop, FTIR spektroskopisi	4044 \pm 1359 MP/kg kuru ağırlık	-	Pelet/mikroboncuk, lif	PBA, Rayon, PA, PP, PET, PE

Tablo 4.2: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu (*Devamı..*)

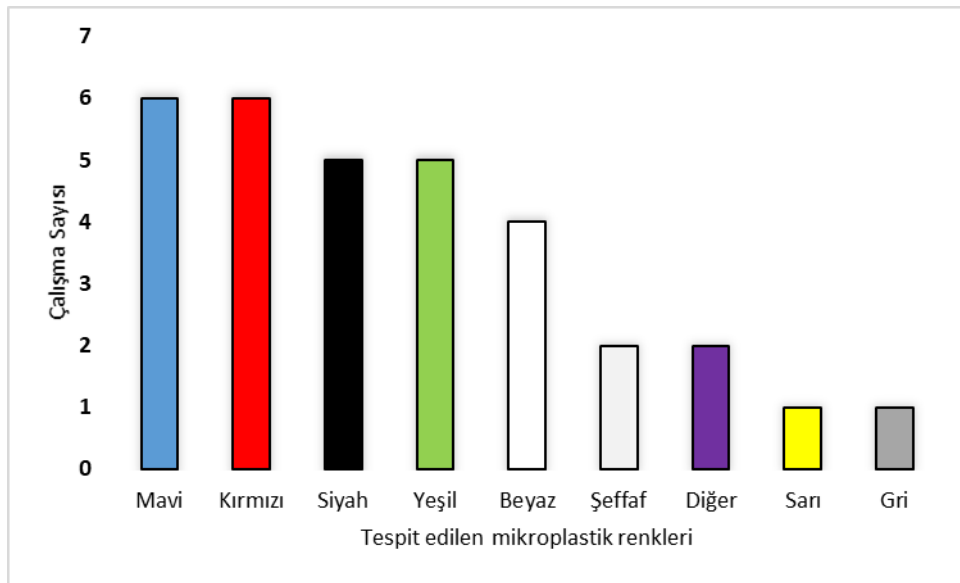
Ülke	Arıtma Çamuru Türü	Analiz Tekniği	Mikroplastik Konsantrasyonu	Mikroplastik Rengi	Mikroplastik Şekli	Polimer Türü
Çin (Ren vd., 2020)	Çamur keki	Mikroskop, Raman spektroskopisi	$2,92 \times 10^3$ MP/kg	Siyah, kırmızı, mavi, beyaz ve diğer	Lif, parça	PE, PP, PA, PET
Fas (EL Hayany vd., 2020)	Atık çamur	Florasan mikroskop, Piroiliz-GC-MS	$40,5 \pm 11,9 \times 10^3$ MP/kg	Mavi, kırmızı, yeşil, beyaz, siyah,	Lif, parça	PP, PE, PA, PS
	Çamur keki		$36 \pm 9,7 \times 10^3$ MP/kg	şeffaf		
Çin (Lv vd., 2019)	Oksidasyon hendeği atık çamuru	Stereomikroskop, FT-IR	$0,224 \pm 0,01$ mg MP/L	-	Parça, film	PET, PS, PE, PP
	Membran biyoreaktör atık çamuru		$4,536 \pm 0,00$ mg MP/L			
Fransa (Kazour vd., 2019)	Arıtma çamuru	Stereo-mikroskop, Raman spektroskopisi	$16,13 \pm 1,2$ MP/g kuru ağırlık	Kırmızı, mavi, yeşil	Lif, parça	PS, PE, PET, PP, Diğer

Tablo 4.2: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin karakterizasyonu (*Devamı..*)

Ülke	Arıtma Çamuru Türü	Analiz Tekniği	Mikroplastik Konsantrasyonu	Mikroplastik Rengi	Mikroplastik Şekli	Polimer Türü
Hindistan (M. Priyanka ve Saravanakumar, 2019)	Arıtma çamuru	Trinoküler mikroskop	31×10^3 MP/kg kuru ağırlık	Beyaz, siyah, yeşil, mavi, kırmızı, turuncu, diğer	Lif, parça, film, mikroboncuk	-
Kanada (Gies vd., 2018)	Birincil ve ikincil çamur	Stereo-mikroskop	$14,9 \pm 6,3 - 4,4 \pm 2,8$ MP/g	-	Lif, parça, köpük, pelet	-
Almanya (Sujathan vd., 2017)	Geri devir çamuru	Stereo-mikroskop, Raman mikroskopu	495 MP/g kuru ağırlık	-	Parça, mikroboncuk, film, lif	PET, PP, PA
Hollanda (Leslie vd., 2017)	3 farklı AAT arıtma çamuru	Işık mikroskobu, FTIR spektroskopisi	510-760 MP/kg yaş ağırlık	-	Lif, küre	-
Almanya (Minteniğ vd., 2017)	6 farklı AAT arıtma çamuru	Stereo-mikroskop, FTIR spektroskopisi	1000-24000 MP/kg kuru ağırlık	-	-	PP, PA, PE, PS

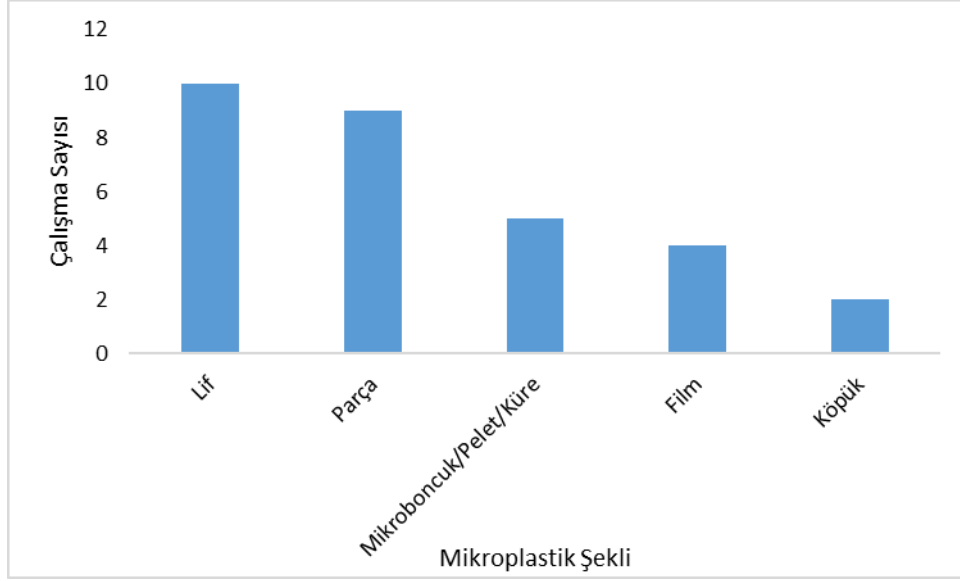
AAT: Atıksu arıtma tesisi, PA: Poliamid, PBA: poli(11-bromoundesil akrilat), PE: Polietilen, PES: Polyester, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PU: Poliüretan, PS: Polistiren, μ -Raman: mikro-Raman, μ -FTIR; mikro-FTIR

Atıksu numunelerinde benzer şekilde, arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastikler de şekil ve renklerine göre kategorize edilmektedir. Tablo 4.2’de incelenen 13 çalışmanın sadece 6 tanesinde (Bretas Alvim, Bes-Piá, vd., 2020; EL Hayany vd., 2020; J. Jiang vd., 2020; Kazour vd., 2019; M. Priyanka ve Saravanakumar, 2019; Ren vd., 2020) mikroplastikler renklerine kategorize edilmiş olup, arıtma çamurlarının çok çeşitli renklerde mikroplastik içerdiği görülmektedir. Çalışmalarda en çok tespit edilen renkler sırasıyla mavi, kırmızı, siyah, yeşil, beyaz, şeffaf, sarı ve gri görülmektedir (Şekil 4.4).



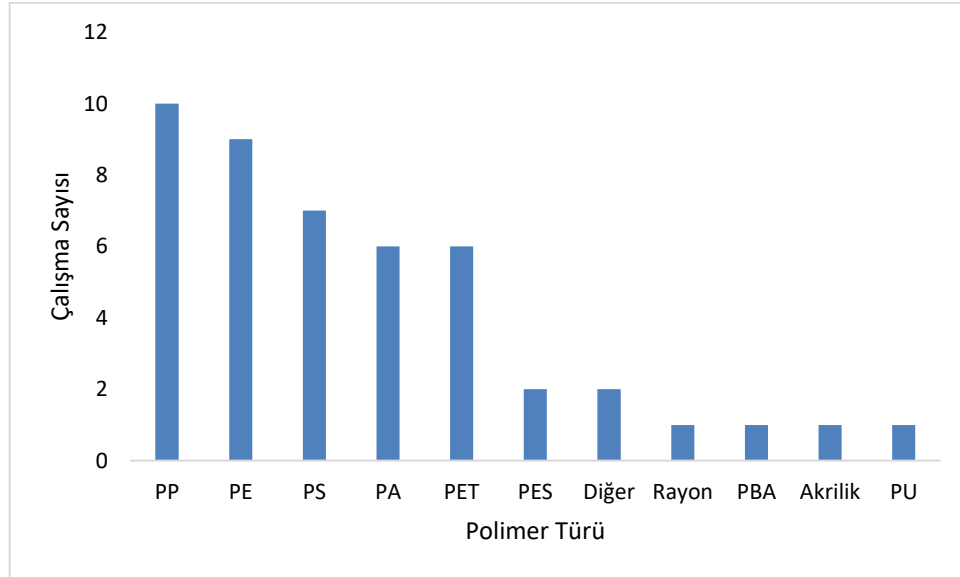
Şekil 4.4: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik renk kategorileri

Çalışmalarda, genellikle mikroplastikler şekillerine göre sınıflandırılmış olup yalnız iki çalışmada bu sınıflandırmaya yer verilmemiştir (Chand vd., 2021; Mintenig vd., 2017). Geriye kalan çalışmaların hepsinde lif ve parça şeklinde mikroplastiklerin bulunduğu görülmüş olup, Şekil 4.5’te verilmiştir. Diğer sık rastlanan şekiller ise mikrobuncuk/pelet/küre ve film iken en az rastlanan ise köpük şekilli mikroplastikler olmuştur.



Şekil 4.5: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen mikroplastik şekil kategorileri

FTIR ve Raman spektroskopisi kullanılarak, mikroplastiklerin polimer türlerinin belirlendiği çalışmalarda arıtma çamuru numunelerinde 11 farklı polimer türü analiz edilmiştir (Şekil 4.6). En sık rastlanan polimer türleri sırasıyla PP, PE, PS, PA ve PET şeklindedir. Diğer polimer türlerine (PES, rayon, PBA, akrilik ve PU) ise az sayıda çalışmada rastlanmıştır.



Şekil 4.6: Tablo 4.2’de incelenen çalışmalarda tespit edilen polimer türleri

4.3 Tezin Amacı

Tez kapsamında, kentsel nitelikli atıksuların arıtıldığı Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nin mikroplastik kirlilik profilinin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak çalışmanın ilk adımında atıksu arıtma tesisinde numune alma noktaları belirlenmiştir. Alınan numunelerde öncelikle mikroplastiklerin bulunduğu ortamdaki ayrılma (izolasyon) prosedürünün belirlenmesine yönelik olarak optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Tezin diğer bir temel amacı mevsimsel değişimi göz önünde bulundurarak Denizli ili bazında mikroplastik kirliliğinin detaylı şekilde ortaya konmasıdır. Bu temel amaca yönelik olarak belirlenen alt hedefler aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

- Birincil ve ikincil arıtma kademelerinin mikroplastik giderme veriminin belirlenmesi,
- Klasik biyolojik arıtma tesislerinde toplam mikroplastik giderme veriminin belirlenmesi,
- Atıksu arıtma işlemleri sonucunda alıcı ortama verilen mikroplastik kirliliğinin tespiti,
- Arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamurların mikroplastik içeriğinin belirlenmesi,
- Çamur keki ile katı atık depolama sahasında bertaraf edilen mikroplastik yükünün belirlenmesi,

Yukarıda belirlenen hedefler doğrultusunda, tesis giriş atıksuyu, kum tutucu çıkış suyu, ön çökeltim havuzu çıkışı ve arıtılmış atıksuyu, arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamur numuneleri (havalandırma havuzu çıkışı, karışık çamur, anaerobik çürük çamur ve çamur keki) numune alma noktaları olarak belirlenmiştir. Böylece hem atıksu hem de arıtma çamurlarında mikroplastik kirliliğinin bütünleşik olarak ortaya konması hedeflenmiştir. Mikroplastik kirliliği üzerine mevsimsel etkiyi tolere edebilmek amacıyla, yağışlı mevsimi temsilen 3 ay (aralık, ocak ve şubat) ve kurak mevsimi temsil eden 3 ay (temmuz, ağustos ve eylül) seçilerek 2 haftalık periyotlarla numuneler alınarak mikroplastik analizleri gerçekleştirilmiştir. Giriş atıksuyunda yapılan analizler ile Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'ne gelen mikroplastik yükü ortaya konmuştur. Tesis çıkış suyunda yapılan analizler ile Denizli Merkez Atıksu

Arıtma Tesisi'nden alıcı ortama verilen mikroplastik yükünün değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Ham ve arıtılmış atıksularda tespit edilen mikroplastik tür ve konsantrasyonlarının ölçümü ile klasik biyolojik atıksu arıtma tesisinde mikroplastiklerin giderme verimleri de belirlenmiştir. Ayrıca çamur numunelerinde yapılan mikroplastik analizleri, arıtma çamurlarının arazide kullanımı veya düzenli depolamaya gönderilen çamur kekinde bulunması muhtemel mikroplastik kirliliği tespit edilmiştir. Ayrıca, alınan tüm numunelerin analizi sonucunda atıksu arıtma tesisinin mikroplastik kirliliği açısından bütünleşik bir kirlilik profili elde edilmiştir.

Tezin hedeflerine ulaşması için izlenen süreç aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Mikroplastiklerin başlangıç matrisinden doğru ve etkili bir şekilde izole edilmesi,
- Seçilen izolasyon metodu kullanılarak giriş atıksuyu ve arıtılmış suda mikroplastik tür ve konsantrasyon tespiti,
- Arıtılmış atıksuyun alıcı ortama getirdiği yükün hesaplanması,
- Seçilen izolasyon metodu kullanılarak arıtma çamurlarında mikroplastik tür ve miktar tespiti,
- Kentsel nitelikli atıksuların arıtıldığı klasik bir biyolojik arıtma tesisi için mikroplastik kirlilik profilinin değerlendirilmesidir.

5. MATERYAL VE METOT

5.1 Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi

Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi 6 üniteden oluşan ve çoğunlukla evsel atıksuların (~%98) arıtıldığı kentsel nitelikli bir atıksu arıtma tesisidir. Tesise gelen atıksuların küçük bir bölümünü oluşturan endüstriyel atıksular (~%2) ise çoğunlukla tekstil terbiye fabrikası, cevher işleme tesisi ve oto yıkama gibi farklı işletmelerden kaynaklanmaktadır. Arıtılmış atıksu, Büyük Menderes Nehri'nin kollarından biri olan Çürüksu Çayı'na deşarj edilmektedir. Mikroplastik analizi için numune alınan günlerde tesise gelen ve deşarj edilen atıksu debi değerleri ve arıtma işlemleri sonucunda oluşan çamur kekinin günlük katı atık depolama sahasına gönderilen miktarları Tablo 5.1'de verilmiş olup, tablodaki değerler Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi işletmesinden elde edilmiştir. Mevcut tesis 378.353 kişilik bir nüfusa hizmet vermektedir.

Tablo 5.1: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debi değerleri ve günlük katı atık depolama sahasına gönderilen çamur keki miktarı

Mevsim	Tarih	Q _{giriş} (m ³ /gün)	Q _{çıkış} (m ³ /gün)	Günlük depolanan çamur keki (t/gün)
Kış	1.12.2020	94021	88380	16950
	16.12.2020	97547	91412	25800
	6.01.2021	99305	91007	50550
	20.01.2021	97743	90019	57350
	3.02.2021	102129	91256	55200
	17.02.2021	97208	89066	41250
	Ortalama	97992,2	90190	41183,3
Yaz	14.07.2021	61873	57111	55750
	28.07.2021	61127	57918	63150
	11.08.2021	62259	58040	49800
	25.08.2021	58977	55710	59400
	8.09.2021	60518	58040	55050
	22.09.2021	50701	48753	42650
	Ortalama	59242,5	55928,7	54300

5.2 Numune Alma

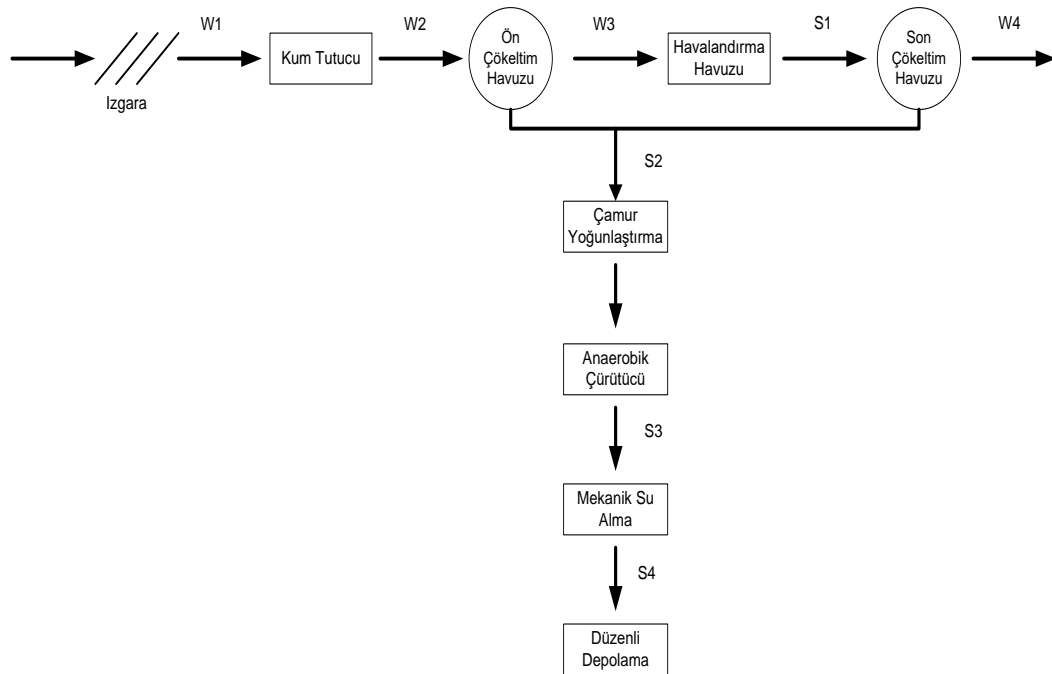
Tez kapsamında, tesisin mikroplastik kirliliğinin izlenmesi amacıyla tesisin akım şeması üzerinde numune alma noktaları belirlenmiş olup, numune alma noktaları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Atıksu karakterinin gün içindeki değişimini dikkate almak amacıyla 24 saatlik kompozit atıksu numuneleri, otomatik numune alma cihazı ile alınmıştır. Arıtma çamuru numuneleri ise belirlenen noktalardan anlık olarak toplanarak mikroplastik analizi yapılması için laboratuvara transfer edilmiştir. Denizli’nin evsel atıksuyu ile ön arıtmadan geçmiş endüstriyel atıksularının artıldığı Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi’nin ham atıksuyu (W1), kum tutucu çıkışı (W2), ön çökeltim havuzu çıkışı (W3) ve arıtılmış atıksuyundan (W4) numuneler alınmıştır. Arıtma çamuru numuneleri ise havalandırma havuzu çıkışı (S1), ön çökeltim ve son çökeltim havuzlarından gelen karışık çamurdan (S2), anaerobik çürük çamur (S3) ve çamur kekinden (S4) alınmıştır. Havalandırma tankı çıkış suyu (S1) yüksek oranda askıda katı madde içeriğine sahip olduğundan, bu numune çamur numunesi olarak işlem görmüştür. Arıtma tesislerine gelen kirlilik yükü, mevsimsel olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle, mikroplastik türü ve konsantrasyonu üzerine etki edebilecek olan mevsimsel değişiklikleri tolere edebilmek amacıyla, kurak ve yağışlı mevsimlerde izleme çalışmaları yapılmıştır.

Denizli iline ait ortalama en düşük ve ortalama en yüksek sıcaklık ve ortalama sıcaklık değerleri ile yağış miktarı Tablo 5.2’de verilmektedir. Veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü web sitesinden elde edilmiş olup 1957-2020 yılları arasındaki ortalama değerleri temsil etmektedir (<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=DENIZLI>). Tablodan anlaşılacağı üzere, Denizli İlinde aylık ortalama yağış miktarı en yüksek olan aylar Aralık, Ocak ve Şubat ayları iken, aylık ortalama yağış miktarı en düşük olan aylar ise Temmuz, Ağustos ve Eylül ayları olarak görülmektedir. Bu nedenle, tüm numuneler yağışlı mevsim olan kış aylarını (Aralık 2020-Şubat 2021) ve kurak mevsim olan yaz aylarını (Temmuz 2021-Eylül 2021) temsil edecek şekilde 6 ay boyunca 2 haftalık periyotlarla örneklenmiş ve mikroplastik analizi için laboratuvara aktarıldıktan sonra 4°C’de saklanmıştır. Numuneler laboratuvara ulaştıktan sonra hemen karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Atıksu ve çamur özellikleri sırasıyla Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’te verilmiştir. Tüm analizler, Standart Metotlarda verilen prosedüre göre yapılmış olup, tüm

parametre değerleri üç tekrarlı analizlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır (APHA, 2012).

Tablo 5.2: Denizli İline ait hava durumu verileri

Aylar	Ortalama En düşük-En yüksek Sıcaklık (°C)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)
Aralık	4,1-12,2	7,6	89,6
Ocak	2,3-10,5	5,8	90,9
Şubat	3,1-12,3	7,1	71,0
Mart	5,4-16,0	10,2	62,8
Nisan	9,2-20,9	14,6	51,9
Mayıs	13,3-26,4	19,5	43,2
Haziran	17,4-31,3	24,3	27,0
Temmuz	20,2-34,6	27,2	14,9
Ağustos	19,9-34,5	26,9	10,7
Eylül	15,9-30,1	22,6	16,4
Ekim	11,5-23,9	17,0	36,1
Kasım	7,1-17,4	11,5	54,8



Şekil 5.1: Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması ve örnekleme noktalarının gösterimi

Tablo 5.3: Atıksu numunelerinin karakterizasyonu

Numune	Kış Mevsimi (Aralık 2020-Şubat 2021)				Yaz Mevsimi (Temmuz-Eylül 2021)			
	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
pH	7,65	7,73	7,95	8,27	7,50	7,64	7,97	8,04
KOİ (mg/L)	618,04	486,3	331,96	<50	580,06	457,67	325,63	<50
AKM (mg/L)	343	278	122	31	294	217	139	48
TKM (mg/L)	1137	1037	875	665	1221	1143	979	816

Tablo 5.4: Arıtma çamuru numunelerinin karakterizasyonu

Numune	Kış Mevsimi (Aralık 2020-Şubat 2021)				Yaz Mevsimi (Temmuz-Eylül 2021)			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
pH	8,23	8,02	8,06	7,74	7,82	7,35	7,24	7,57
KOİ (mg/L)	1334,05	3507,08	16013,18	11030,66	1320,18	3365,2	24413,57	9276,83
AKM (mg/L)	1031,67	2090,83	13500	-	1016,67	2315,00	17883,33	-
TKM (%)	0,18	0,62	1,77	16,46	0,18	0,31	1,70	18,50
OM (%)	58,84	72,43	63,61	66,44	56,04	66,36	63,52	62,84

5.3 Metot Validasyonu

Mikroplastik izleme çalışmalarından önce, mikroplastik konsantrasyonu doğru bir şekilde elde edilebilmesi amacıyla mikroplastik geri kazanım testlerinin yapılması gereklidir. Mikroplastik geri kazanım testleri yapılmasıyla uygulanan mikroplastik izolasyon yönteminin başarı oranı belirlenebilmektedir. Atıksu ve çamur numunelerinde mikroplastiklerin izolasyonu için standart bir yöntem yoktur. Bununla birlikte, H₂O₂, mikroplastikleri tespit etmek için numunelerde organik madde giderimi için en yaygın kullanılan oksidan maddedir (Leslie ve diğ. 2017; Mahat, 2017; Mason ve diğ. 2016). Reaksiyon süresini azaltmak için sıcaklık katalizörlerinin kullanımı literatürde sıklıkla görülmektedir (Sujathan ve diğ. 2017). Çevresel numunelerde yaygın olarak tespit edilen plastiklerin çalışma sıcaklık değerlerinin 80-120°C arasında değiştiği bilinmektedir (PC: 120°C; PET: 120°C; PP: 100°C, PE: 80°C; PA: 85°C, PS: 80°C) (Sujathan ve diğ. 2017). En düşük çalışma sıcaklık değerleri PE ve PS için 80°C'dir. Bu nedenle deneysel çalışma sürecindeki izolasyon çalışmalarında 70°C sıcaklık değeri kullanılmıştır. Mikroplastiklerin izolasyon yöntemini optimize etmek amacıyla her bir atıksu ve çamur numunesi farklı H₂O₂ konsantrasyonu ve süreleri kullanılarak 70 °C'de oksidasyon işlemine tabi tutulmuştur. Oksidasyon işlemi sonrasında mikroplastik geri kazanım oranı ve numunelerdeki askıda katı madde

(AKM) giderim verimleri dikkate alınarak, en yüksek geri kazanım oranını ve en yüksek AKM giderme verimini sağlayan uygulamalar izolasyon yöntemi olarak belirlenmiştir. Mikroplastik geri kazanım oranları, Denklem 3.1’de belirtildiği üzere her numune için kütle ve sayısal olarak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında, mikroplastik geri kazanım oranını test etmek amacıyla PP, HDPE, LDPE, PET, PS gibi atıksularda sıklıkla karşılaşılan standart plastik malzemeler kullanılmıştır. Boyutları 500 µm’den büyük olan PP, LDPE ve HDPE plastik partiküller özel bir firmadan temin edilirken, PET ve PS laboratuvar ortamında fiziksel parçalama yöntemi ile üretilmiştir. Mikroplastik analizinde kullanılacak olan atıksu numunesi hacimleri W1, W2 ve W3 numuneleri için 500 mL ile sınırlandırılırken, arıtılmış atıksu numunesi olan W4 için 1000 mL olarak belirlenmiştir. Mikroplastik geri kazanım deneylerinde, her bir atıksu numunesine bilinen sayı ve ağırlıkta beş farklı polimer türünde mikroplastik standartları eklendikten sonra 100 µm boyuttaki elekten geçirilmiş olup, de-iyonize su yardımıyla bir erlene aktarılmıştır. Hazırlanan atıksu numunelerine, farklı dozlarda %50’lik H₂O₂ (W1: 30, 40 ve 50 mL; W2: 20, 30 ve 40 mL; W3: 10, 20 ve 30 mL; W4: 1, 3, 5, 7 ve 10 mL) ilave edilerek 70°C’ye kadar ısıtılmıştır. Daha sonra numuneler sıcaklık kontrollü bir çalkayacılı inkübatörde W1, W2 ve W3 numuneleri için 60-120 dk arasında değişen sürelerde, W4 numunesi için kirlilik yükü çok düşük olduğundan 10-30 dk arasında değişen sürelerde reaksiyona tabii tutulmuştur. Arıtma çamuru numunelerinde, atıksu numunelerinden farklı olarak eleklerin tıkanmasını önlemek amacıyla önce oksidasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, oksidasyon prosesinde doz ve süre optimizasyonu yapılmıştır. Mikroplastik analizinde kullanılacak olan çamur numunesi hacimleri S1 ve S2 numuneleri için 10 mL, S3 numunesi için 5 mL ve çamur keki olan S4 numunesi için 0,1 g olarak belirlenmiştir. Her bir arıtma çamuru numunesi için ayrı ayrı olmak üzere bilinen sayıda beş farklı polimer türündeki mikroplastik standartları eklendikten sonra farklı dozlarda %50’lik H₂O₂ (S1: 10, 20 ve 30 mL; S2, S3 ve S4: 40, 50 ve 60 mL) ilave edilerek 70°C’ye kadar ısıtılmıştır. Daha sonra numuneler sıcaklık kontrollü bir çalkayacılı inkübatörde belirtilen sürelerde (S1: 60-120 dk; S2, S3 ve S4: 60-180 dk) reaksiyona tabii tutulmuştur. Oksidasyon süresini tamamlayan numuneler atıksu ve çamur numuneleri, 100 µm boyuttaki elekten geçirilmiş olup, de-iyonize su yardımıyla behere aktarılmıştır. Daha sonra numuneler 20 µm gözenek çapına sahip filtre kağıtlarından süzülükten sonra

mikroskop altında incelenmiştir. pH ayarlaması hiçbir analizde yapılmamış olup, tüm analizler numunelerin kendi pH değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Mikroplastik izolasyon işlemlerinde sıklıkla kullanılan yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemi, yüksek yoğunluklu polimerlerin kaybını önlemek için bu prosedüre dahil edilmemiştir. NaCl ($1,2 \text{ g/cm}^3$) yoğunluk ayırımı için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak atıksu ve çamur örneklerinde sıklıkla gözlenen PET gibi polimerlerin yoğunluğu ($1,37-1,45 \text{ g/cm}^3$) olduğundan yoğunluk ayırımı sırasında çökebilir ve mikroplastik konsantrasyonunun belirlenmesinde hatalara neden olabilir (Bretas Alvim ve diğ. 2020b; Lares ve diğ. 2018). Bu sorunun üstesinden gelmek için NaI ($1,8 \text{ g/cm}^3$) gibi daha konsantre çözeltilerin kullanılması faydalı olabilmektedir ancak maliyet-fayda oranı göz önüne alındığında, bu çalışmada yoğunluk farkına dayalı ayırma işlemi kullanılmamıştır. Ek olarak, kimyasal oksidasyonun etkinliği de AKM giderimi üzerinden test edilmiştir. AKM giderimi ve mikroplastik geri kazanım oranını hesaplamak için deneyler paralel olarak yürütülmüştür. H_2O_2 ile kimyasal oksidasyondan sonra, numuneler $20 \mu\text{m}$ gözenek çaplı filtre kağıtlarından süzülerek 105°C 'de etüvde 1 saat boyunca kurutulmuştur. Desikatörde soğutulduktan sonra, AKM giderim verimini belirlemek için filtre kağıtları tartılmıştır. Arıtılmış atıksu (W4) ve çamur keki (S4) için AKM giderimi belirlenemediğinden filtre kağıtları sadece mikroskop altında incelenmiştir. Tablo 5.5'te atıksu (W1, W2 ve W3) ve arıtma çamuru (S1, S2 ve S3) numunelerinde gerçekleştirilen farklı H_2O_2 dozu ve reaksiyon süresinde elde edilen AKM giderme verimleri gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Farklı H₂O₂ dozu ve reaksiyon süresinde elde edilen AKM giderim verimleri

Numune Alma Noktası	H ₂ O ₂ dozu (mL)	Reaksiyon Süresi (dk)	AKM Giderimi (%)	Numune Alma Noktası	H ₂ O ₂ dozu (mL)	Reaksiyon Süresi (dk)	AKM Giderimi (%)
W1	30	60	64	S1	10	60	61
	30	90	87		10	90	78
	30	120	92		10	120	80
	40	60	79		20	60	77
	40	90	81		20	90	82
	40	120	83		20	120	85
	50	60	79		30	60	84
	50	90	79		30	90	90
	50	120	77		30	120	91
W2	20	60	79	S2	40	60	60
	20	90	79		40	120	67
	20	120	93		40	180	78
	30	60	79		50	60	79
	30	90	81		50	120	90
	30	120	81		50	180	91
	40	60	80		60	60	86
	40	90	81		60	120	89
	40	120	82		60	180	88
W3	10	60	67	S3	40	60	77
	10	90	83		40	120	94
	10	120	95		40	180	90
	20	60	75		50	60	88
	20	90	84		50	120	90
	20	120	90		50	180	91
	30	60	76		60	60	75
	30	90	79		60	120	77
	30	120	91		60	180	79

Tüm deneyler sonucunda her bir numune için en yüksek mikroplastik geri kazanım oranını veren ve en yüksek AKM giderimini sağlayan uygulamalar izolasyon yöntemi olarak belirlenmiş olup, bu uygulamaların sonuçları Tablo 5.6'da özetlenmiştir. Her bir uygulama için üç kez deney tekrarı yapılmış ve ortalama değerler kullanılmıştır. Her numune için AKM giderim verimi %90'ın üzerinde elde edilmiştir. Seçilen optimum oksidasyon koşullarında gerçekleştirilen mikroplastik geri kazanım oranları ise sayısal ve kütesel olarak %100'e yakın bulunmuştur.

Tablo 5.6: Mikroplastik geri kazanım oranları ve AKM giderim verimleri

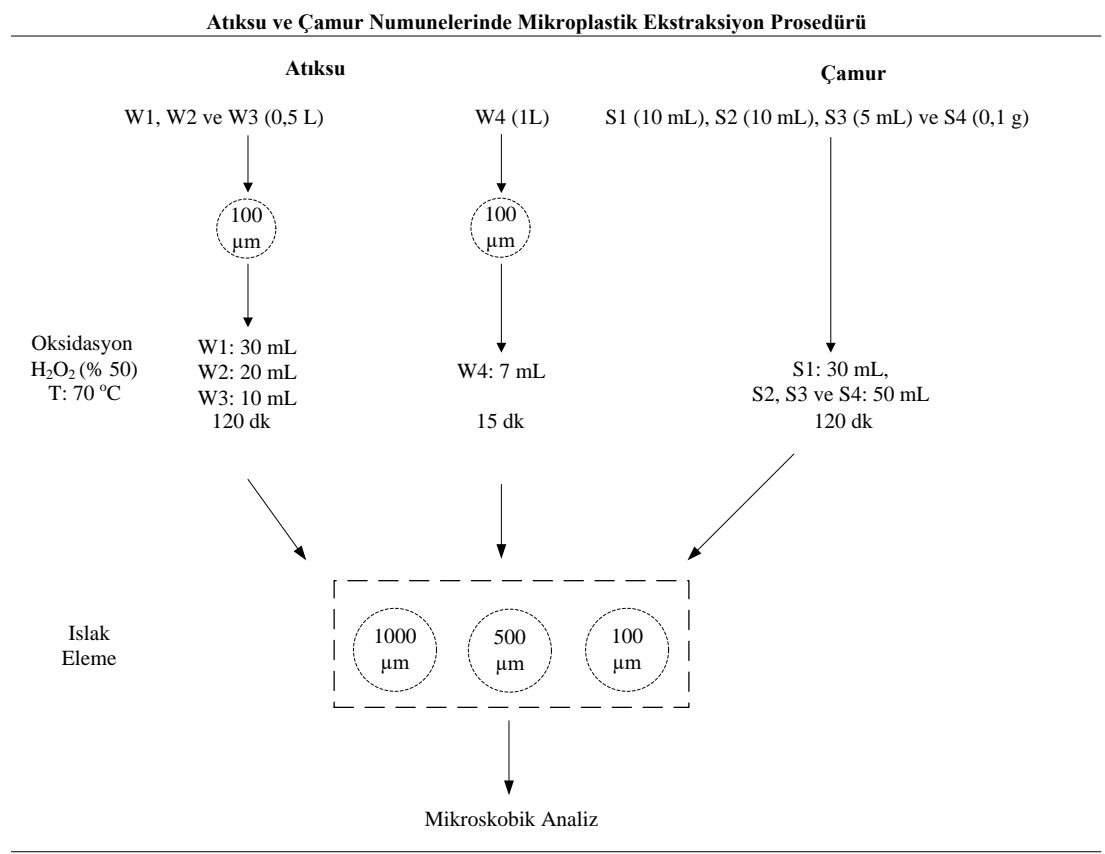
Numune Alma Noktası	Numune Hacmi (mL)	H ₂ O ₂ dozu (mL)	Reaksiyon Süresi (dk)	AKM Giderim Verimi (%)	Kütleli Mikroplastik Geri Kazanım Oranı (%)	Sayısal Mikroplastik Geri Kazanım Oranı (%)
W1	500	30	120	92	99,87	100,00
W2	500	20	120	93	99,98	100,00
W3	500	10	120	95	99,81	100,00
W4	1000	7	15	-	99,99	100,00
S1	10	30	120	91	98,75	98,97
S2	10	50	120	90	97,99	98,11
S3	5	50	120	90	97,84	97,93
S4	0,1 g	50	120	-	98,96	99,79

5.4 Mikroplastik İzolasyonu Çalışmaları

Çalışma kapsamında her bir atıksu ve arıtma çamuru numunesi için optimum izolasyon yöntemi belirlenerek, tez kapsamında belirlenen numune alma periyotlarında mikroplastik kirliliği izleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Özetle atıksu numuneleri (W1, W2, W3 ve W4), 100 µm polyester elekten geçirilerek deiyonize su yardımıyla erlene aktarılmıştır. Erlenlere belirlenen konsantrasyonlarda %50'lik H₂O₂ (W1: 30 mL; W2: 20 mL; W3: 10 mL; W4: 7 mL) eklenmiş ve 70°C'ye ısıtılmıştır. Daha sonra numuneler W1, W2 ve W3 numuneleri için 120 dakika, W4 numunesi için 15 dakika sıcaklık kontrollü çalkalayıcı inkübatörde reaksiyona tabi tutulmuştur. Oksidasyon süresini tamamlayan numuneler, mikroplastiklerin boyutlarını ayırt etmek için 1000 µm, 500 µm ve 100 µm polyester elekten geçirilmiştir. Son olarak elekler alüminyum folyo ile kapatılmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur.

Atıksu numunelerinde kullanılan mikroplastik izolasyon yöntemi, arıtma çamuru numunelerinde (S1, S2, S3 ve S4) de kullanılmıştır. Sadece atıksu numunelerinden farklı olarak eleklerin tıkanmaması için önce oksidasyon çalışmaları yapılmıştır. Çamur numuneleri erlene aktarılmış ve %50'lik H₂O₂ (S1:30 mL için, S2, S3 ve S4 için 50 mL için) eklenerek 70°C'ye ısıtılarak sıcaklık kontrollü çalkalayıcı inkübatörde 120 dakika reaksiyona tabi tutulmuştur. Oksidasyon süresini tamamlayan numuneler, boyut analizi için kullanılan 1000 µm, 500 µm ve 100 µm polyester elekten

geçirilmiştir. Son olarak elekler alüminyum folyo ile kapatılmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Atıksu ve çamur örneklerinden mikroplastiklerin izolasyonunda kullanılan prosedür Şekil 5.2’de özetlenmiştir.



Şekil 5.2: Atıksu ve çamur numunelerinden mikroplastik izolasyon prosedürü

5.5 Mikroplastiklerin Analizi

Örneklerin hazırlanmasından sonra, mikroplastikler stereomikroskop (Stemi 305 Carl Zeiss, Almanya) kullanılarak dikkatlice sayılmıştır. Stereomikroskoba entegre edilmiş dijital kamera (MshOt MD50) yardımı ile, mikroplastiklerin görüntüleri alınmıştır. Sayılan mikroplastikler şekillerine (parça, lif ve film), boyutlarına (100-500 µm, 500-1000 µm ve >1000 µm) ve renklerine (siyah, kahverengi, mavi-lacivert, pembe-kırmızı, beyaz-şeffaf ve yeşil-sarı) göre sınıflandırılmıştır. Mikroplastiklerin kimyasal kompozisyonu, zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) aksesuarı ile birleştirilmiş Fourier-Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) (Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50 FTIR Spektrometresi) ile

tanımlanmıştır. Şüpheli mikroplastik parçacıklar kış mevsimine (n=109) ve yaz mevsimine (n=86) ait olmak üzere stereomikroskop altında pens yardımıyla rastgele seçilerek sınıflandırılmıştır. Daha sonra seçilen mikroplastiklerin yüzeyine adsorbe olmuş organik maddeleri uzaklaştırmak amacıyla gece boyunca %70'lik etanol çözeltisinde bekletilmiş olup deiyonize su ile yıkanmıştır. Son olarak, mikroplastikler FTIR analizinden önce etüvde 40°C'de kurutulmuştur. Kızılötesi radyasyon, 4 cm⁻¹ çözünürlükte 400-4000cm⁻¹ dalga boyu bölgesinde 16 kez taranmıştır. Elde edilen spektrumlar analiz edilerek polimerler türünü tanımlamak için Nicolet OMNIC 9 yazılımında bulunan referans spektrumlarla karşılaştırılmıştır.

5.6 Kontaminasyon Kontrolü

Laboratuvar çalışmaları sırasında mikroplastik kontaminasyonu önlemek için nitril eldivenler ve pamuklu laboratuvar önlükleri kullanılmıştır. Tüm materyaller kullanımdan önce üç kez deiyonize su ile durulanmış olup alüminyum folyo veya kapak ile kapatılmıştır. Ayrıca tüm yüzeyler ve ekipmanlar kullanımdan önce %70'lik etanol çözeltisi kullanılarak temizlenmiştir. Çalışmalar sırasında herhangi bir kontaminasyon görülmemiştir.

5.7 İstatistiksel Analiz

Mikroplastik konsantrasyonları atıksu numuneleri için litre başına mikroplastik sayısı (MP/L), çamur numuneleri için ise gram kuru ağırlık başına mikroplastik sayısı (MP/g) olarak ifade edilmiştir. Veriler, ortalama \pm standart sapma olarak rapor edilmiştir. Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde (atıksu ve arıtma çamuru numune alma noktaları kendi içinde değerlendirmek üzere) yapılan tekrarlı ölçüm ortalamalarının numune alma noktalarına, tarihlere ve mevsimlere göre farklılık gösterip göstermediğini belirlemek için istatistiksel analizler (%95 güven aralığında) gerçekleştirilmiştir. Veri sayısı çok az olduğu için normallik testi olan Kolmogorov-Smirnov ön testinde anlamlılık değeri elde edilememiş olup, parametrik test varsayımı sağlanamamıştır. Bu nedenle parametrik olmayan testler kullanılmıştır. Elde edilen mikroplastik konsantrasyon değerleri nicel ölçek (*scale*) türünden bağımlı gruplara ait

sayıları içermektedir. Proses, boyut, renk, şekil ve tarih değişkenleri en az 3 grup içerdiğinden, istatistiksel karşılaştırma için Friedman testi (W1, W2, W3, W4 veya S1, S2, S3, S4) kullanılmıştır. Friedman testi sonucunda gruplar arasındaki farklılıkların ikili şekilde (W1-W2, W2-W3, W3-W4, ..., S3-S4) detaylı olarak incelenmesi için, bağımlı gruplar arasında nicel ölçek türünden değerlerin analiz edilebileceği parametrik olmayan Wilcoxon işaretli sıra testi kullanılmıştır. Ayrıca mevsim değişkeni kış ve yaz gibi iki grup içerdiğinden proseslerde elde edilen mikroplastik konsantrasyonlarının mevsime göre farklılık gösterip göstermediğini istatistiksel olarak incelemek amacıyla yine Wilcoxon işaretli sıra testi kullanılmıştır.

6. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında, kış mevsimi ve yaz mevsimine ait analiz edilen atıksu ve arıtma çamuru numunelerine ait boyut, renk ve şekil ve polimer türü analizleri bu bölümde verilmektedir. Toplam mikroplastik konsantrasyonları, sayı ve yüzde olarak belirtilmiştir. Mikroplastik konsantrasyonları atıksu numuneleri (W1, W2, W3 ve W4) için litre başına mikroplastik sayısı (MP/L) olarak ifade edilmiştir. Arıtma çamuru numunelerinde ise (S1, S2, S3 ve S4) gram kuru ağırlık başına mikroplastik sayısı (MP/g kuru ağırlık) hesaplanmıştır. Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde belirlenen numune alma noktalarından yağışlı olan kış mevsimini temsil eden üç ay süresince iki haftalık periyotlarda (1-16 Aralık 2020, 6-20 Ocak 2021, 3-17 Şubat 2021) numuneler alınmıştır. Mevsimsel değişimin mikroplastik kirliliği üzerine etkisinin değerlendirilmesi amacıyla Denizli ilinde yağışın az olduğu yaz mevsiminde de üç ay süresince iki haftalık periyotlarda (14-28 Temmuz 2021, 11-25 Ağustos 2021, 8-22 Eylül 2021) numuneler alınmıştır. Yapılan tüm analizler sonucunda elde edilen ham veriler Ekler bölümünde sunulmuştur. Her iki mevsim için ayrı ayrı olmak üzere mikroplastik konsantrasyonlarının ortalama değerleri kullanılmıştır.

Her bir deney noktasında, yaz ve kış mevsimini temsil eden tarihlerde alınan numuneleri, ortalama mikroplastik konsantrasyonlarının istatistiki açıdan anlamlı bir farklılık gösterip göstermediğini belirlemek amacıyla Friedman testi uygulanmıştır. Yaz mevsiminde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu farklı tarihlerde alınan atıksu ve arıtma çamuru numuneleri açısından ayrı ayrı değerlendirildiğinde istatistiki olarak anlamlı bir farklılık elde edilmemiştir ($p>0,05$) (Şekil 6.1b, Şekil 6.1d). Kış mevsiminde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu farklı tarihlerde alınan atıksu numuneleri açısından değerlendirildiğinde istatistiki olarak anlamlı bir farklılık elde edilmiştir ($p<0,05$) (Şekil 6.1a). Kış mevsiminde farklı tarihlerde alınan arıtma çamuru numunelerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunda istatistiki olarak anlamlı bir farklılık elde edilmemiştir ($p>0,05$) (Şekil 6.1c).

Şekil 6.2'de atıksu ve arıtma çamuru için belirlenen deney noktalarından alınan numunelerden izole edilen mikroplastiklerin x40 kat büyütme ile mikroskop altında elde edilen görsel örnekleri verilmektedir. Mikroplastikler genellikle çeşitli şekil

kategorilerinde sınıflandırılmakla birlikte, bunun için evrensel bir tanım yoktur (Kooi ve Koelmans, 2019). Bu tez çalışması kapsamında, mikroplastik şekilleri parça (düzensiz şekilli katı parçacıklar), film (ince ve sert olmayan parçacıklar) ve lif (eşit çapta uzun parçacıklar) olarak kategorize edilmiştir.

Test Statistics ^a		(a)	Test Statistics ^a		(b)
N	4		N	4	
Chi-Square	12,000		Chi-Square	4,571	
df	5		df	5	
Asymp. Sig.	,035		Asymp. Sig.	,470	
a. Friedman Test			a. Friedman Test		

Test Statistics ^a		(c)	Test Statistics ^a		(d)
N	4		N	4	
Chi-Square	1,857		Chi-Square	9,173	
df	5		df	5	
Asymp. Sig.	,869		Asymp. Sig.	,102	
a. Friedman Test			a. Friedman Test		

Şekil 6.1: Kış ve yaz mevsimine ait atıksu (a-c) ve arıtma çamurunda (b-d) tespit edilen mikroplastik konsantrasyon verilerine uygulanan Friedman testi analiz sonuçları



(a) W1: pembe, beyaz ve mavi parça (> 1000 μm)



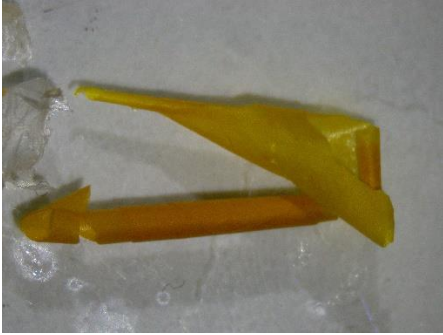
(b) W2: yeşil lif (> 500 μm)



(c) W3: kahverengi film (> 500 μm)



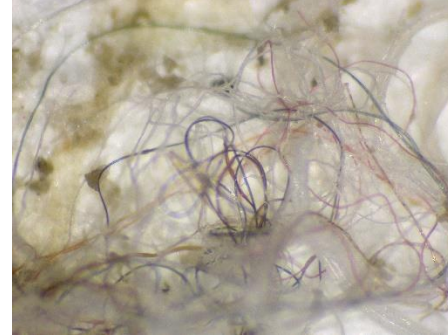
(d) W4: yeşil parça (> 500 μm)



(e) S1: kahverengi parça (> 1000 μm)



(f) S2: şeffaf film (> 500 μm)



(g) S3: pembe ve mavi lif (> 100 μm)

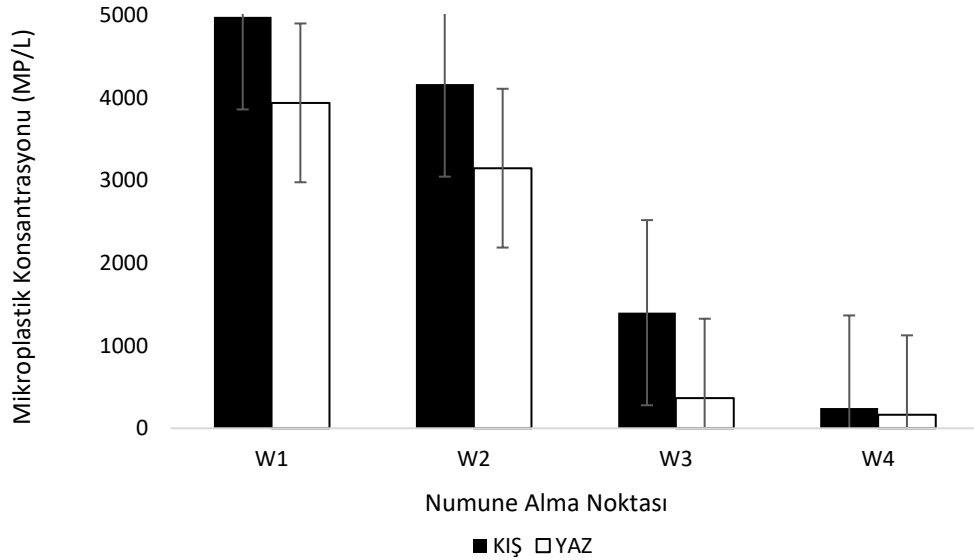


(h) S4: siyah lif, şeffaf film ve parça (> 500 μm)

Şekil 6. 2: Atıksu (a, b, c, d) ve arıtma çamurlarında (e, f, g, h) tespit edilen parça, film ve lif şeklindeki mikroplastiklerin mikroskop altındaki örnek görüntüleri

6.1 Atıksularda Tespit Edilen Mikroplastikler

Tez kapsamında, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nin ham atıksuyu (W1), kum tutucu çıkışı (W2), ön çökeltim havuzu çıkışı (W3) ve arıtılmış atıksuyundan (W4) numuneler alınarak stereomikroskop yardımıyla mikroplastiklerin görsel analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3 kış ve yaz aylarında atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarını göstermektedir. İki farklı mevsimde de her bir atıksu numunesi alma noktasındaki (W1, W2, W3 ve W4) toplam mikroplastik konsantrasyonları arasında yapılan Friedman testi ile istatistiki olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p < 0,05$). Bu farkların detaylı incelemesi için Wilcoxon işaretli sıra testi yapılmış ve her bir numune alma noktası çifti arasındaki fark incelenmiş olup, mikroplastik konsantrasyonları istatistiksel olarak birbirinden farklı bulunmuştur (Şekil 6.4).



Şekil 6.3: Kış ve yaz aylarında atıksularda tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	18,000
df	3
Asymp. Sig.	,000

a. Friedman Test

(a)

Test Statistics^a

	W2 - W1	W3 - W1	W4 - W1	W3 - W2	W4 - W2	W4 - W3
Z	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b
Asymp. Sig. (2-tailed)	,028	,028	,028	,028	,028	,028

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on positive ranks.

(b)

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	18,000
df	3
Asymp. Sig.	,000

a. Friedman Test

(c)

Test Statistics^a

	W2 - W1	W3 - W1	W4 - W1	W3 - W2	W4 - W2	W4 - W3
Z	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^b
Asymp. Sig. (2-tailed)	,028	,028	,028	,028	,028	,028

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on positive ranks.

(d)

Şekil 6.4: Kış ve yaz mevsiminde her bir atıksu numunesi alma noktasındaki (W1, W2, W3 ve W4) toplam mikroplastik konsantrasyonları yapılan Friedman testi (a-c) ve Wilcoxon işaretli sıra testi (b-d) sonuçları

Kış aylarında ham atıksuda toplam mikroplastik konsantrasyonları ortalama olarak 4979 MP/L bulunmuştur. Arıtma tesisinde bulunan her bir arıtma ünitesinde mikroplastiklerin yüksek verimlerle giderildiği gözlemlenmiştir. Kum tutucu (W2), ön çökeltim havuzu (W3) ve arıtılmış atıksuda (W4) mikroplastik giderim verimleri sırasıyla %16,33, %66,42 ve %82,44 olarak hesaplanmıştır. Arıtılmış atıksuda (W4) ise ortalama mikroplastik konsantrasyonu 246 MP/L olup atıksu arıtma tesisinin toplam mikroplastik giderme verimi ise %95,07 hesaplanmıştır. Yaz aylarında ise ham

atıksuda bulunan mikroplastik konsantrasyonu ortalama 3938 MP/L'dir. Kum tutucu (W2), ön çökeltim havuzunda (W3) ve arıtılmış atıksuda (W4) mikroplastik giderim verimleri sırasıyla %20,07, %88,41 ve %55,07 olarak hesaplanmıştır. Arıtılmış atıksuda (W4) ise ortalama mikroplastik konsantrasyonu 164 MP/L olup atıksu arıtma tesisinin toplam mikroplastik giderme verimi ise %95,84 hesaplanmıştır (Tablo 6.1). Yaz ile kış mevsimi arasındaki atıksulardaki mikroplastik konsantrasyonları açısından farklılıkları analiz etmek amacıyla Wilcoxon işaretli sıra testi uygulanmıştır. Yapılan test sonucunda yaz ile kış mevsimi arasında proseslerdeki mikroplastik konsantrasyonları açısından istatistiki olarak anlamlı bir farklılık elde edilmemiştir ($p=0,068$; $p>0,05$). Mevsimsel değişiklik, atıksularda bulunan mikroplastik konsantrasyonlarında farklılığa yol açmıştır. Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde, kış aylarındaki mikroplastik kirliliğinin yaz aylarına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Kış mevsiminde Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'ne gelen ham atıksuyun debisi yaz aylarına kıyasla ortalama %39,54 daha yüksektir. Yağışların fazla olması ile yüzeysel akışın artması da mikroplastik konsantrasyonuna etki eden önemli bir faktördür. Kurak mevsim olan yaz aylarında ise yüzeysel akışın az olması nedeniyle mikroplastiklerin özellikle evsel kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir (Ben-David ve diğ. 2021). Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde her iki mevsimde de toplam mikroplastik giderim verimleri birbirine çok yakın olup %95'in üzerinde gerçekleşmiştir.

Tablo 6.1: Kış ve yaz aylarında atıksularda tespit edilen mikroplastik giderim verimleri

Mevsim	Kum Tutucu Çıkışı (W2)	Ön Çökeltim Havuzu Çıkışı (W3)	Son Çökeltim Havuzu Çıkışı (W4)	Toplam Giderme Verimi (%)
Kış	%16,33	%66,42	%82,44	%95,07
Yaz	%20,07	%88,41	%55,07	%95,84

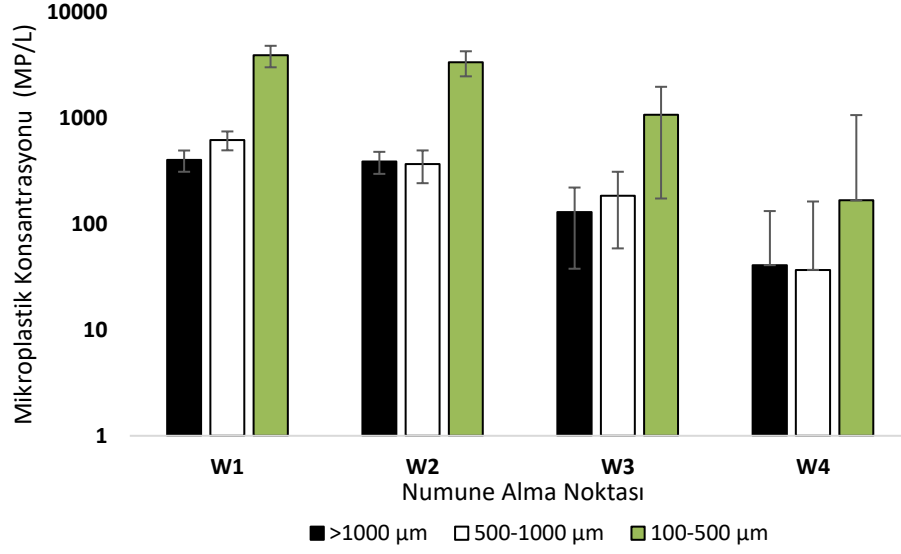
6.1.1 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Boyut Analizi

Tez çalışması kapsamında, mikroplastiklerin boyut analizinin yapılabilmesi için gözenek boyutları 1000 μm , 500 μm ve 100 μm olan üç farklı boyutta elek kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, mikroplastik sayılarının boyutlara göre sıralaması 100-500 μm , 500-1000 μm , 1000 μm şeklinde belirlenmiştir. Kış ve yaz aylarında analiz edilen örneklerdeki boyut dağılımı Tablo 6.2'de özetlenmiştir. Şekil

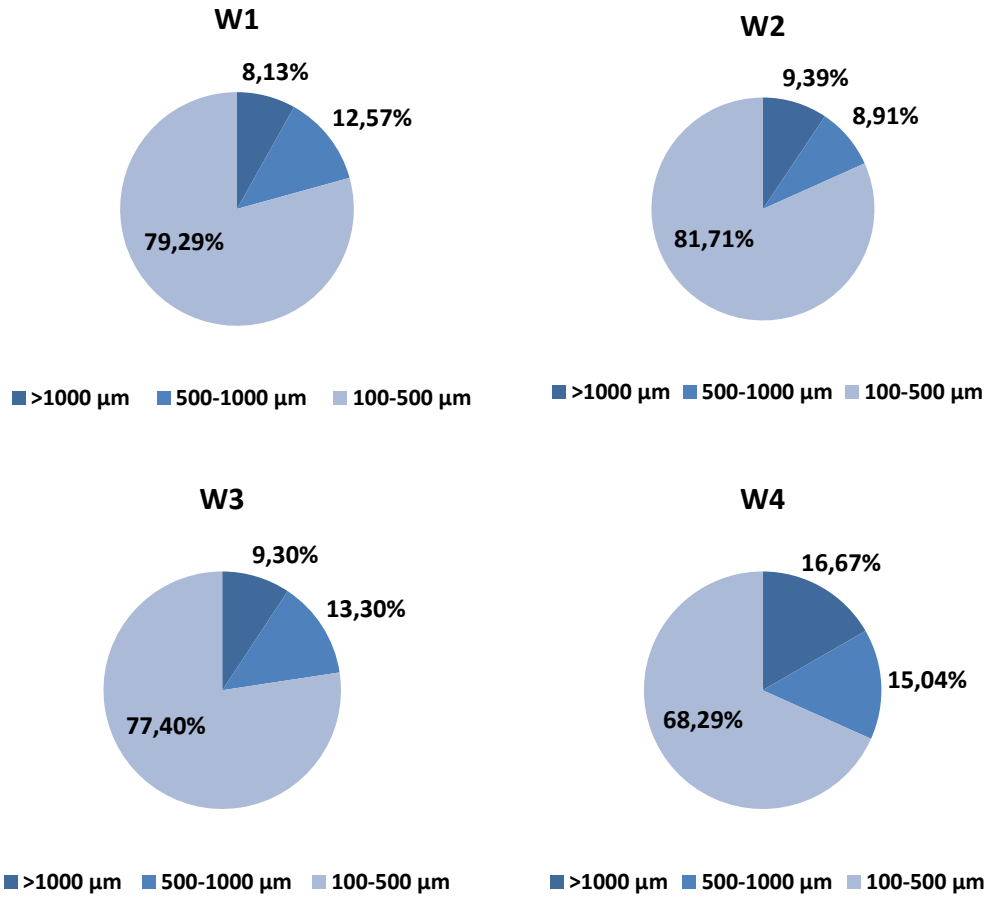
6.5’de kış mevsimi süresince analizlenen tüm atıksu numunelerinde (W1, W2, W3 ve W4) tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarının boyutlara göre dağılımı verilmektedir. Şekil 6.6’da ise kış mevsiminde atıksu numunelerinde gözlemlenen mikroplastiklerin yüzde olarak boyut dağılımı verilmiştir. Boyutu >1000 µm olan mikroplastiklerin dağılımı W1, W2, W3 ve W4 numuneleri için sırasıyla %8,13, %9,39, %9,30 ve %16,67 olarak bulunurken, boyutu 500-1000 µm olan mikroplastiklerin dağılımı sırasıyla %12,57, %8,91, %13,30 ve %15,04 olarak belirlenmiştir. Tüm atıksu numunelerinde en fazla sayıda bulunan mikroplastik boyutu 100-500 µm’dir ve bu boyut aralığındaki dağılım sırasıyla %79,29, %81,71, %77,40 ve %68,29 olarak hesaplanmıştır. Yapılan Friedman testi sonucuna göre, kış mevsiminde mikroplastik konsantrasyonları her bir boyut aralığı için farklı numune alma noktalarında ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$). 100-500 µm, 500-1000 µm ve 1000 µm boyutundaki mikroplastik konsantrasyonları her bir numune alma noktasında anlamlı olarak azalmaktadır (Şekil 6.7).

Tablo 6.2: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Boyut Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)
		>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	
Kış	W1	405 MP/L (%8,13)	626 MP/L (%12,57)	3948 MP/L (%79,29)	4979 (%100)
	W2	391 MP/L (%9,39)	371 MP/L (%8,91)	3404 MP/L (%81,71)	4166 (%100)
	W3	130 MP/L (%9,30)	186 MP/L (%13,30)	1082 MP/L (%77,40)	1399 (%100)
	W4	41 MP/L (%16,67)	37 MP/L (%15,04)	168 MP/L (%68,29)	246 (%100)
Yaz	W1	391 MP/L (%9,93)	548 MP/L (%13,92)	2999 MP/L (%76,16)	3938 (%100)
	W2	285 MP/L (%9,06)	451 MP/L (%14,33)	2411 MP/L (%76,61)	3148 (%100)
	W3	45 MP/L (%12,36)	59 MP/L (%16,21)	260 MP/L (%71,43)	365 (%100)
	W4	20 MP/L (%12,20)	29 MP/L (%17,68)	115 MP/L (%70,12)	164 (%100)



Şekil 6.5: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi



Şekil 6.6: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı

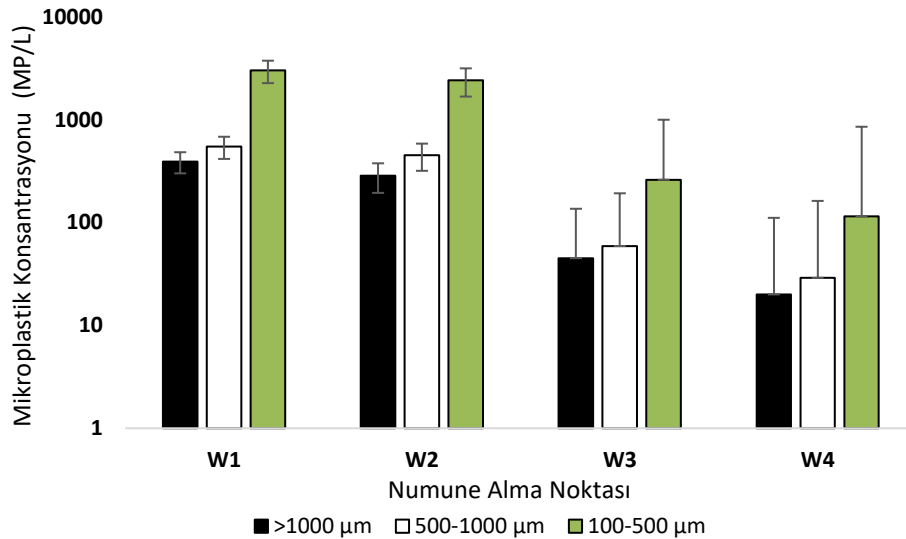
Test Statistics^a

N	3
Chi-Square	9,000
df	3
Asymp. Sig.	,029

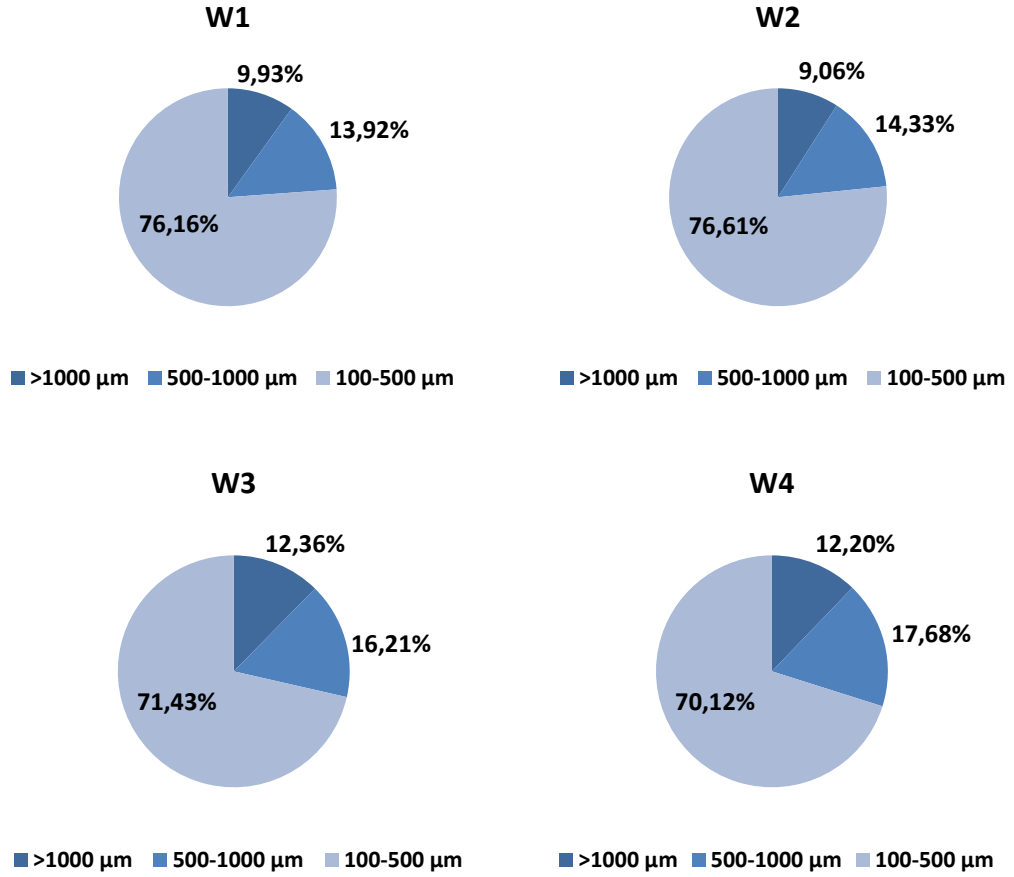
a. Friedman Test

Şekil 6.7: Kış mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Yaz aylarında gerçekleştirilen boyut analizi deneylerinde mikroplastiklerin konsantrasyonları Şekil 6.8’de verilmiştir. Kış aylarındaki sonuçlara benzer şekilde, tüm atıksu numunelerinde baskın mikroplastik boyutu 100-500 µm’dir (W1: %76,16, W2: %76,61, W3: %71,43 ve W4: %70,12). Boyutu 500-1000 µm olan mikroplastiklerin oranı %13,92-%17,68 arasında değişirken, boyutu >1000 µm olan mikroplastiklerin oranı %9,06-%12,36 arasında değişmektedir (Şekil 6.9). Friedman testi sonucuna göre, mikroplastik konsantrasyonları her bir boyut aralığı için farklı numune alma noktalarında ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$). Boyutları 100-500 µm, 500-1000 µm ve 1000 µm olan mikroplastik konsantrasyonları her bir numune alma noktasında anlamlı olarak azalmaktadır (Şekil 6.10). Özetle arıtma tesisindeki her bir arıtma kademesi farklı boyuttaki mikroplastikleri etkili bir şekilde gidermektedir.



Şekil 6.8: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi



Şekil 6.9: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı

Test Statistics^a

N	3
Chi-Square	9,000
df	3
Asymp. Sig.	,029

a. Friedman Test

Şekil 6.10: Yaz mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Bu tez çalışmasındaki sonuçlara benzer şekilde, Naji ve diğ. (2021) 0,003-0,05 mm, 0,05-1,0 mm ve 1,0-1,5 mm olmak üzere üç farklı boyut aralığında mikroplastik analizi yapmışlardır. Çalışmanın sonuçları, en küçük boyuttaki mikroplastiklerin konsantrasyonlarının diğer boyuttakilerin %90'nı oluşturduğunu ortaya koymuştur. Mintenig ve diğ. (2017) arıtılmış atıksularda tespit ettikleri mikroplastiklerin çoğunluğu (ortalama %59,2) 50-100 µm boyutlarında olup, yalnızca %8,5 oranında mikroplastiklerin 200 µm'den büyük olduğunu rapor etmişlerdir. Boyut küçüldükçe mikroplastik konsantrasyonlarının artmasının bir nedeni olarak, daha büyük boyutlu

plastiklerin kanalizasyon sisteminde taşınması sırasında veya arıtma kademelerinde parçalanması olabileceği düşünülmektedir (Franco ve diğ. 2021). Mikroplastiklerin boyutu özellikle alıcı ortamdaki canlılar üzerine potansiyel zararlarından dolayı büyük önem kazanmaktadır (P. He ve diğ. 2019). Daha küçük boyuttaki mikroplastikler çeşitli organizmalar tarafından daha kolay tüketilebilir olmanın yanı sıra, yüzey alanının artması ortamda bulunması muhtemel diğer kirleticileri (poliklorlu bifeniller, metaller, antibiyotikler, kalıcı organik kirleticiler ve patojenik organizmalar) adsorbe etme kapasitesini artıran bir faktördür (Naji ve diğ. 2021).

Tablo 6.3'te farklı Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde bulunan farklı arıtma kademelerinin farklı boyuttaki mikroplastiklerin kış ve yaz aylarındaki giderimine etkisi incelenmiştir. Mikroplastiklerin giderim verimleri tesisin arıtma kademelerinde farklılık göstermektedir. Kış aylarında gerçekleştirilen analizlerde, boyutu >1000 µm olan mikroplastikler kum tutucu ünitesinde %3,37 oranında giderilmiştir. %40,79 ile ön çökeltim havuzunda daha yüksek oranda giderim sağlanmış olup son çökeltim havuzunda ise %68,93 giderilmiştir. Boyutu 500-1000 µm olan mikroplastiklerin ise daha büyük boyutlu mikroplastiklerden daha yüksek oranda giderimi (W2: %40,79; W3: %49,73, W4: %80,14) sağlanmıştır. Atıksulardan en yüksek oranda giderilen mikroplastiklerin boyutu 100-500 µm olup W2, W3 ve W4 noktalarında giderim verimleri sırasıyla %13,78, %68,20 ve %84,46 olarak bulunmuştur. Yaz aylarında gerçekleştirilen analizlerde ise, boyutu >1000 µm olan mikroplastikler en yüksek oranda (%27,09) kum tutucu ünitesinde (W2) giderilmiştir. Ön çökeltim havuzunda %84,11 oranında mikroplastik giderimi sağlanmış olup, son çökeltim havuzunda ise mikroplastik giderme verimi %56,25 olarak belirlenmiştir. Boyutu 500-1000 µm olan mikroplastiklerin ise daha büyük boyutlu mikroplastiklerden daha yüksek oranda giderimi (W2: %17,69; W3: %86,85, W4: %50,56) sağlanmıştır. Atıksulardan en yüksek oranda giderilen mikroplastiklerin boyutu 100-500 µm olup W2, W3 ve W4 noktalarında giderim verimleri sırasıyla %19,59, %89,20 ve %55,89 olarak bulunmuştur. Mikroplastik boyutu küçüldükçe tesisin her bir kademesinde giderim verimlerinde artış görülmüştür. Bu durumun nedeni ise, küçük boyutlu mikroplastiklerin sadece fiziksel arıtmanın yanı sıra biyolojik arıtma ünitelerinde de absorbe edilmesi olarak açıklanabilmektedir (Hyesung Lee ve Kim, 2018).

Tablo 6.3: Arıtma kademelerinin farklı boyuttaki mikroplastiklerin giderimine etkisi

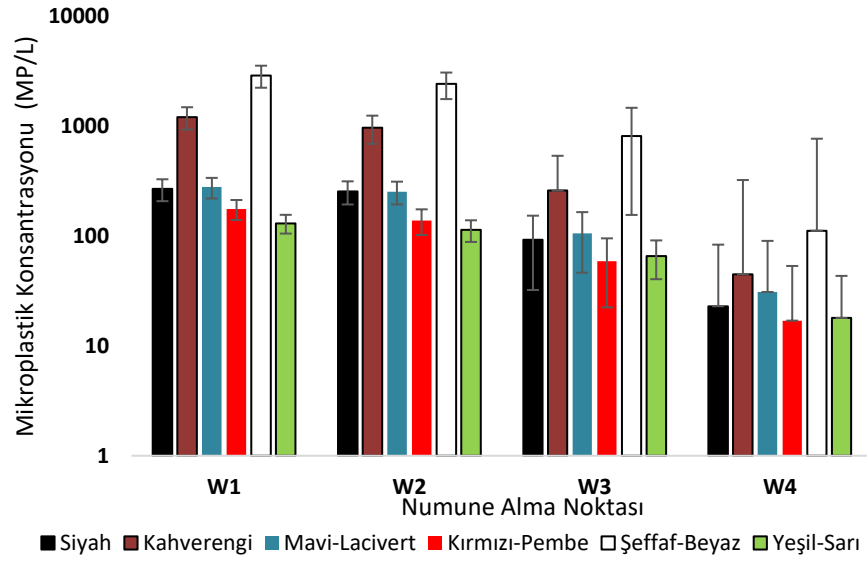
Mevsim	Boyut	Kum Tutucu Çıkışı (W2)	Ön Çökeltim Havuzu Çıkışı (W3)	Son Çökeltim Havuzu Çıkışı (W4)
Kış	>1000 µm	%3,37	%66,70	%68,93
	500-1000 µm	%40,79	%49,73	%80,14
	100-500 µm	%13,78	%68,20	%84,46
Yaz	>1000 µm	%27,09	%84,11	%56,25
	500-1000 µm	%17,69	%86,85	%50,56
	100-500 µm	%19,59	%89,20	%55,89

6.1.2 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Renk Analizi

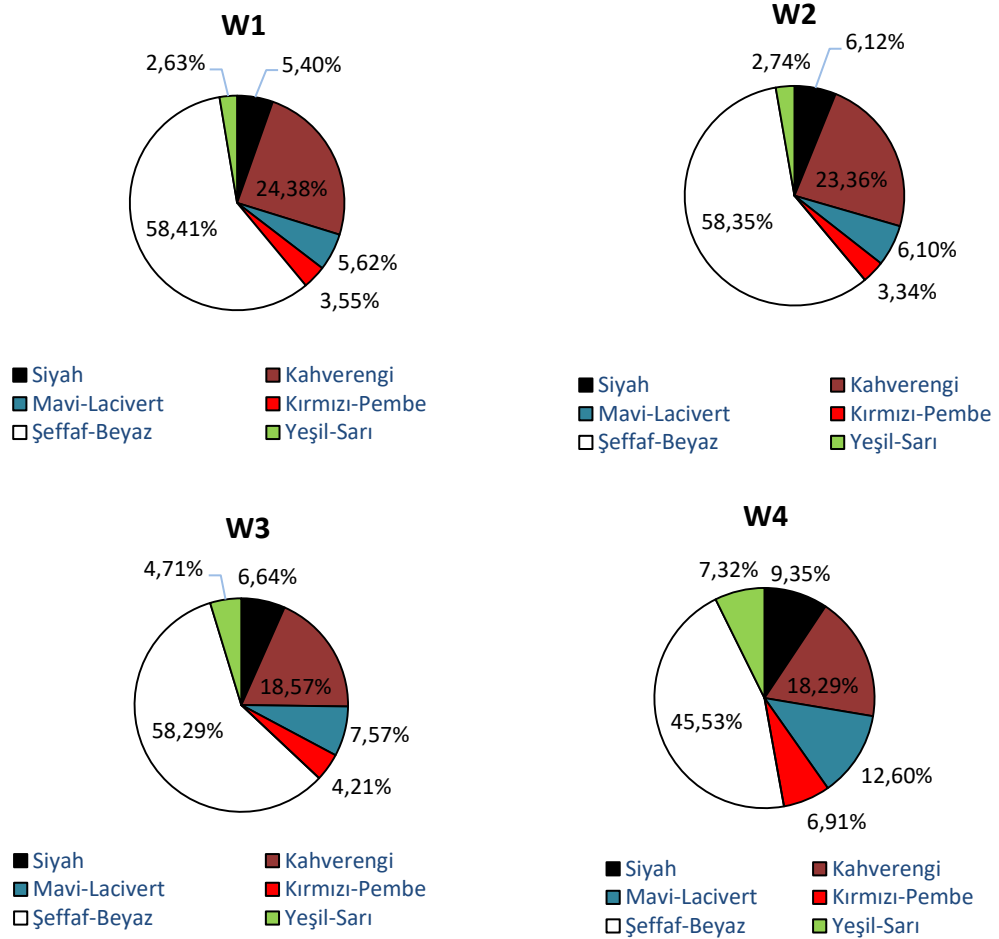
Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi sonuçları Tablo 6.4'te verilmektedir. Mikroplastiklerin renkleri, siyah, kahverengi, mavi-lacivert, kırmızı-pembe, şeffaf-beyaz ve yeşil-sarı olmak üzere 6 farklı kategoride incelenmiştir. Kış aylarını temsil eden numunelerde elde edilen sonuçlara göre, W1 numunesinde mikroplastiklerin renk dağılımı, şeffaf-beyaz> kahverengi> mavi-lacivert> siyah> kırmızı-pembe> yeşil-sarı olarak tespit edilmiştir. W2 numunesinde renk dağılımı şeffaf-beyaz> kahverengi> siyah> mavi-lacivert> kırmızı-pembe> yeşil-sarı olarak belirlenirken W3 ve W4 numunelerinde ise şeffaf-beyaz> kahverengi> mavi-lacivert> siyah> yeşil-sarı> kırmızı-pembe olarak belirlenmiştir (Şekil 6.11). Tüm atıksu numunelerinde baskın görülen mikroplastik renklerinin şeffaf-beyaz (%45,53-%58,41) ve kahverengi (%18,29-%24,38) olduğu görülmüştür. Renk kategorileri arasında en az rastlanan mikroplastik renkleri ise yeşil-sarı (%2,63-%7,32) ve kırmızı-pembe (%3,34-%6,91) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.12). Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları her bir renk için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde numune alma noktaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen renklere mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklılaşmaktadır (Şekil 6.13).

Tablo 6.4: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Renk Analizi						Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)
		Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	
Kış	W1	269 MP/L (%5,40)	1214 MP/L (%24,38)	280 MP/L (%5,62)	177 MP/L (%3,55)	2908 MP/L (%58,41)	131 MP/L (%2,63)	4979 (%100)
	W2	255 MP/L (%6,12)	973 MP/L (%23,36)	254 MP/L (%6,10)	139 MP/L (%3,34)	2431 MP/L (%58,35)	114 MP/L (%2,74)	4166 (%100)
	W3	93 MP/L (%6,64)	260 MP/L (%18,57)	106 MP/L (%7,57)	59 MP/L (%4,21)	816 MP/L (%58,29)	66 MP/L (%4,71)	1399 (%100)
	W4	23 MP/L (%9,35)	45 MP/L (%18,29)	31 MP/L (%12,60)	17 MP/L (%6,91)	112 MP/L (%45,53)	18 MP/L (%7,32)	246 (%100)
Yaz	W1	20 MP/L (%0,51)	319 MP/L (%8,10)	149 MP/L (%3,78)	106 MP/L (%2,69)	3294 MP/L (%83,65)	50 MP/L (%1,27)	3938 (%100)
	W2	14 MP/L (%0,44)	271 MP/L (%8,61)	119 MP/L (%3,78)	92 MP/L (%2,92)	2610 MP/L (%82,91)	42 MP/L (%1,33)	3148 (%100)
	W3	9 MP/L (%2,47)	31 MP/L (%8,49)	36 MP/L (%9,86)	20 MP/L (%5,48)	263 MP/L (%72,05)	6 MP/L (%1,64)	365 (%100)
	W4	2 MP/L (%1,22)	12 MP/L (%7,32)	15 MP/L (%9,15)	9 MP/L (%5,49)	122 MP/L (%74,39)	4 MP/L (%2,44)	164 (%100)



Şekil 6.11: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi



Şekil 6.12: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı

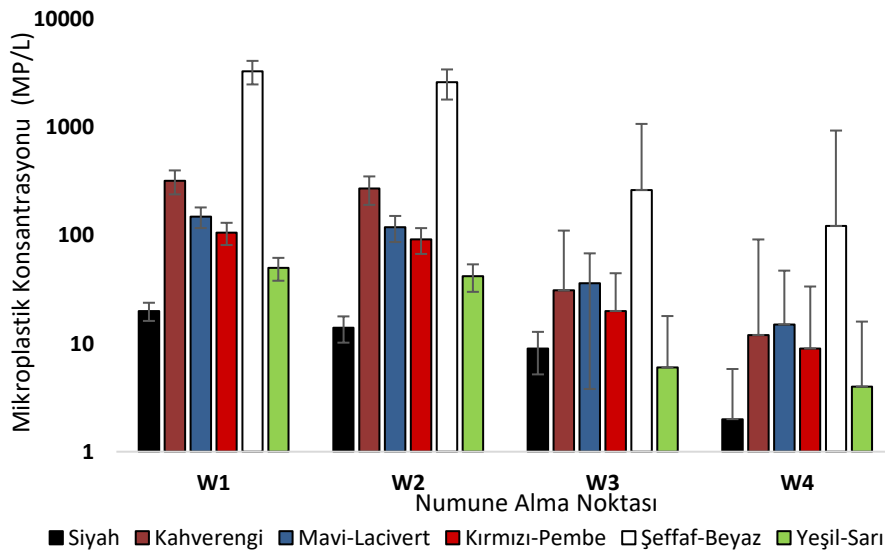
Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	18,000
df	3
Asymp. Sig.	,000

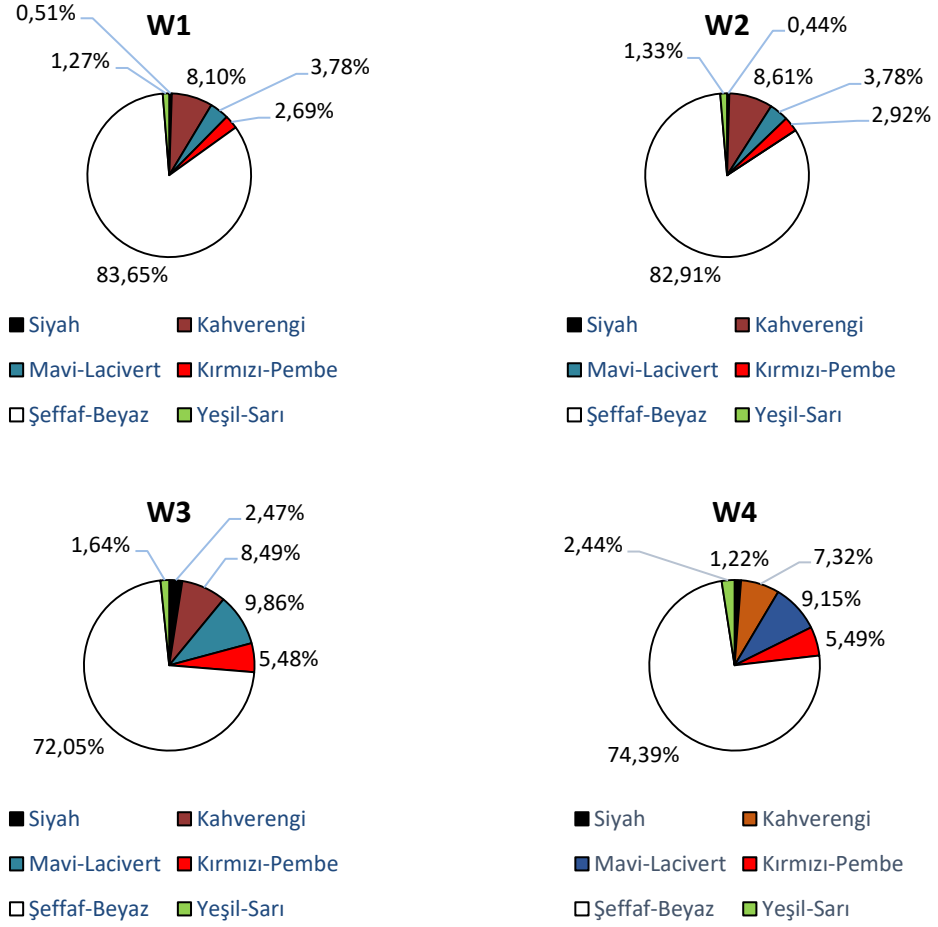
a. Friedman Test

Şekil 6.13: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Yaz aylarını temsil eden numunelerde elde edilen sonuçlara göre, W1 ve W2 numunelerinde mikroplastiklerin renk dağılımı sırasıyla şeffaf-beyaz>kahverengi>mavi-lacivert>kırmızı-pembe>yeşil-sarı>siyah olarak tespit edilmiştir. W3 numunesinde bu dağılım şeffaf-beyaz>kahverengi>mavi-lacivert>kırmızı-pembe> siyah> yeşil-sarı iken W4 numunesinde ise mikroplastiklerin renk dağılımı şeffaf-beyaz>mavi-lacivert>kahverengi >siyah>kırmızı-pembe>yeşil-sarı olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.14). Baskın mikroplastik rengi şeffaf-beyaz (%71,96-%83,65) olarak elde edilmiştir. W1, W2 ve W4 numunelerinde en az rastlanan mikroplastik rengi ise siyah (%0,51, %0,44 ve %1,32) iken W3 numunesinde yeşil-sarı (%1,74) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.15). Yaz mevsiminde elde edilen renk verilerine uygulanan Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları her bir renk için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$) (Şekil 6.16).



Şekil 6.14: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi



Şekil 6.15: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	18,000
df	3
Asymp. Sig.	,000

a. Friedman Test

Şekil 6.16: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Tez çalışması kapsamında elde edilen renk analizi verilerine benzer şekilde, 2017 yılında yayınlanan bir çalışmada Almanya’da bulunan 12 farklı atıksu arıtma tesisinde tespit edilen mikroplastiklerin çoğunluğunun (%61) şeffaf renkli liflerden oluştuğu görülmüştür (Mintenig ve diğ. 2017). B. Xu ve diğ. (2020) mikroplastikleri 10 farklı renk kategorisinde incelemişlerdir. Ham atıksuda en yüksek oranda tespit edilen renk şeffaf (%58,54) iken en nadir rastlanan renkler ise toplam %10,58’lik oranda kahverengi, mavi ve kırmızı olmuştur. Tez çalışması kapsamında, alınan tüm

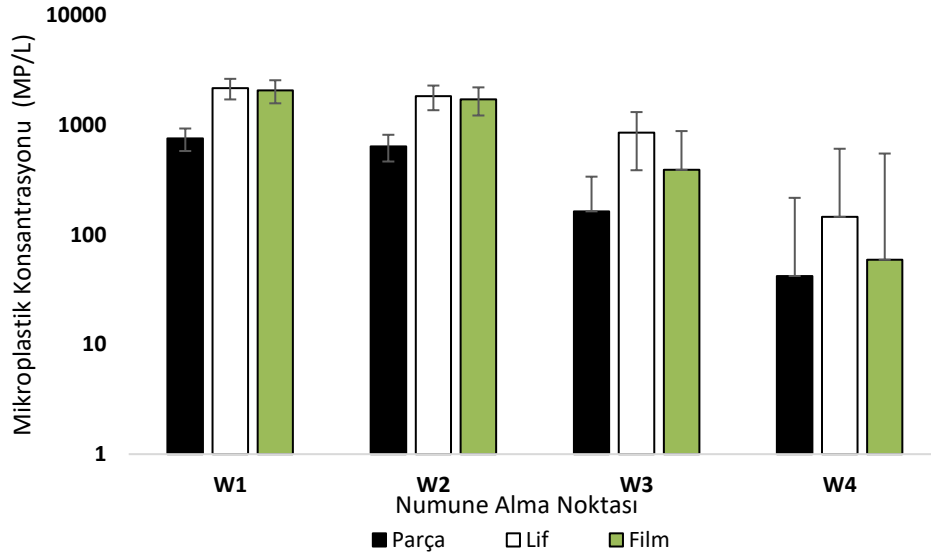
atıksu numunelerinde çeşitli renklerde mikroplastikler gözlemlenmiş olmakla birlikte, en sık gözlemlenen renk şeffaf-beyazdır. Mikroskop altında gerçekleştirilen renk sınıflandırması ile mikroplastiklerin kaynaklarının tahmini kolaylaşmakta olup, renk çeşitliliği, mikroplastiklerin farklı kaynaklardan geldiğinin bir göstergesidir (Ruan ve diğ. 2019). Şeffaf renkli mikroplastiklerin genellikle tek kullanımlık ve kısa ömürlü plastik poşetler, tek kullanımlık plastik bardaklar ve şişeler gibi plastiklerden kaynaklandığı bilinmektedir (L. Yang vd., 2021). Ayrıca, Carr ve diğ. (2016) yaptıkları bir çalışmada atıksu numunelerinde tespit ettikleri mavi polietilen parçacıkların dış macunlarından izole edilen parçacıklarla aynı olduklarını keşfetmişlerdir. Ancak birincil mikroplastik olarak adlandırılan ve dış macunlarında bulunan mikroplastiklerin kaynağını tespit etmek nispeten kolay olsa da, ikincil mikroplastikler için bu durum daha karmaşıktır (Minteniğ ve diğ. 2017).

6.1.3 Atıksu Numunelerinde Mikroplastiklerin Şekil Analizi

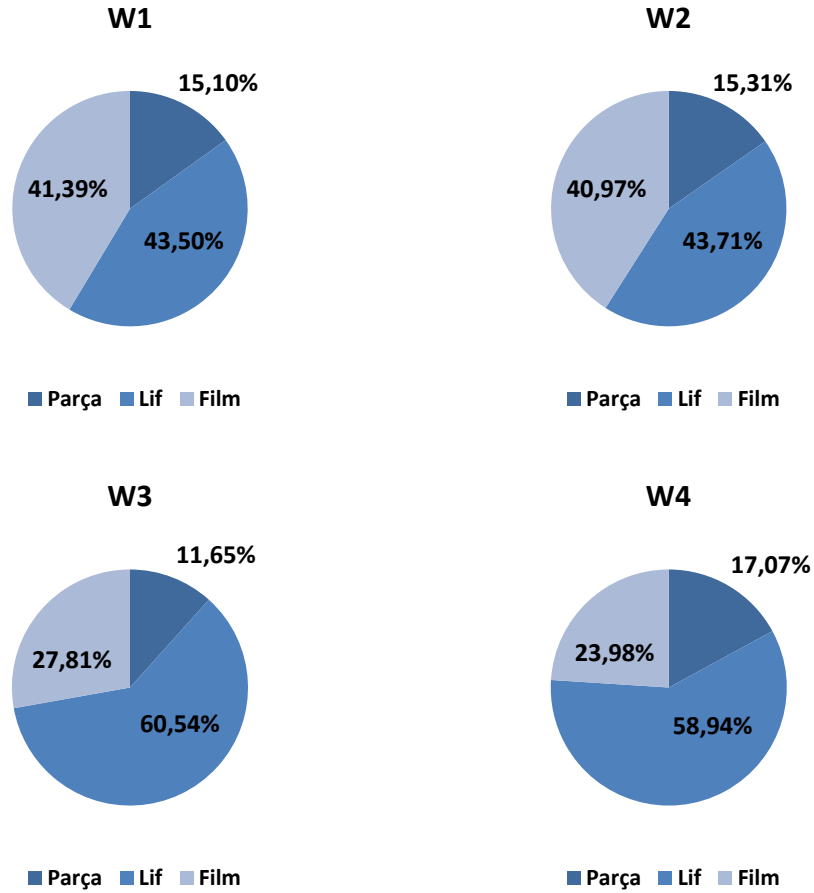
Atıksu numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi sonuçları Tablo 6.5'te verilmektedir. Şekil analizi parça, lif ve film olmak üzere 3 farklı kategoride incelenmiştir. Kış aylarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, tüm atıksu numunelerinde gözlenen baskın şekil liflerdir (%43,50-%60,54). Mikroplastikler şekillerine göre sınıflandırıldığında diğer baskın tür olarak filmler (%23,98-%41,39) dikkat çekmektedir. Şekil kategorileri arasından en az rastlanan mikroplastik şekli ise parça (%11,65-%17,07) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.17-Şekil 6.18). Kış mevsiminde elde edilen verilere uygulanan Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları farklı şekiller (parça, film, lif) için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$) (Şekil 6.19). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen şekillerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklılaşmaktadır.

Tablo 6.5: Atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)
		Parça	Lif	Film	
Kış	W1	752 MP/L (%15,10)	2166 MP/L (%43,50)	2061 MP/L (%41,39)	4979 (%100)
	W2	638 MP/L (%15,31)	1821 MP/L (%43,72)	1707 MP/L (%40,97)	4166 (%100)
	W3	163 MP/L (%11,68)	847 MP/L (%60,54)	389 MP/L (%27,78)	1399 (%100)
	W4	42 MP/L (%17,03)	145 MP/L (%59,02)	59 MP/L (%23,95)	246 (%100)
Yaz	W1	574 MP/L (%14,57)	2332 MP/L (%59,21)	1032 MP/L (%26,21)	3938 (%100)
	W2	462 MP/L (%14,69)	1686 MP/L (%53,55)	1000 MP/L (%31,77)	3148 (%100)
	W3	32 MP/L (%8,68)	267 MP/L (%73,06)	67 MP/L (%18,26)	365 (%100)
	W4	12 MP/L (%7,22)	124 MP/L (%75,61)	28 MP/L (%17,17)	164 (%100)



Şekil 6.17: Kış mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi



Şekil 6.18: Kış mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı

Test Statistics^a

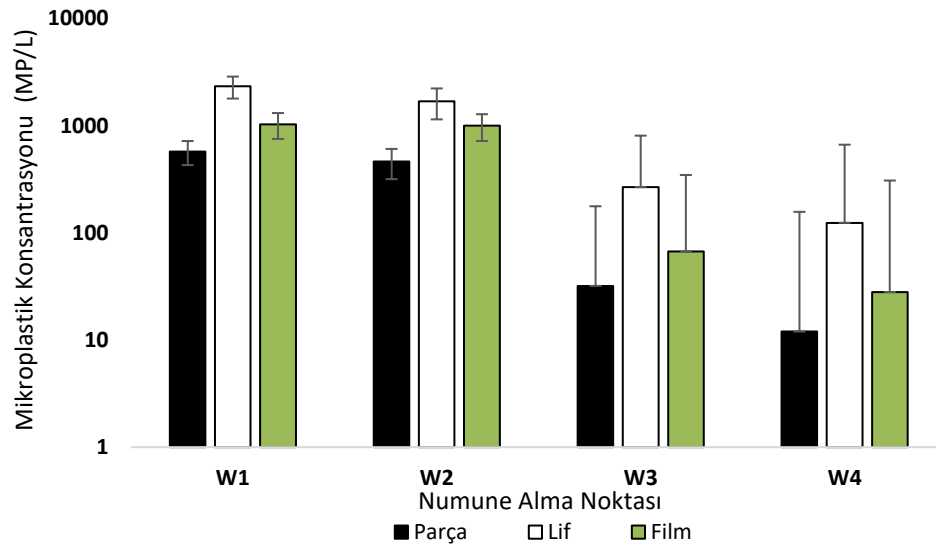
N	3
Chi-Square	9,000
df	3
Asymp. Sig.	,029

a. Friedman Test

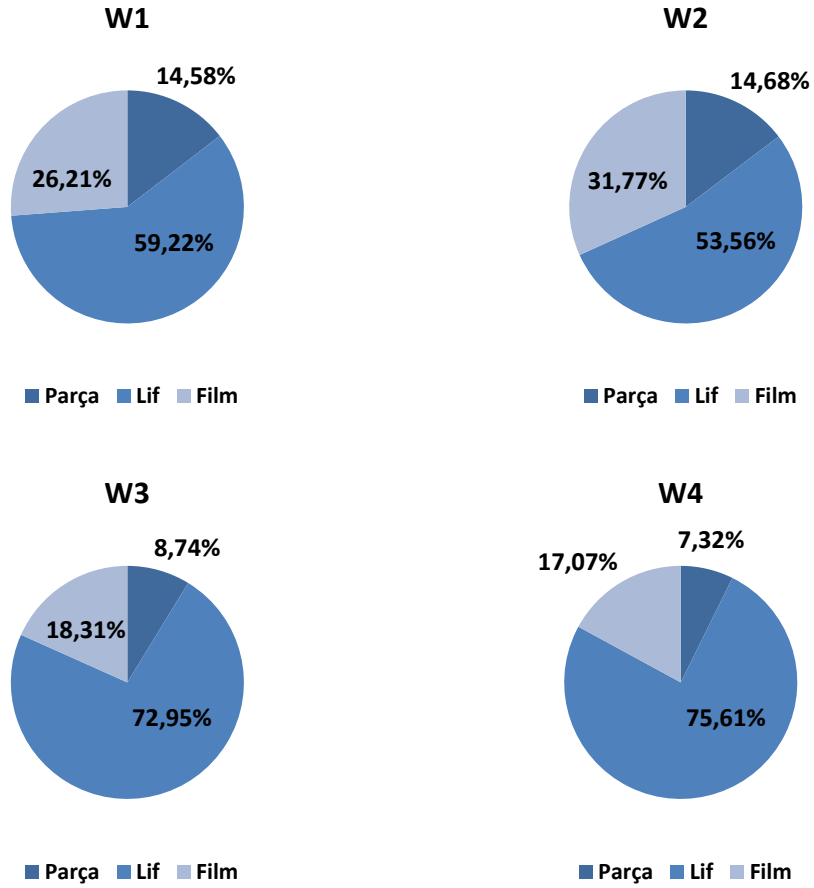
Şekil 6.19: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Yaz aylarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre kış aylarındaki sonuçlara benzer şekilde, tüm atıksu numunelerinde gözlemlenen sıralama lif > film > parça şeklindedir. Baskın mikroplastik şekli olan lifler W1, W2, W3 ve W4 numunelerinde sırası ile %59,22, %53,56, %72,95 ve %75,61 bulunmuştur. Mikroplastikler şekillerine göre sınıflandırıldığında, diğer baskın tür olarak filmler (%17,07-%31,77) dikkat çekmektedir. Şekil kategorileri arasından en az rastlanan mikroplastik şekli ise parça (%7,32-%14,68) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.20-6.21). Friedman testine

göre, mikroplastik konsantrasyonları farklı şekiller (parça, film, lif) için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde farklı numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$) (Şekil 6.22). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen şekillerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklılaşmaktadır.



Şekil 6.20: Yaz mevsiminde atıksularda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi



Şekil 6.21: Yaz mevsiminde W1, W2, W3 ve W4 noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı

Test Statistics^a

N	3
Chi-Square	9,000
df	3
Asymp. Sig.	,029

a. Friedman Test

Şekil 6.22: Yaz mevsiminde tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Ziajahromi ve diğ. (2021) Avusturalya’da bulunan üç farklı atıksu arıtma tesisine ait atıksularda mikroplastik varlığını araştırdıkları bir çalışmada izole ettikleri mikroplastik şekilleri arasında (lif, parça, granül) basın şeklin %49-88 oranları arasında lif olduğunu tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, Almanya’da gerçekleştirilen bir çalışmada arıtılmış atıksularında fiber şeklindeki mikroplastiklerin yoğun olduğu görülmüştür (Mintenig ve diğ. 2017). 2021 yılında İspanya’da gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise iki farklı atıksu arıtma tesisinden alınan atıksu numunelerinde en yüksek oranda (%40) lif şeklindeki mikroplastikler bulunmuştur (Franco ve diğ.

2021). Literatürde incelenen pek çok çalışmada da baskın mikroplastik şekli lif olarak rapor edilmiştir (Blair ve diğ. 2019; Franco ve diğ. 2021; Gies ve diğ. 2018; X. Xu ve diğ. 2019). Atıksu arıtma tesislerinde tespit edilen liflerin asıl kaynağı tekstil ürünlerinden ve çamaşır makinelerinden salınan liflerle açıklanabilmektedir (Franco ve diğ. 2021). Çünkü tek bir kıyafetin dahi yalnızca bir yıkamayla yaklaşık 1900 adet lifinin kanalizasyon sistemine salınabileceği gösterilmiştir (Browne ve diğ. 2011). Film ve parça şeklindeki mikroplastikler ise günlük yaşamda kullanılan plastiklerden parçalanarak, endüstriyel üretim ve ambalajların parçalanmasından kaynaklanabilmektedir (X. Xu ve diğ. 2019).

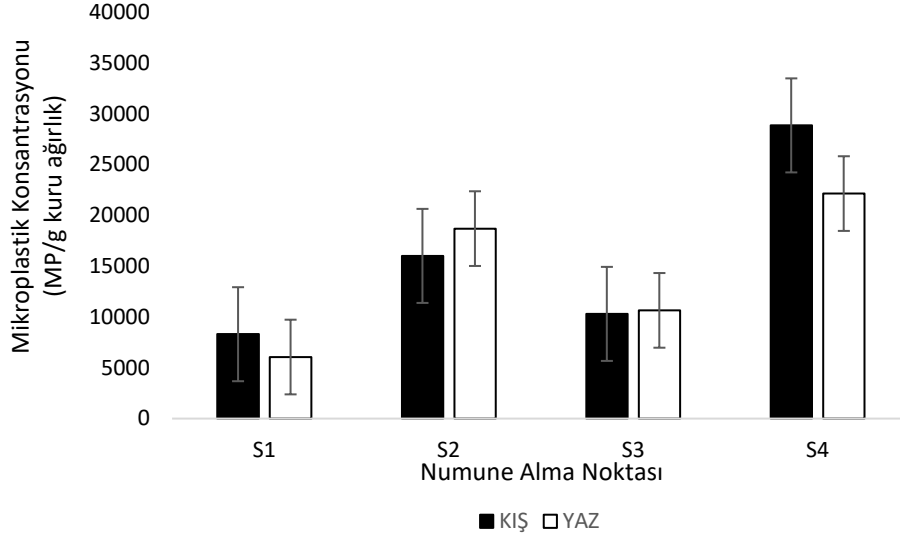
Tablo 6.6'da Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde bulunan farklı arıtma kademelerinin farklı şekillerdeki mikroplastiklerin kış ve yaz aylarındaki giderimine etkisi incelenmiştir. Mikroplastiklerin giderim verimleri tesisin arıtma kademelerinde farklılık göstermektedir. Kış aylarında gerçekleştirilen analizlerde, kum tutucu ünitesinde parça şeklindeki mikroplastikler %15,16 oranında giderilmiş olup lif ve film şeklindeki mikroplastikler ise sırasıyla %15,91 ve %17,19 oranında giderilmiştir. Ön çökeltim havuzunda bu oranlar parça, lif ve film şeklindeki mikroplastikler için sırasıyla %74,40, %53,50 ve %77,23 olarak tespit edilmiştir. Mikroplastiklerin şekillerine göre en yüksek giderim verimleri (parça: %74,39; lif: %82,88; film: %84,86) son çökeltim havuzunda (W4) elde edilmiştir. Yaz aylarında gerçekleştirilen analizlerde ise, parça şeklinde olan mikroplastikler en yüksek oranda (%93,15) ön çökeltim havuzunda (W3) giderilmiştir. %19,45 kum tutucu ünitesinde giderim sağlanmış olup son çökeltim havuzunda ise %62,63 giderilmiştir. Lif şeklindeki mikroplastikler arıtma kademelerinde sırasıyla W2, W3 ve W4 noktalarındaki giderim verimleri sırasıyla %27,72, %84,18 ve %53,50 oranda giderimi sağlarken, film şeklindeki mikroplastikler ise sırasıyla W2: %3,13; W3: %93,33, W4: %57,75 oranında giderim sağlanmıştır.

Tablo 6.6: Mikroplastiklerin şekillerine göre farklı ünitelerde giderim verimleri

Mevsim	Şekil	Kum Tutucu Çıkışı (W2)	Ön Çökeltim Havuzu Çıkışı (W3)	Son Çökeltim Havuzu Çıkışı (W4)
Kış	Parça	%15,16	%74,40	%74,39
	Lif	%15,91	%53,50	%82,88
	Film	%17,19	%77,23	%84,86
Yaz	Parça	%19,45	%93,15	%62,63
	Lif	%27,72	%84,18	%53,50
	Film	%3,13	%93,33	%57,75

6.2 Arıtma Çamurlarında Tespit Edilen Mikroplastikler

Arıtma çamuru numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin toplam konsantrasyonları bu bölümde verilmiştir. Ayrıca tespit edilen mikroplastikler boyut, renk ve şekline göre kategorize edilmiştir. Bu bölüm altında verilen tüm tablo ve grafikler Ekler bölümünde verilen ham verilerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Mikroplastik konsantrasyonları gram (g) kuru çamur ağırlığı başına mikroplastik sayısı (MP/g kuru ağırlık) olarak hesaplanmıştır. S1 numunesi havalandırma havuzu çıkışından alınmış olup, atıksulardan daha yoğun kirlilik içerdiği için arıtma çamuru olarak bu bölümde değerlendirilmiştir. S2 numunesi ise ön çökeltim ve son çökeltim havuzlarından gelen atık çamurların karışımından alınmıştır. S3 numunesi anaerobik çürütücü çıkışından alınmıştır. S4 numunesi ise çamur kekini ifade etmektedir. Şekil 6.23 kış ve yaz aylarında arıtma çamuru numunelerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarını göstermektedir. Mikroplastiklerin konsantrasyon yoğunluğu hem kış hem de yaz aylarında $S4 > S2 > S3 > S1$ olarak sıralanabilir (Şekil 6.23).



Şekil 6.23: Kış ve yaz aylarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu

Elde edilen sonuçlara göre mikroplastiklerin konsantrasyonları her bir numune alma noktasında farklılık göstermektedir. İki farklı mevsimde de her bir arıtma çamuru numune alma noktasındaki (S1, S2, S3 ve S4) toplam mikroplastik konsantrasyonları yapılan Friedman testi ile istatistiki olarak anlamlı bir fark bulunmuştur ($p < 0,05$). Bu farkların detaylı incelemesi için Wilcoxon işaretli sıra testi yapılmış ve her bir numune alma noktası çifti arasındaki fark incelenmiştir. Kış mevsimine ait mikroplastik konsantrasyonları S2-S1, S3-S1, S3-S2 ve S4-S2 nokta çiftleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmazken ($p > 0,05$) S4-S1 ve S4-S3 nokta çiftleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmuştur ($p < 0,05$) (Şekil 6.24). Yaz mevsimine ait mikroplastik konsantrasyonları ise her bir numune alma noktası çifti arasında istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p < 0,05$) (Şekil 6.24).

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	9,600
df	3
Asymp. Sig.	,022

a. Friedman Test

(a)

Test Statistics^a

	S2 - S1	S3 - S1	S4 - S1	S3 - S2	S4 - S2	S4 - S3
Z	-1,572 ^b	-,314 ^b	-2,201 ^b	-1,153 ^c	-1,782 ^b	-2,201 ^b
Asymp. Sig. (2-tailed)	,116	,753	,028	,249	,075	,028

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on negative ranks.

c. Based on positive ranks.

(b)

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	16,000
df	3
Asymp. Sig.	,001

a. Friedman Test

(c)

Test Statistics^a

	S2 - S1	S3 - S1	S4 - S1	S3 - S2	S4 - S2	S4 - S3
Z	-2,201 ^b	-1,992 ^b	-2,201 ^b	-2,201 ^c	-1,992 ^b	-2,201 ^b
Asymp. Sig. (2-tailed)	,028	,046	,028	,028	,046	,028

a. Wilcoxon Signed Ranks Test

b. Based on negative ranks.

c. Based on positive ranks.

(d)

Şekil 6.24: Kış (a-b) ve yaz (c-d) mevsiminde her bir arıtma çamuru numunesi alma noktasındaki (S1, S2, S3 ve S4) toplam mikroplastik konsantrasyonlarında yapılan Friedman testi (a-c) ve Wilcoxon İşaretli Sıra Testi (b-d) sonuçları

Kış ile yaz mevsimi arasındaki arıtma çamurlarındaki mikroplastik konsantrasyonları açısından farklılıkları analiz etmek amacıyla yapılan Wilcoxon işaretli sıra testi sonucunda yaz ile kış mevsimi arasında proseslerdeki mikroplastik konsantrasyonları açısından istatistiki olarak anlamlı bir farklılık elde edilmemiştir ($p=0,715$; $p>0,05$).

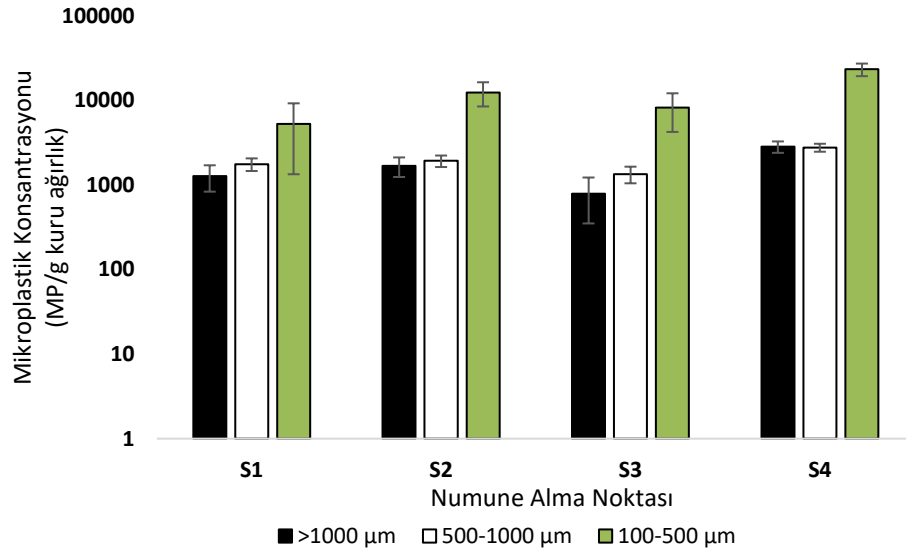
Kış aylarında S1-S2 noktaları arasında mikroplastik konsantrasyonunda %48,13 artış gözlemlenmiştir. S2-S3 noktaları arasında %35,65 oranında azalma görülürken S3-S4 noktaları arasında mikroplastik konsantrasyonu %64,29 artış göstermiştir. Yaz aylarında ise kış aylarındaki sonuçlara benzer şekilde, S1-S2 noktaları arasındaki mikroplastik konsantrasyonunda %67,59 artış gözlemlenmiştir. S2 noktası hem ön çökeltim havuzundan hem de son çökeltim havuzundan gelen çamurların karışımı olması nedeniyle, yalnızca havalandırma havuzundan (S1) alınan örneklerdeki mikroplastik konsantrasyonunun fazla olması öngörülebilir bir durumdur. S2-S3 noktaları arasında %43,03 oranında azalma görülmüştür. Bu azalmanın sebebi ise anaerobik çürüme prosesinde mikroplastiklerin mikrobiyal yolla parçalanması olduğu düşünülmektedir (Mahon ve diğ. 2017). S3-S4 noktaları arasında mikroplastik konsantrasyonu %51,90 artış göstermiştir. Buradaki artış ise anaerobik olarak çürütülmüş çamurun (S3) susuzlaştırılmasıyla elde edilen ve yoğun bir yapı olan çamur keki (S4) haline gelmesi olarak açıklanabilir.

6.2.1 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Boyut Analizi

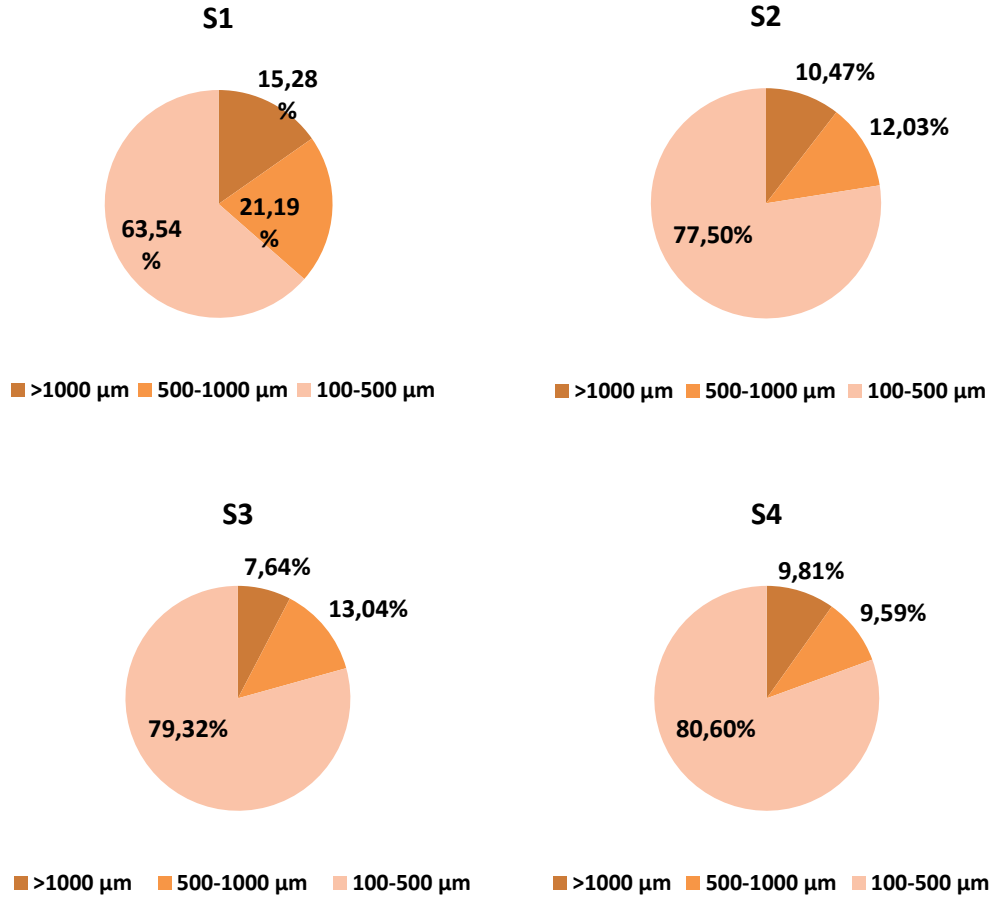
Arıtma çamuru numunelerinde bulunan mikroplastiklerin boyut analizleri, atıksu numuneleri ile aynı elek boyutlarında (1000, 500 ve 100 µm) çalışılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 6.7’de verilmektedir. Kış aylarında gerçekleştirilen mikroplastik boyut analizinde, tüm arıtma çamuru numunelerinde (S1, S2, S3 ve S4) en baskın mikroplastik boyutunun 100-500 µm olduğu görülmüştür (%63,54-%80,60). S1, S2 ve S3 numunelerinde en çok rastlanan diğer bir mikroplastik boyutu 500-1000 µm iken en az rastlanan mikroplastik boyutu ise 1000 µm’dir. S4 numunesinde ise bu sıralamanın 100-500 µm > 1000 µm > 500-1000 µm şeklinde olduğu görülmektedir (Şekil 6.25-6.26). Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları farklı boyutlar için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p < 0,05$) (Şekil 6.27). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen şekillerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklılaşmaktadır.

Tablo 6.7: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Boyut Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/g kuru ağırlık)
		>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	
Kış	S1	1269 MP/g (%15,28)	1760 MP/g (%21,19)	5278 MP/g (%63,54)	8307 (%100)
	S2	1677 MP/g (%10,47)	1926 MP/g (%12,03)	12411 MP/g (%77,50)	16015 (%100)
	S3	787 MP/g (%7,64)	1344 MP/g (%13,04)	8174 MP/g (%79,32)	10306 (%100)
	S4	2833 MP/g (%9,81)	2768 MP/g (%9,59)	23259 MP/g (%80,60)	28860 (%100)
Yaz	S1	1196 MP/g (%19,73)	1488 MP/g (%24,55)	3377 MP/g (%55,72)	6060 (%100)
	S2	1743 MP/g (%9,32)	2463 MP/g (%13,17)	14493 MP/g (%77,51)	18699 (%100)
	S3	700 MP/g (%6,57)	1368 MP/g (%12,77)	8593 MP/g (%80,66)	10653 (%100)
	S4	1768 MP/g (%7,98)	2347 MP/g (%10,60)	18033 MP/g (%81,42)	22149 (%100)



Şekil 6.25: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi



Şekil 6.26: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı

Test Statistics^a

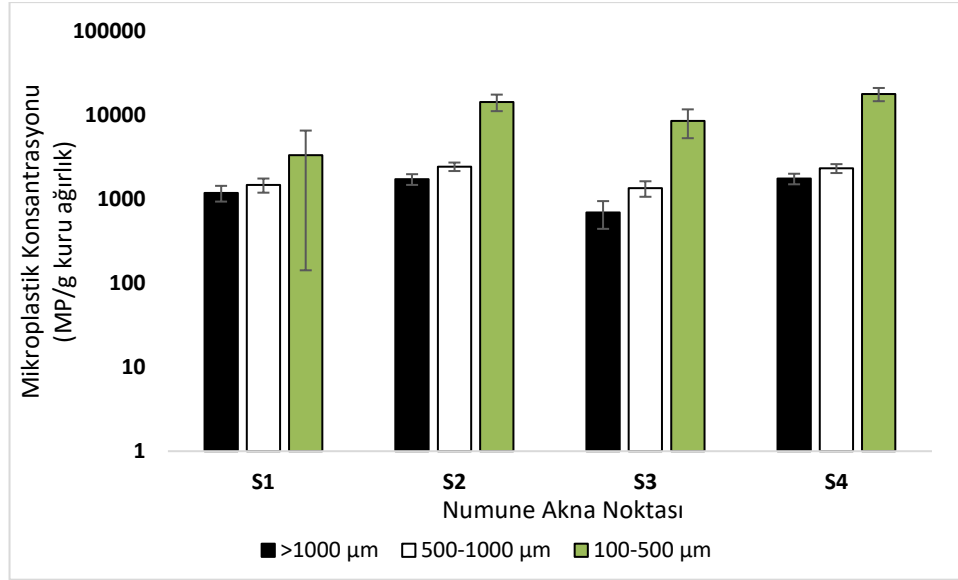
N	3
Chi-Square	8,200
df	3
Asymp. Sig.	,042

a. Friedman Test

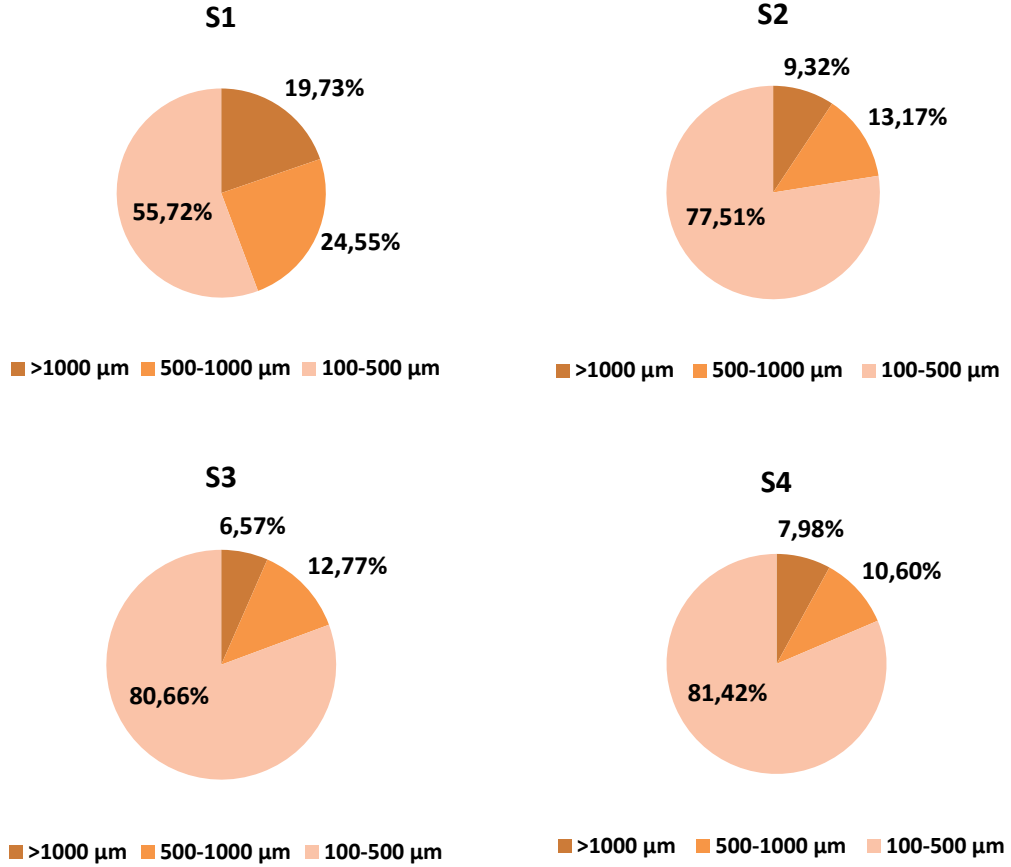
Şekil 6. 27: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Yaz aylarında arıtma çamurlarında gerçekleştirilen mikroplastik boyut analizinde ise, tüm arıtma çamuru numunelerinde (S1, S2, S3 ve S4) en çok tespit edilen boyut 100-500 µm olan mikroplastiklerdir (%55,72-%81,42). Boyutu 500-1000 µm olan mikroplastiklerin oranı %10,60-%24,55 arasında değişirken, boyutu >1000 µm olan mikroplastiklerin oranı %6,57-%19,73 arasında değişmektedir (Şekil 6.28). Yaz aylarındaki sonuçlara göre arıtma çamuru numunelerinde mikroplastik boyutu küçüldükçe konsantrasyonların arttığını söylemek mümkündür (Şekil 6.29). Yapılan

Friedman testi sonucuna göre, mikroplastik konsantrasyonları her bir boyut aralığı için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmemiştir ($p>0,05$) (şekil 6.30).



şekil 6.28: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin boyut analizi



Şekil 6.29: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde boyut dağılımı

N	3
Chi-Square	7,400
df	3
Asymp. Sig.	,060

a. Friedman Test

Şekil 6.30: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında tespit edilen mikroplastiklerin boyut verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Ragoobur ve diğ. (2021) arıtma çamurlarında bulunan mikroplastikleri 5-3 mm, 3-1 mm, 1-0.5 mm ve 0.5-0.25 mm olmak üzere farklı boyut aralıklarında incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre tespit edilen mikroplastiklerin %90'ının boyutları 1 mm'den küçük olup bunların %80'ini ise en küçük boyutu 0.5-0.25 mm olan mikroplastikler oluşturmuştur. Benzer şekilde, Lee ve Kim (2018) üç farklı atıksu arıtma tesisine ait arıtma çamuru numunelerinde mikroplastikleri boyutları 106-300 µm ve >300 µm'den büyük olmak üzere incelemişlerdir. Arıtma çamurlarında

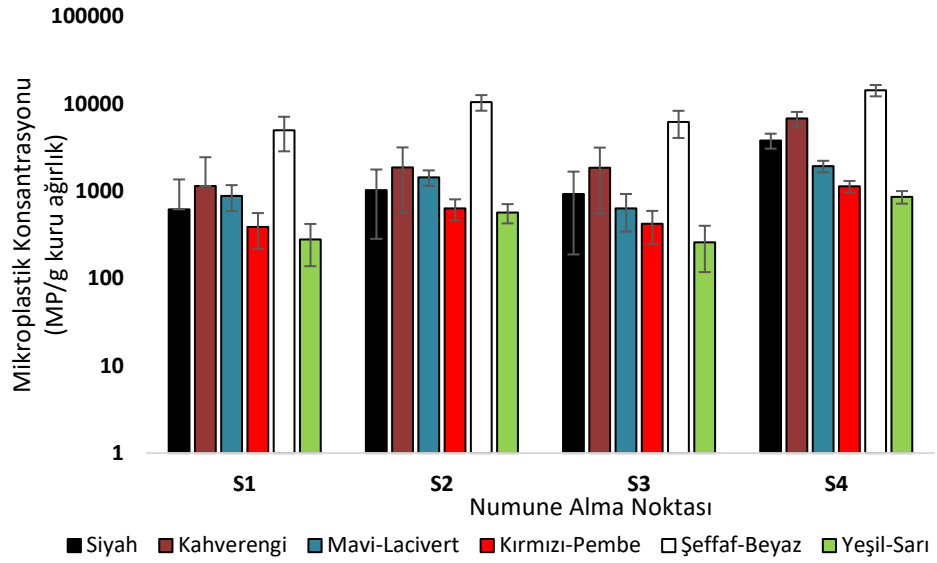
mikroplastik boyutu küçüldükçe konsantrasyonlarında artış olduğu saptanmıştır. Tez çalışması kapsamında mikroplastiklerin boyut analizi verilerinin, literatürdeki diğer çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

6.2.2 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Renk Analizi

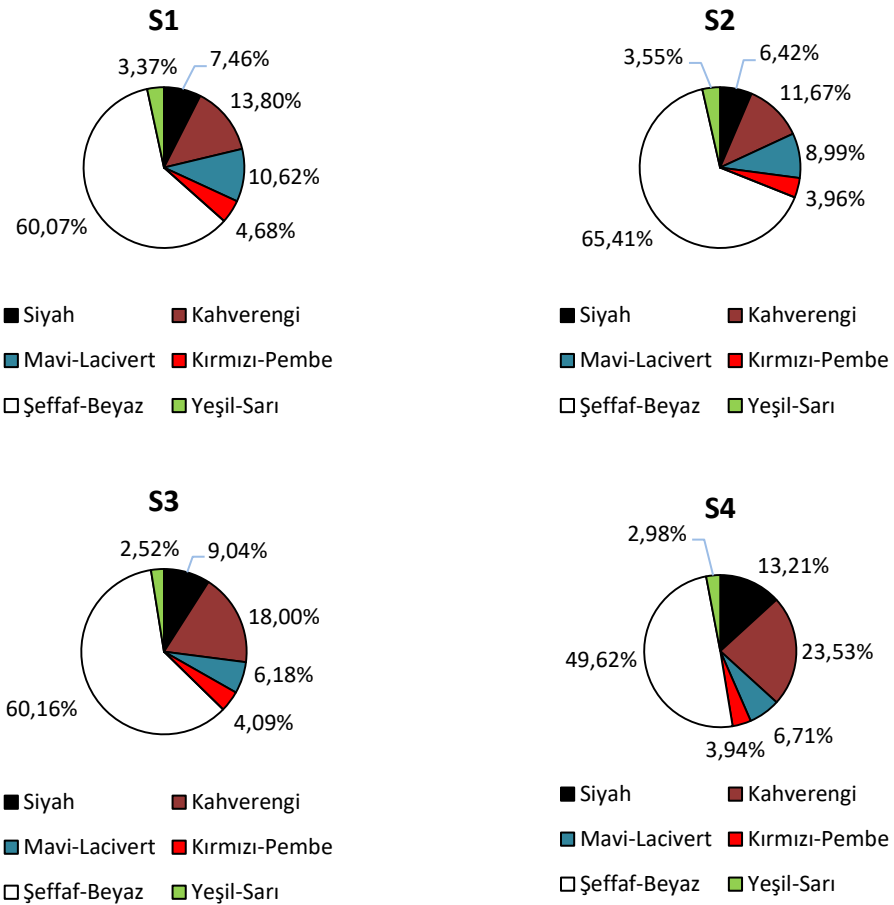
Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi sonuçları Tablo 6.8’de sayısal ve yüzdesel olarak verilmektedir. Mikroplastiklerin renkleri, atıksularda gerçekleştirilen analizlere benzer şekilde siyah, kahverengi, mavi-lacivert, kırmızı-pembe, şeffaf-beyaz ve yeşil-sarı olmak üzere 6 farklı kategoride incelenmiştir. Kış aylarını temsil eden numunelerde elde edilen sonuçlara göre, S1 ve S2 numunelerinde mikroplastiklerin renk dağılımı sırasıyla şeffaf-beyaz> kahverengi> mavi-lacivert> siyah> kırmızı-pembe> yeşil-sarı olarak tespit edilmiştir. S3 ve S4 numunelerinde ise renk dağılımı şeffaf-beyaz> kahverengi> siyah> mavi-lacivert> kırmızı-pembe> yeşil-sarı olarak belirlenmiştir. Her bir arıtma çamuru numunesinde baskın mikroplastik renginin şeffaf-beyaz (%49,62-%65,41) olduğu görülmüştür. Renk kategorileri arasından en az rastlanan mikroplastik rengi ise yeşil-sarı (%2,52-%3,55) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.31). Şekil 6.32’de ise her bir arıtma çamuru numunesinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzdesel olarak renk dağılımı gösterilmiştir. Friedman testine göre, arıtma çamurlarındaki mikroplastik konsantrasyonları her bir renk için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde farklı numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$) (Şekil 6.33). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen renklere mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklılaşmaktadır.

Tablo 6.8: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Renk Analizi						Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/g kuru ağırlık)
		Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	
Kış	S1	620 MP/g (%7,46)	1146 MP/g (%13,80)	882 MP/g (%10,62)	389 MP/g (%4,68)	4990 MP/g (%60,07)	280 MP/g (%3,37)	8307 (%100)
	S2	1028 MP/g (%6,42)	1869 MP/g (%11,67)	1440 MP/g (%8,99)	634 MP/g (%3,96)	10474 MP/g (%65,41)	569 MP/g (%3,55)	16015 (%100)
	S3	932 MP/g (%9,04)	1855 MP/g (%18,00)	637 MP/g (%6,18)	422 MP/g (%4,09)	6200 MP/g (%60,16)	260 MP/g (%2,52)	10306 (%100)
	S4	3813 MP/g (%13,21)	6790 MP/g (%23,53)	1937 MP/g (%6,71)	1137 MP/g (%3,94)	14321 MP/g (%49,62)	861 MP/g (%2,98)	28860 (%100)
Yaz	S1	167 MP/g (%2,76)	142 MP/g (%2,35)	782 MP/g (%12,90)	459 MP/g (%7,58)	4358 MP/g (%71,91)	152 MP/g (%2,50)	6060 (%100)
	S2	182 MP/g (%0,97)	451 MP/g (%2,41)	558 MP/g (%2,99)	429 MP/g (%2,29)	16726 MP/g (%89,45)	3523 MP/g (%1,88)	18699 (%100)
	S3	117 MP/g (%1,10)	474 MP/g (%4,45)	411 MP/g (%3,86)	174 MP/g (%1,64)	9302 MP/g (%87,32)	175 MP/g (%1,64)	10653 (%100)
	S4	305 MP/g (%1,38)	880 MP/g (%3,97)	965 MP/g (%4,36)	667 MP/g (%3,01)	18942 MP/g (%85,52)	390 MP/g (%1,76)	22149 (%100)



Şekil 6.31: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi



Şekil 6.32: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı

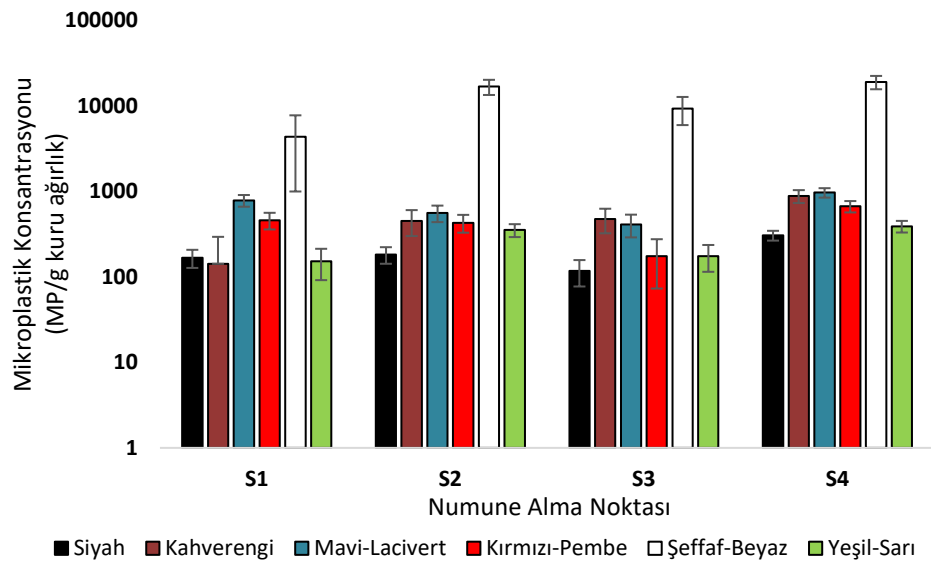
Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	16,400
df	3
Asymp. Sig.	,001

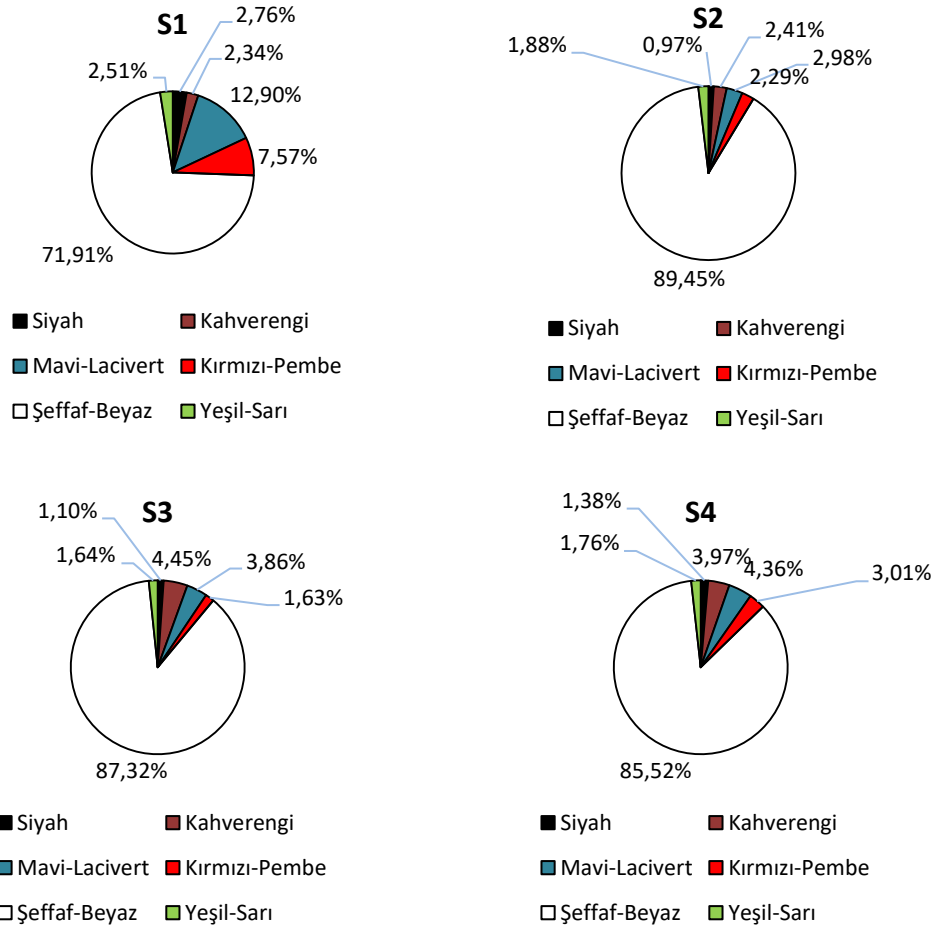
a. Friedman Test

Şekil 6.33: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi sonuçları Şekil 6.34’de verilmiştir. Yaz aylarını temsil eden numunelerde elde edilen sonuçlara göre, tüm arıtma çamuru numunelerinde mikroplastik renklerinin %71,91 ile %89,45 aralığında değişen oranda şeffaf-beyaz olduğu görülmüştür. S1 numunesinde en az rastlanan renk kahverengi (%2,34) iken S2, S3 ve S4 numunelerinde sırasıyla %0,97, %1,10 ve %1,38 ile siyahtır. Şekil 6.35’te ise her bir arıtma çamuru numunesinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzdesel olarak dağılımı gösterilmiştir. Friedman testine göre, arıtma çamurlarındaki mikroplastik konsantrasyonları her bir renk için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde farklı numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p<0,05$) (Şekil 6.36). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen renklerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiksel olarak farklılaşmaktadır.



Şekil 6.34: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin renk analizi



Şekil 6.35: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde renk dağılımı

Test Statistics^a

N	6
Chi-Square	12,200
df	3
Asymp. Sig.	,007

a. Friedman Test

Şekil 6.36: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin renk verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Mikroplastiklerin görsel olarak renklerine göre sınıflandırılması çevresel etkilerini belirlemede önemli bir özellik olmamasına rağmen mikroskop kullanılarak FTIR gibi kimyasal analizler için şüpheli parçacık seçiminde belirleyicidir. Ayrıca renklerin çeşitliliği mikroplastiklerin farklı kaynaklardan geldiğine işaret etmektedir (Gallagher ve diğ. 2016). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, arıtma çamurlarında en sık gözlemlenen mikroplastik renkleri şeffaf ve/veya beyaz olduğu görülmektedir (Jiang ve diğ. 2020; X. Li ve diğ. 2018; Najji ve diğ. 2021). Bu tez

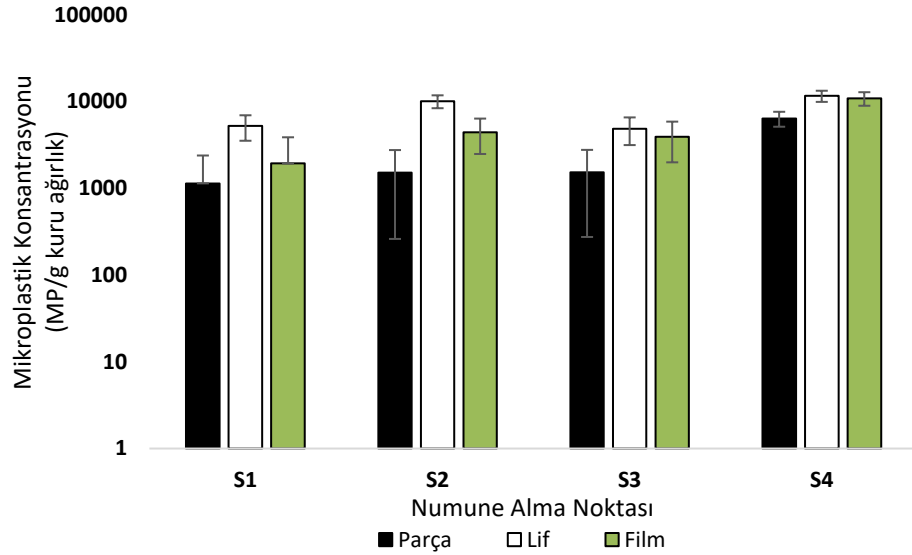
çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara göre hem kış hem de yaz mevsiminde tüm arıtma çamuru numunelerinde baskın mikroplastik rengi şeffaf-beyaz olarak tespit edilmiş olup, elde edilen bu sonuç literatürdeki verilerle tutarlılık göstermektedir.

6.2.3 Arıtma Çamuru Numunelerinde Mikroplastiklerin Şekil Analizi

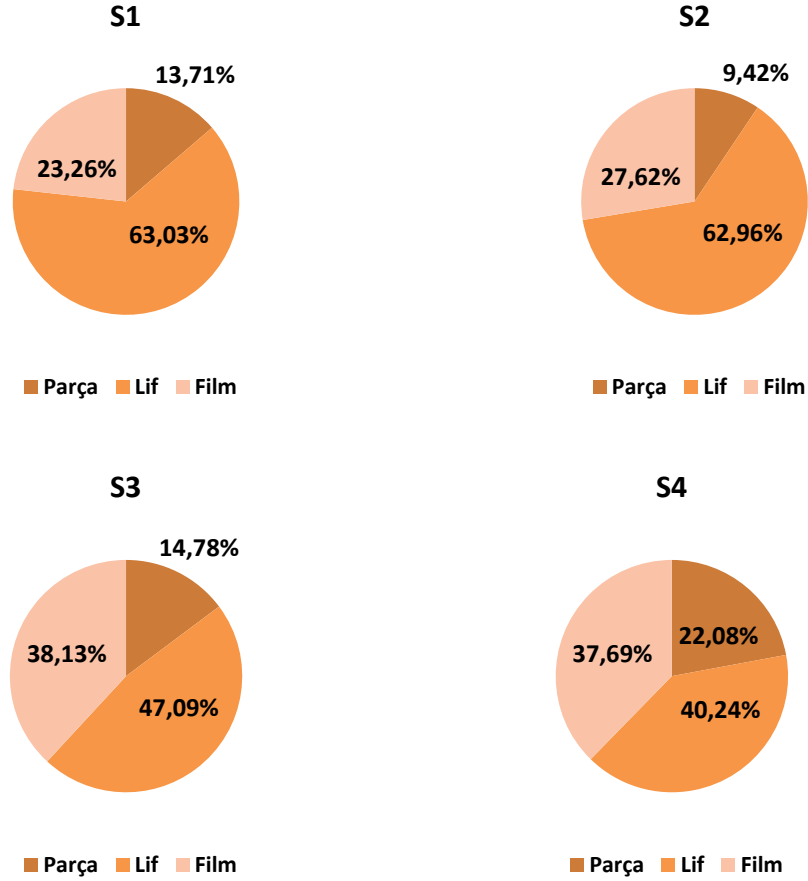
Arıtma çamuru numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi sonuçları Tablo 6.9’da verilmektedir. Şekil analizi parça, lif ve film olmak üzere 3 farklı kategoride incelenmiştir. Kış aylarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, tüm arıtma çamuru numunelerinde (S1, S2, S3 ve S4) gözlenen baskın şekil %40,24 ile %63,03 arasında değişen oranda liflerdir. Şekil sıralamasında diğer baskın tür %23,26 ile %38,13 arasında değişen oranda filmler olarak görülmektedir. Şekil kategorileri arasından en az rastlanan mikroplastik şekli ise parça (%9,42-%22,08) olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.37). Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde olarak şekil dağılımı Şekil 6.38’te verilmiştir. Kış mevsiminde elde edilen verilere uygulanan Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları farklı şekiller (parça, film, lif) için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde farklı numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmemiştir ($p>0,05$) (Şekil 6.39). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen şekillerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiki olarak farklı değildir.

Tablo 6.9: Arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi

Mevsim	Numune Alma Noktası	Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/g kuru ağırlık)
		Parça	Lif	Film	
Kış	S1	1139 MP/g (%13,72)	5236 MP/g (%60,03)	1932 MP/g (%23,25)	8307 (%100)
	S2	1509 MP/g (%9,42)	1008 MP/g (%62,96)	4423 MP/g (%27,62)	16015 (%100)
	S3	1523 MP/g (%14,78)	4853 MP/g (%47,10)	3929 MP/g (%38,12)	10306 (%100)
	S4	6371 MP/g (%22,07)	11613 MP/g (%40,24)	10876 MP/g (%37,68)	28860 (%100)
Yaz	S1	417 MP/g (%6,87)	4620 MP/g (%76,23)	1024 MP/g (%16,90)	6060 (%100)
	S2	1539 MP/g (%8,23)	13963 MP/g (%74,67)	3196 MP/g (%17,09)	18699 (%100)
	S3	1377 MP/g (%12,93)	6131 MP/g (%57,55)	3145 MP/g (%29,52)	10653 (%100)
	S4	2542 MP/g (%11,48)	13046 MP/g (%58,90)	6561 MP/g (%29,62)	22149 (%100)



Şekil 6.37: Kış mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi



Şekil 6.38: Kış mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı

Test Statistics^a

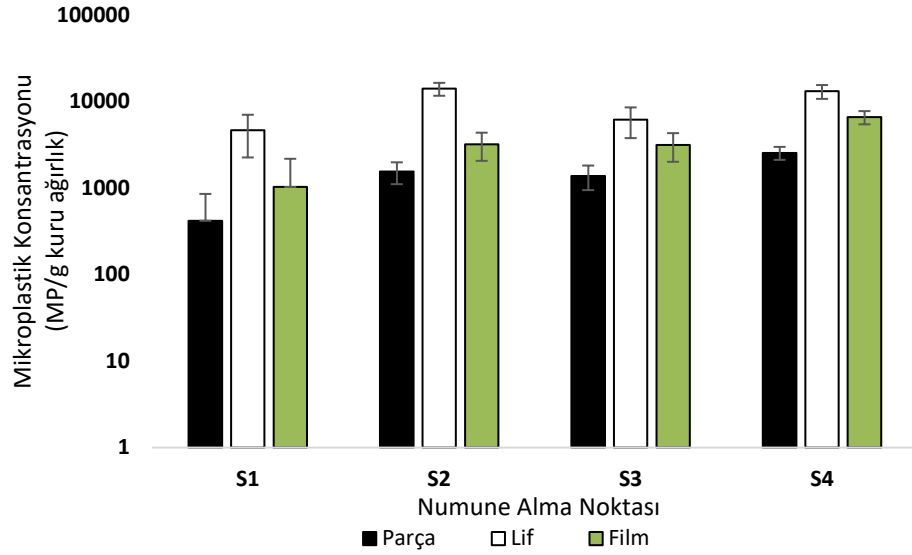
N	3
Chi-Square	7,000
df	3
Asymp. Sig.	,072

a. Friedman Test

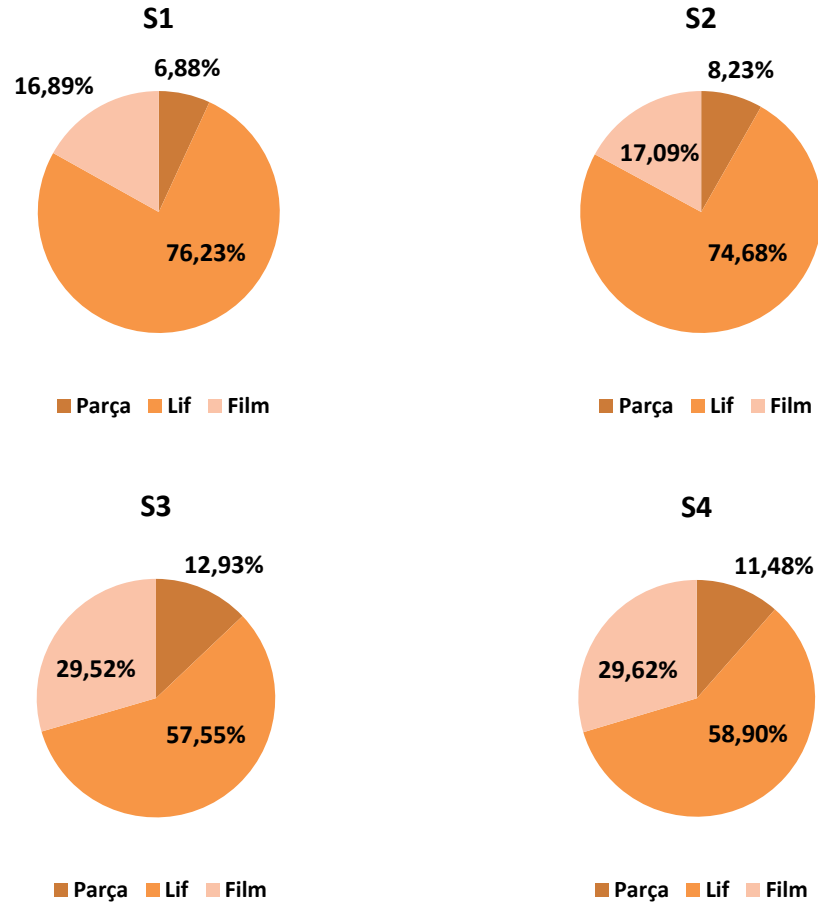
Şekil 6.39: Kış mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Yaz aylarında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, tüm arıtma çamuru numunelerinde (S1, S2, S3 ve S4) gözlenen baskın şekil %57,55 ile %76,23 arasında değişen oranda liflerdir (Şekil 6.40). Şekil sıralamasında diğer baskın tür %16,89 ile %29,62 arasında değişen oranda filmler olarak görülmektedir. Şekil kategorileri arasından en az rastlanan mikroplastik şekli ise parça (%6,88-%12,93) olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.41’de yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı yüzde olarak gösterilmiştir. Yaz mevsiminde elde edilen verilere uygulanan Friedman testine göre, mikroplastik konsantrasyonları farklı

şekiller (parça, film, lif) için ortalama değerleri açısından değerlendirildiğinde farklı numune alma noktalarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmüştür ($p < 0,05$) (Şekil 6.42). Ardışık arıtma ünitelerinde tespit edilen şekillerde mikroplastik konsantrasyonları istatistiksel olarak farklıdır.



Şekil 6.40: Yaz mevsiminde arıtma çamurunda tespit edilen mikroplastiklerin şekil analizi



Şekil 6.41: Yaz mevsiminde S1, S2, S3 ve S4 numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin yüzde şekil dağılımı

N	3
Chi-Square	8,200
df	3
Asymp. Sig.	,042

a. Friedman Test

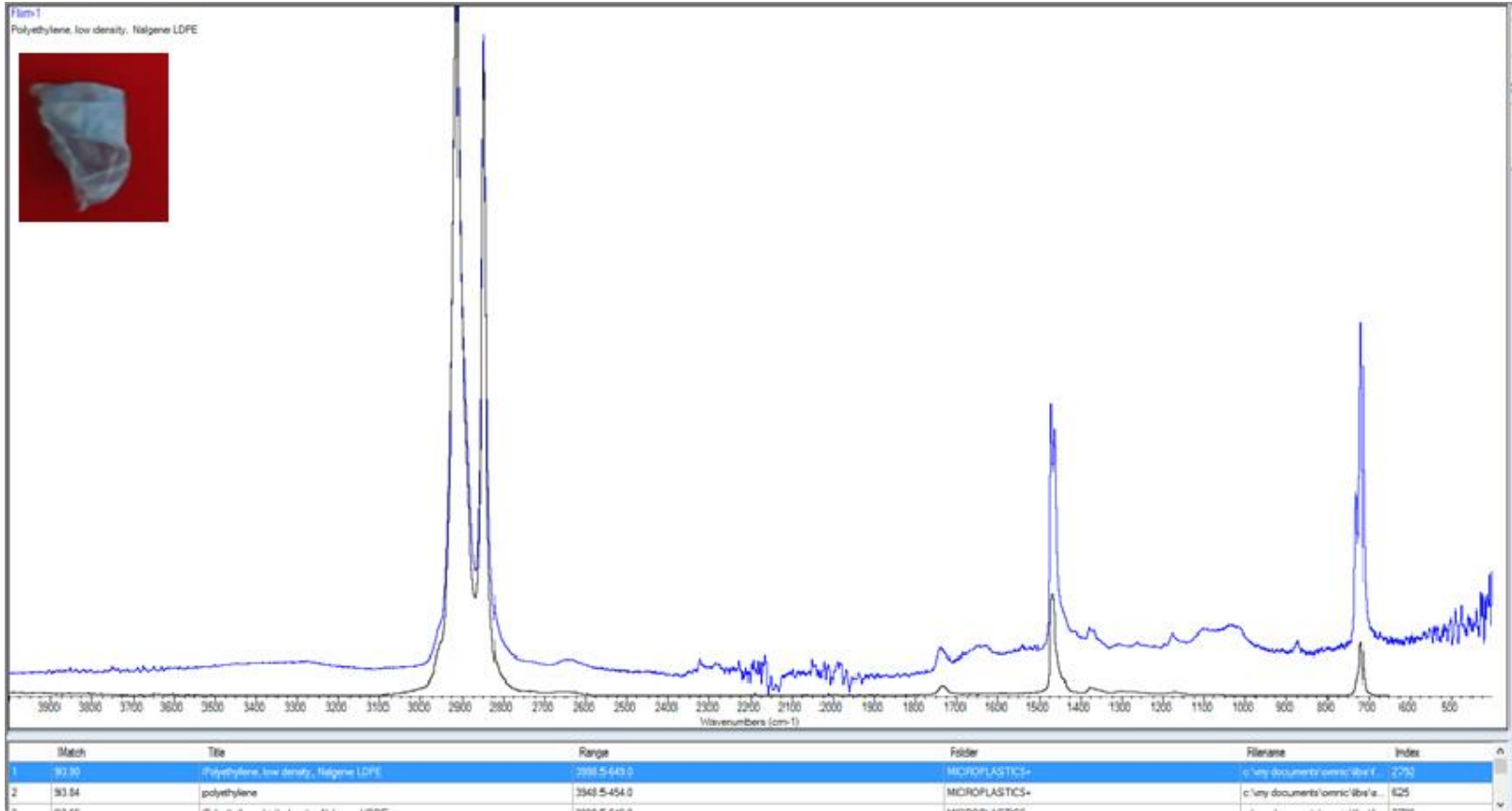
Şekil 6.42: Yaz mevsiminde farklı numune alma noktalarında arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastiklerin şekil verilerine uygulanan Friedman testi istatistiksel analiz sonuçları

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen şekil sınıflandırmasında hem kış hem de yaz mevsiminde baskın şeklin lif yapıda olan mikroplastikler olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, aktif çamurda şekil sınıflandırılması yapılan bir çalışmada da lif yapıda olan mikroplastiklerin oranının oldukça yüksek olduğu (%94) rapor edilmiştir (Lares ve diğ. 2018). Najji ve diğ. (2021) tarafından iki farklı atıksu arıtma tesisinden alınan arıtma çamurlarında mikroplastiklerin şekil yoğunluğu sırasıyla lif> film> parça> granül olarak bulunmuştur. Tez çalışması kapsamında elde

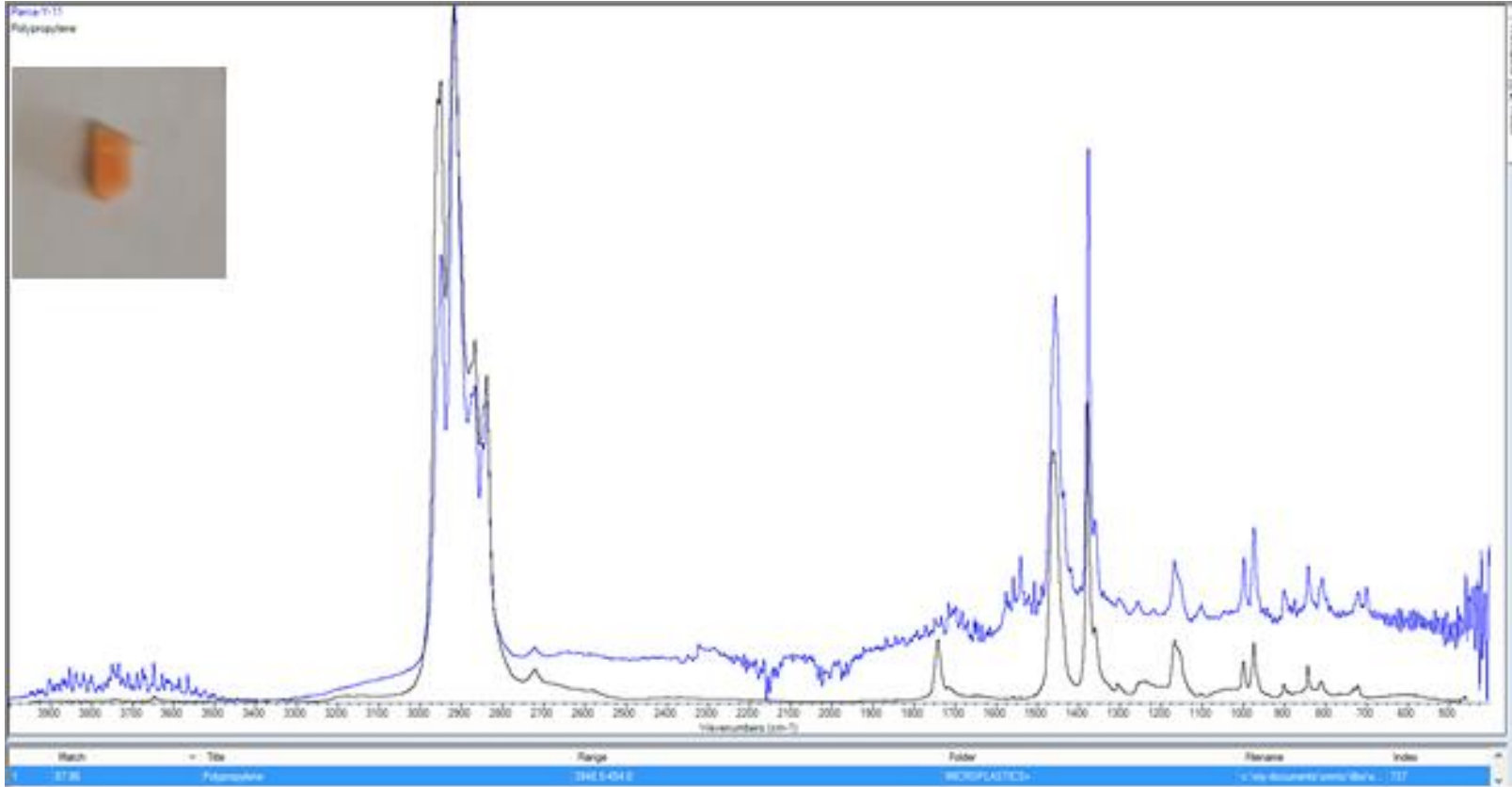
edilen sonuçlar literatürdeki diğer çalışmaları destekler niteliktedir (Alavian Petroody ve diğ. 2021; J. Bayo ve diğ. 2016; Edo ve diğ. 2020; Nakao ve diğ. 2021). Kış mevsiminde insanların fazla kıyafet kullanımı ile daha fazla çamaşır yıkaması bu duruma bir sebep olarak gösterilebilmektedir (Browne ve diğ. 2011). Özellikle lif şeklindeki mikroplastikler sentetik kıyafetlerin çamaşır makinesinde yıkanmasıyla atıksu arıtma tesislerine kadar ulaşmaktadır. Napper ve Thompson (2016) yaptıkları bir çalışmada ortalama olarak 6 kg'lık normal bir ev tipi çamaşır makinesinin bir yıkama sırasında 700.000 adet kadar lifin kanalizasyona salılabileceğini göstermişlerdir. Film şeklindeki mikroplastikler daha çok ambalaj ürünlerinden kaynaklandığı, parça şeklindeki mikroplastiklerin ise günlük yaşamda sıklıkla kullanılan plastiklerin parçalanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Koyuncuoğlu ve Erden 2021).

6.3 Mikroplastiklerin Polimer Türlerinin Tespiti

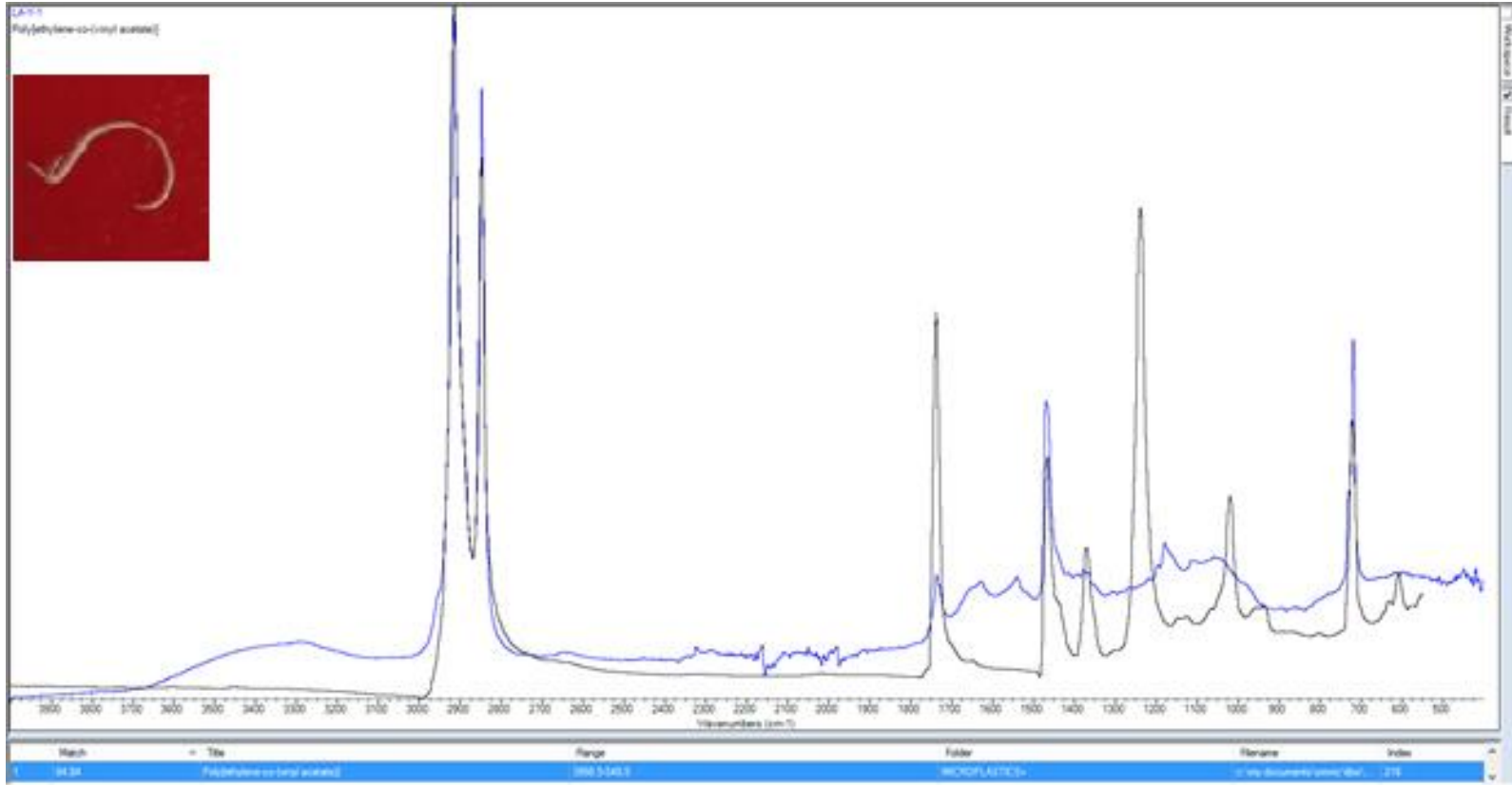
Tez çalışması kapsamında, atıksu ve arıtma çamuru numunelerinde stereo-mikroskop yardımı ile görsel analizi yapılan mikroplastiklerin kimyasal kompozisyonu, zayıflatılmış toplam yansıma (ATR) aksesuarı ile birleştirilmiş Fourier-Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yardımıyla tanımlanmıştır. Şüpheli parçacıkların (195 adet) mikroskop altında ön seçimi yapılarak alt örnekler oluşturulmuştur. ATR-FTIR konfigürasyonunda kristal mikroplastik örnekleri ile doğrudan temas etmesi gerekmektedir (Bretas Alvim ve diğ. 2020b). Bu nedenle boyutu $>500 \mu\text{m}$ olan mikroplastikler ayrı ayrı olmak üzere pens yardımıyla cihaza yerleştirilerek analiz edilmiştir. Elde edilen spektrumların, kütüphane taramalarındaki benzerlik oranı %70 ve üzeri olanlar kabul edilmiştir. Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te sırasıyla film, parça ve lif şeklindeki mikroplastiklere ait örnek FTIR spektrumları verilmektedir.



Şekil 6.43: Film şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%93,90 polietilen)

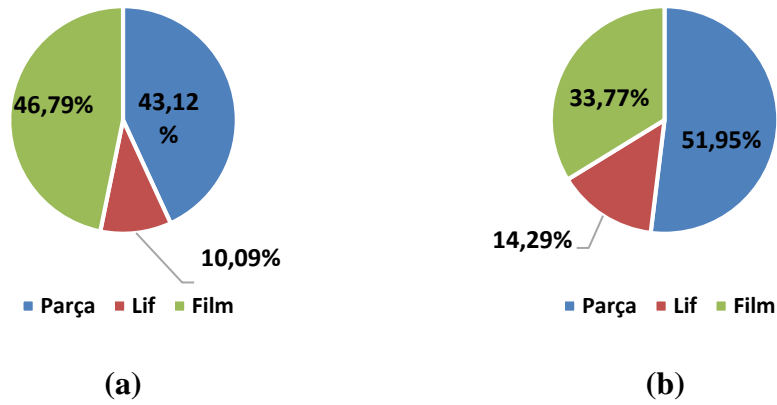


Şekil 6.44: Parça şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%87,86 polipropilen)



Şekil 6.45: Lif şeklindeki mikroplastığe ait FTIR spektrumu (%84,84 Polietilen vinil asetat)

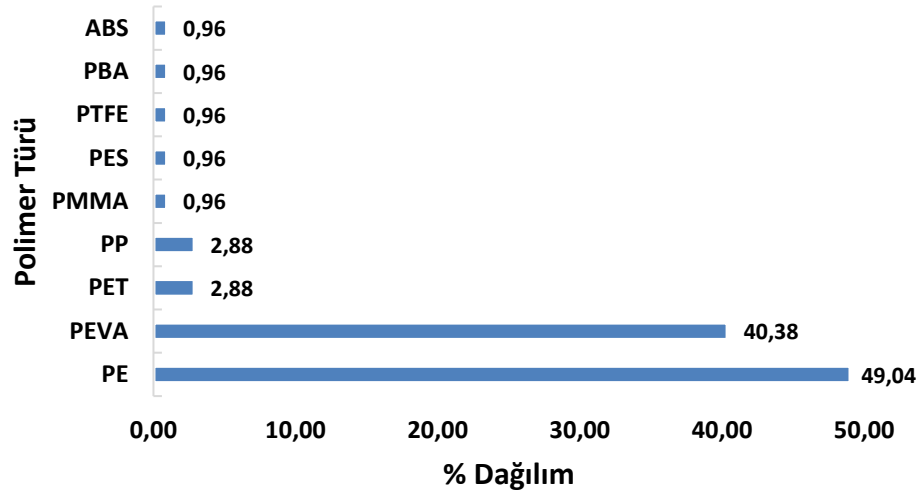
FTIR analizleri sonucunda elde edilen veriler Şekil 6.46'da gösterilmektedir. Kış mevsiminde yapılan analizlerde (n=109) şüpheli mikroplastiklerin plastik olarak doğrulanma oranı %95,41 olarak hesaplanmış olup, FTIR analizi yapılan mikroplastiklerin şekilsel dağılımının %46,79'u film, %43,12'si parça ve %10,09'unu ise lifler oluşturmaktadır (Şekil 6.46a). Yaz mevsiminde FTIR analizi yapılan şüpheli mikroplastiklerin (n=86) polimer yapısının doğrulanma oranı %89,53 olarak hesaplanmıştır. Şekilsel dağılımı ise %51,95 parça, %33,77 film, %14,29 oranında liflerden oluşmaktadır (Şekil 6.46b).



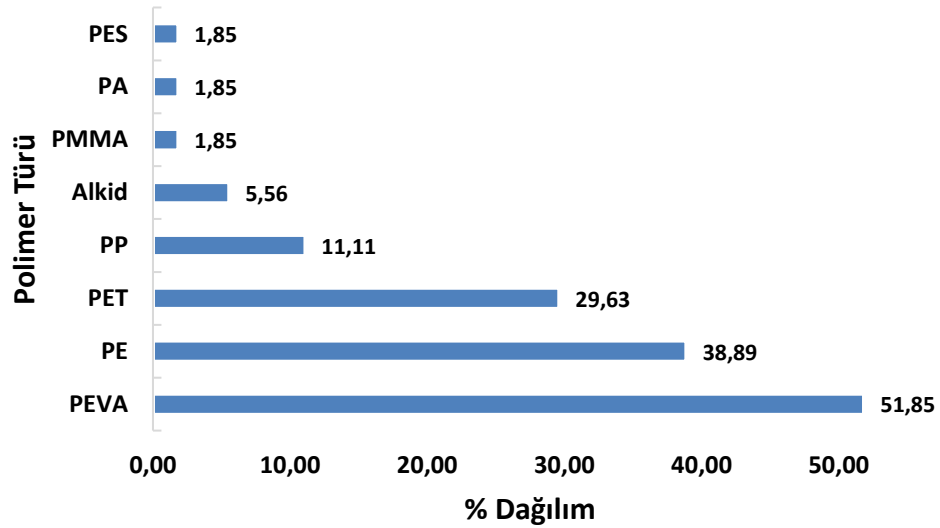
Şekil 6.46: Kış (a) ve yaz (b) mevsiminde FTIR analizi yapılan şüpheli mikroplastiklerin şekilsel dağılımı

Kış mevsiminde dokuz farklı polimer türü tespit edilmiş olup, en baskın polimer türünün polietilen (PE: %49,04), diğer bir baskın polimer türünün ise polietilen vinil asetat (PEVA: %40,38) olduğu görülmektedir (Şekil 6.47a). Tespit edilen polimer tür sıralaması ise PE> PEVA> PET = PP> ABS = PBA = PTFE = PES = PMMA olarak belirlenmiştir.

Yaz mevsiminde ise sekiz farklı polimer türü tespit edilmiştir. En baskın polimer türü %51,85 oranla polietilen vinil asetat (PEVA) olmuştur (Şekil 6.47b). Polietilen (PE) ise %38,89 oranla ikinci baskın polimer türü olarak görülmüştür. Tespit edilen polimer tür sıralaması ise PEVA> PE> PET> PP> Alkid> PES = PA = PMMA şeklindedir.



(a)

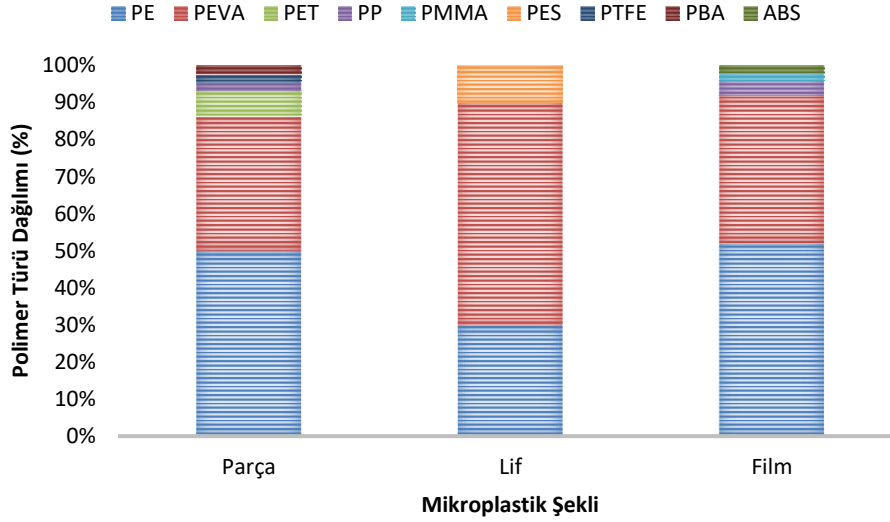


(b)

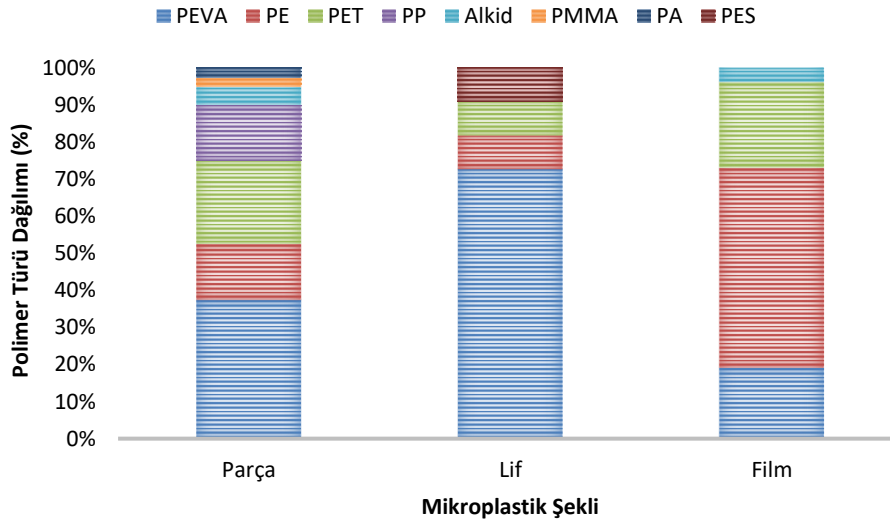
Şekil 6.47: Kış (a) ve yaz (b) mevsiminde FTIR analizi yapılan şüpheli mikroplastiklerin mikroplastiklerin polimer türü dağılımı (ABS: Akrilonitril bütadien stiren; PA: Poliamid; PBA: Poli(11-bromundesil akrilat); PTFE: Politetrafloroetilen; PMMA: Polimetil metakrilat; PP: Polipropilen; PET: Polietilen tereftalat; PEVA: Polietilen vinil asetat; PE: Polietilen; PES: Polyester)

Kış ve yaz mevsiminde analiz edilen mikroplastiklerin şekillerine göre polimer türü dağılımları Şekil 6.48 ve 6.49'da sırasıyla verilmiştir. Kış mevsiminde parça şeklindeki mikroplastiklerde analiz edilen polimer türleri film ve liflere göre daha çeşitlidir ve sırasıyla PE> PEVA> PET> PP = PTFE = PBA şeklinde gözlemlenmiştir. Lif şeklindeki mikroplastiklerde bu sıralama PEVA>PE>PES olarak bulunurken, filmlerde PE> PEVA> PP> PMMA = ABS olarak bulunmuştur. Yaz mevsiminde parça şeklindeki mikroplastiklerde analiz edilen polimer türleri kış mevsiminde elde edilen sonuçlara benzer şekilde film ve liflere göre daha çeşitlidir ve sırasıyla PEVA>

PET> PP = PE> Alkid> PMMA = PA şeklinde gözlemlenmiştir. Lif şeklindeki mikroplastiklerde bu sıralama PEVA> PE = PET = PES olarak bulunurken, film şeklindeki mikroplastiklerde PE> PET> PEVA> Alkid olarak bulunmuştur.



Şekil 6.48: Kış mevsimine ait mikroplastik şekillerine göre polimer türü dağılımı



Şekil 6.49: Yaz mevsimine ait mikroplastik şekillerine göre polimer türü dağılımı

Tablo 6.10'da tez çalışması kapsamında saptanan polimer türlerinin yoğunlukları ve muhtemel kaynakları özetlenmiştir. Tespit edilen polimer türü dağılımı ve polimerlerin kullanım alanları dikkate alındığında, en yaygın olarak belirlenen polimer türlerinin PEVA, PE ve PET olduğu görülmektedir. PEVA, genellikle spor malzemeleri üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadır. PET ise sentetik giysilerde içecek şişeleri, mutfak eşyalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

PE kişisel bakım ürünlerinin yanı sıra gıda ambalaj filmleri ve su şişeleri dahil olmak üzere kişisel bakım ürünlerinde kullanılmaktadır (Prajapati ve diğ. 2021). Polimerlerin kullanım alanları göz önüne alındığında, atıksu arıtma tesislerindeki en büyük mikroplastik kaynaklarının tekstil ürünlerinin yıkanması ve ev içerisindeki plastik malzeme kullanımından kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6.10: Çalışma kapsamında analiz edilen polimer türlerinin yoğunluk değerleri ve muhtemel kaynakları (Andrady (2011) uyarlanmıştır).

Polimer	Tespit Edilen Polimer Türü Dağılımı		Yoğunluk (g/cm ³)	Kullanım Alanları
	Kış	Yaz		
ABS: Akrlonitril bütadien stiren	%0,96	-	1,0-1,05	Otomotiv sektörü, elektrik-elektronik sektörü
PA: Poliamid	-	%1,85	1,02-1,05	Otomotiv sektörü, elektrik-elektronik sektörü, balık ağları
PTFE: Politetrafloroetilen	%0,96	-	2,14-2,19	Kablo sektörü, telekomünikasyon
PES: Polyester	%0,96	%1,85	> 1,35	Tekstil sektörü
PMMA: Polimetil metakrilat	%0,96	%1,85	1,17–1,20	Göz lensleri, sentetik bardaklar
PP: Polipropilen	%2,88	%11,11	0,90–0,92	Otomotiv sektörü, ambalaj, tekstil sektörü
PET: Polietilen tereftalat	%2,88	%29,63	1,34–1,39	İçecek şişeleri, mutfak eşyaları, tekstil sektörü
PEVA: Polietilen vinil asetat	%40,38	%51,85	0,94-0,96	Spor malzemeleri
PE: Polietilen	%49,04	%38,89	0,91–0,95	Plastik poşetler, içecek kutuları
PBA: Poli(11-bromoundesil akrilat)	%0,96	-	-	-
Alkid	-	%5,56	0,91–0,95	Yapay katkı maddesi, polyester reçine

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında elde edilen veriler ışığında, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nin ham atıksuyu yoğun olarak mikroplastik kirliliği (ortalama kış: 4979 MP/L, yaz: 3938 MP/L) içermektedir. Tesiste bulunan her bir arıtma kademesi etkin şekilde mikroplastik giderimi sağlamaktadır. Arıtılmış atıksuda, kış mevsiminde ortalama mikroplastik konsantrasyonu 246 MP/L olarak bulunurken, yaz mevsiminde ise 164 MP/L olarak bulunmuştur. Tablo 7.1'de ham ve arıtılmış atıksularda bulunan mikroplastik konsantrasyonları ve tesis giriş ve çıkış debileri verilmiştir. Ham ve arıtılmış atıksularda bulunan mikroplastik konsantrasyonları ve tesis giriş ve çıkış debileri kullanılarak günde ham atıksuyla tesise verilen ve arıtılmış atıksuyla alıcı ortama verilen ortalama mikroplastik kirlilik yükleri hesaplanmıştır. Mikroplastik kirlilik yükleri denklem (7.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$L_{MP} = Q \times C \times 1000 \quad (7.1)$$

Burada;

MP: Mikroplastik kirlilik yükü (MP/gün),

Q: Debi değerini (m³/gün),

C: Atıksuda (MP/L) tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunu göstermektedir.

Tablo 7.1: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debileri ile hesaplanmış günlük tesise giren ve tesisten deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları

Mevsim	Tarih	m ³ /gün		Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)		Mikroplastik Kirlilik Yükü (MP/gün)	
		Qgiriş	Qçıkış	W1	W4	W1	W4
Kış	1.12.2020	94021	88380	3260	199	3,07×10 ¹¹	1,76×10 ¹⁰
	16.12.2020	97547	91412	3832	255	3,74×10 ¹¹	2,33×10 ¹⁰
	6.01.2021	99305	91007	8010	461	7,95×10 ¹¹	4,20×10 ¹⁰
	20.01.2021	97743	90019	5098	207	4,98×10 ¹¹	1,86×10 ¹⁰
	3.02.2021	102129	91256	4800	140	4,90×10 ¹¹	1,28×10 ¹⁰
	17.02.2021	97208	89066	4874	212	4,74×10 ¹¹	1,89×10 ¹⁰
	Ortalama	97992,17	90190,00	4979,0	245,67	4,90×10¹¹	2,22×10¹⁰

Tablo 7.2: Numune alınan tarihlere ait ham atıksu ve arıtılmış atıksu debileri ile hesaplanmış günlük tesise giren ve tesisten deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları (*Devamı..*)

Mevsim	Tarih	m ³ /gün		Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)		Mikroplastik Kirlilik Yükü (MP/gün)	
		Qgiriş	Qçıkış	W1	W4	W1	W4
Yaz	14.07.2021	61873	57111	4226	88	2,61×10 ¹¹	5,03×10 ⁹
	28.07.2021	61127	57918	3312	235	2,02×10 ¹¹	1,36×10 ¹⁰
	11.08.2021	62259	58040	3558	187	2,22×10 ¹¹	1,09×10 ¹⁰
	25.08.2021	58977	55710	5094	146	3,00×10 ¹¹	8,13×10 ⁹
	8.09.2021	60518	58040	3814	135	2,31×10 ¹¹	7,84×10 ⁹
	22.09.2021	50701	48753	3626	193	1,84×10 ¹¹	9,41×10 ⁹
	Ortalama	59242,5	55928,67	3938,33	164,00	2,33×10¹¹	9,14×10⁹

Buna göre, kış mevsiminde tesise giren mikroplastik yükü $4,9 \times 10^{11}$ MP/gün, arıtılmış atıksu ile alıcı ortama deşarj edilen mikroplastik yükü ise $2,2 \times 10^{10}$ MP/gün olarak belirlenmiştir. Yaz mevsiminde ise tesise giren mikroplastik yükü $2,33 \times 10^{11}$ MP/gün, arıtılmış atıksu ile alıcı ortama deşarj edilen mikroplastik yükü ise $9,14 \times 10^9$ MP/gün olarak belirlenmiştir. Kış mevsiminde Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'ne gelen ortalama atıksu debisi yaz aylarına kıyasla ortalama %39,54 daha fazladır. Yağış miktarı ile yüzeysel akışın artması söz konusu olmaktadır. Bu durum da mikroplastik konsantrasyonuna etki eden önemli bir faktördür. Dolayısıyla kış mevsiminde mikroplastik konsantrasyonu yaz mevsimine göre ham atıksuda ortalama %20,90 ve arıtılmış atıksuda ortalama %33,24 oranda daha yüksektir. Mevsimler arasındaki bu fark günlük bazda değerlendirildiğinde, ham atıksu ile tesise giren mikroplastik konsantrasyonunun ortalama %52,33 oranında fazla olduğu görülmüştür. Tesisten günlük olarak alıcı ortama deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonu ise ortalama değerler kullanılarak değerlendirildiğinde %58,79 daha fazladır.

Arıtılmış atıksularda ham atıksulara göre düşük konsantrasyonlarda mikroplastik saptanmasına rağmen, atıksu arıtma tesisleri günlük olarak çok yüksek hacimde atıksu arıtmaktadır. Dolayısıyla, mikroplastiklerin günlük bazda deşarjı oldukça yüksek olup doğrudan alıcı ortama verilerek sucul ekosistem için risk oluşturmaktadır (Cheng ve diğ. 2021). Atıksu arıtma tesislerinin arıtılmış atıksuları nehir gibi alıcı ortamlarda bulunan mikroplastik konsantrasyonuna katkısı literatürde yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Browne ve diğ. 2011; Estahbanati ve Fahrenfeld 2016; McCormick ve diğ. 2014).

Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde %95'in üzerinde mikroplastik giderimi olmasına rağmen alıcı ortama çok büyük miktarda mikroplastik verilmektedir. Daha önceki bölümlerde detaylı olarak verilen mikroplastiklerin alıcı ortama (deniz ve tatlı su ortamı) etkileri dikkate alındığında, Türkiye'de atıksu arıtma tesisi kaynaklı büyük bir mikroplastik kirliliği sorunu olduğu sonucuna varılmaktadır.

Tablo 7.2'de farklı ülkelerde, evsel/kentsel nitelikli atıksu arıtma tesislerinde mikroplastik kirlilik profilinin belirlenmesine yönelik olarak yapılmış çalışmalar özetlenmektedir. Yürütülen tez kapsamında yapılan çalışma Tablo 7.2'de verilen çalışmalar ile karşılaştırıldığında, Güney Kore (Hidayaturrahman ve Lee, 2019) ve Danimarka'da (Simon ve diğ. 2018) tespit edilen konsantrasyonlar bu çalışmadakilere oranla çok yüksek iken, İspanya (Javier Bayo ve diğ. 2021; Franco ve diğ. 2021), İskoçya (Blair ve diğ. 2019) ve Kanada'da (Gies ve diğ. 2018) oldukça düşük olduğu görülmektedir. Atıksu arıtma tesisleri temelde mikroplastiklerin giderimi dikkate alınarak tasarlanmamış olmasına rağmen, mevcut sistemler yüksek oranda giderim sağlamaktadır (Talvitie ve diğ. 2017a). Tablo 7.2'de incelenen tüm çalışmalarda %91,62-%99,3 arasında değişen verimler elde edilmiş olup, bu değer tez kapsamında elde edilen mikroplastik giderme verimi (>%95) ile uyum içerisindedir.

Tablo 7.2'de incelenen çalışmalar, günlük mikroplastik deşarjının $1,07 \times 10^7$ - $139,48 \times 10^9$ MP/gün arasında değiştiğini göstermiştir. Danimarka'da gerçekleştirilen bir çalışmada, on farklı atıksu arıtma tesisinden örnekleme yapılarak mikroplastik kirliliği incelenmiştir. Farklı olarak, yıllık deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonunu kütleli olarak hesaplanmış olup 3 ton/yıl bulunmuştur (Simon ve diğ. 2018). Farklı çalışmalarda elde edilen farklı mikroplastik konsantrasyonlarının örnekleme yöntemi, mevsimsel farklılık, atıksu karakteristiği, arıtma tipi, mikroplastik izolasyon yöntemi ve analiz teknikleri ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir (Alavian Petroody ve diğ., 2021). Ayrıca toplumun günlük yaşam alışkanlıkları, ekonomik ve iklim farklılıkları da atıksu arıtma tesislerine gelen mikroplastik yüküne etki etmektedir (Wei ve diğ. 2020).

Tablo 7.3: Literatürde tespit edilen ve alıcı ortama günlük deşarj edilen mikroplastik konsantrasyonları

Ülke	Arıtma Tipi/Atıksu Niteliği	En Küçük Boyut	Analiz Yöntemi	Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)		Mikroplastik Giderme Verimi	Günlük Mikroplastik Deşarjı (MP/gün)
				Giriş	Çıkış		
İspanya (Javier Bayo ve diğ. 2021)	Üçüncül Arıtma/Kentsel	200 µm	Optik mikroskop, FTIR	2,74±0,49	0,98±0,27	%64,26	1,6×10 ⁷
İspanya (Franco ve diğ. 2021)	İkincil Arıtma/Kentsel	100 µm	Optik mikroskop, FTIR	645,03±182,24	16,40±7,85	%97,20	1,49–1,94×10 ⁹
	İkincil Arıtma/Endüstriyel			1567,49±413,18	131,35±95,36	%91,62	1,07–2,64×10 ⁷
Güney Kore (Hidayaturrahman ve Lee, 2019b)	Üçüncül Arıtma/Endüstriyel	53,17	Mikroskop	4200	33	%99,2	0,88×10 ⁹
	Üçüncül Arıtma/Kentsel	64,01		31400	297	%99,1	139,48×10 ⁹
	Üçüncül Arıtma /Kentsel	26,58		5840	66	%98,9	47,24×10 ⁹
İskoçya (Blair ve diğ. 2019)	Üçüncül Arıtma/Kentsel	60 µm	Stereomikroskop, FTIR	3-10	1-3	~%96	2,2×10 ⁷
Danimarka (Simon ve diğ. 2018)	Belirtilmemiş/10 farklı AAT (9 adet Evsel, 1 adet Kentsel)	10 µm	FPA-FTIR	2223-18285 (Ort: 7216)	61-1189 (Ort:250)	%99,3	3 ton/yıl
Kanada (Gies ve diğ. 2018)	İkincil Arıtma/Kentsel	64 µm	Stereomikroskop, FTIR	31,1±6,70	0,5±0,2	%97,1-%99,1	0,1-0,3×10 ⁹
Bu çalışma	İkincil Arıtma/Kentsel	100 µm	Stereomikroskop, FTIR	Kış: 4979,00 Yaz: 3938,33	Kış: 245,67 Yaz: 164,00	Kış: %95,07 Yaz: %95,84	Kış: 2,22×10 ¹⁰ Yaz: 9,14×10 ⁹

Tez kapsamında, Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde atıksuların arıtılması sonucunda oluşan arıtma çamurlarının oldukça yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik içerdiği görülmüştür. Özellikle çamur kekinin gerek arazide gerekse katı atık depolama sahasındaki bertarafı sırasında mikroplastiklerin karasal ortamlara dağılmasına zemin hazırlamaktadır. Tablo 7.3'te Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde numune alınan günlerde üretilen çamur keki miktarı ve çamur keki numunelerinde (S4) tespit edilen toplam mikroplastik konsantrasyonları verilmiştir. Ayrıca, çamur kekinde bulunan ortalama mikroplastik kirlilik yükü hesaplanmıştır. Mikroplastik kirlilik yükleri denklem (7.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$L_{MP} = Q \times C \times 10^6 \quad (7.2)$$

Burada;

L_{MP} : Mikroplastik kirlilik yükü (MP/gün),

Q: Günlük depolanan çamur keki (ton/gün),

C: Çamur kekinde (MP/g kuru ağırlık) tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunu göstermektedir.

Tablo 7.4: Numune alınan tarihlerde günlük katı atık depolama sahasında bertaraf edilen çamur keki miktarı ve içerdiği mikroplastik konsantrasyonu

Mevsim	Tarih	S4 (MP/g kuru ağırlık)	Günlük depolanan çamur keki (ton/gün)	Günlük depolanan mikroplastik yükü (MP/gün)
Kış	1.12.2020	25185,19	16950	$4,27 \times 10^{14}$
	16.12.2020	27883,44	25800	$7,19 \times 10^{14}$
	6.01.2021	28807,52	50550	$1,46 \times 10^{15}$
	20.01.2021	29994,87	57350	$1,72 \times 10^{15}$
	3.02.2021	30874,79	55200	$1,70 \times 10^{15}$
	17.02.2021	30412,51	41250	$1,25 \times 10^{15}$
	Ortalama	28859,72	41183,33	$1,21 \times 10^{15}$
Yaz	14.07.2021	16220,56	55750	$9,04 \times 10^{14}$
	28.07.2021	21801,89	63150	$1,38 \times 10^{15}$
	11.08.2021	29078,46	49800	$1,45 \times 10^{15}$
	25.08.2021	20497,80	59400	$1,22 \times 10^{15}$
	8.09.2021	24985,23	55050	$1,38 \times 10^{15}$
	22.09.2021	20309,17	42650	$8,66 \times 10^{14}$
	Ortalama	22148,85	54300,00	$1,20 \times 10^{15}$

Buna göre, kış mevsiminde Denizli Merkez Atıksu Arıtma Tesisi'nde oluşan çamur kekinin mikroplastik yükü ortalama $1,21 \times 10^{15}$ MP/gün, yaz mevsiminde ise ortalama $1,20 \times 10^{15}$ MP/gün olup değerler birbirine çok yakındır.

Farklı ülkelerde atıksu arıtma tesislerinin mikroplastik kirlilik profilinin çıkarılmasına yönelik olarak yürütülmüş olan çalışmalar incelendiğinde, farklı ülkelerin arıtma tesislerinde günde oluşan çamur miktarlarının çok farklı değerler aldığı görülmektedir (Tablo 7.5).

Tablo 7.5: Literatürde arıtma çamurlarında tespit edilen mikroplastik yükleri

Ülke	Atıksu Arıtma Tesisi Kapasitesi	Arıtma Çamuru Tipi	Mikroplastik Konsantrasyonu	Arıtma çamurlarında mikroplastik yükü (MP/gün)
Avusturalya (Ziajahromi vd., 2021)	234.000-700.000 kişi	Çürütülmüş çamur	15,9-56,5 MP/g kuru ağırlık	$8,64-10,2 \times 10^8$
Avusturalya (Raju vd., 2020)	190.000 kişi	Atık aktif çamur	$7,91 \pm 0,44$ MP/L	11,48- $12,84 \times 10^6$
Çin (Ren vd., 2020)	100.000 kişi	Çamur keki	$2,92 \times 10^3$ MP/kg	$3,13 \times 10^8$
İtalya (Magni vd., 2019)	1.200.000 kişi	Geri devir çamuru	113 ± 57 MP/g kuru ağırlık	$3,4 \times 10^8$
Kanada (Gies vd., 2018)	1.300.000 kişi	Birincil ve ikincil çamur	$4,4 \pm 2,9-14,9 \pm 6,3$ MP/g	$1,28 \pm 0,54 - 0,36 \pm 0,22 \times 10^{12}$
Bu çalışma	378.353 kişi	Çamur keki	22148,85-28859,72 MP/g kuru ağırlık	$1,20-1,21 \times 10^{15}$

Avusturalya'da (Raju ve diğ., 2020) yürütülmüş olan çalışmada atık aktif çamurda mikroplastik yükü, $11,48-12,84 \times 10^6$ MP/gün aralığında iken, Kanada'da (Gies ve diğ., 2018) yapılmış olan çalışmada bu aralık, $1,28 \pm 0,54 - 0,36 \pm 0,22 \times 10^{12}$ MP/gün olarak belirlenmiştir. Mikroplastik yüklerinde elde edilen farklı değerler, atıksu arıtma tesisi kapasitesi ile doğrudan ilişkili olmakla birlikte, farklı toplumların farklı su tüketim alışkanlıkları da bu sonucu etkileyen önemli bir faktördür. Mikroplastikler ile ilgili şu an mevcut olmayan çok yakın zamanda gereklilik arz edecek yönetmelik çalışmaları için ve mikroplastik giderimine yönelik olarak uygulamaların ortaya konması için mikroplastiklerin bölgesel olarak miktar ve tür açısından analiz edilmesi gereklidir.

8. KAYNAKLAR

Adomat, Y. and Grischek, T., "Sampling and processing methods of microplastics in river sediments - A review". *Sci. Total Environ.*, 758, 143691 (2021).

Akarsu, C., Kumbur, H., Gökdağ, K., Kıdeys, A. E. and Sanchez-Vidal, A., "Microplastics composition and load from three wastewater treatment plants discharging into Mersin Bay, north eastern Mediterranean Sea". *Mar. Pollut. Bull.*, 150, 110776 (2020).

Alavian Petroody, S. S., Hashemi, S. H. and van Gestel, C. A. M., "Transport and accumulation of microplastics through wastewater treatment sludge processes". *Chemosphere*, 278, 130471 (2021).

Alavian Petroody, S. S., Hashemi, S. H. and Van Gestel, C. A. M., "No seasonal differences in the emission of microplastics from an urban wastewater treatment plant on the Southern Coast of the Caspian Sea". *Pollution*, 7 (2), 405–416 (2021).

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., Galop, D., "Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment". *Nat. Geosci.*, 12 (5), 339–344 (2019).

Andrady, A. L., "Microplastics in the marine environment". *Mar. Pollut. Bull.*, 62(8), 1596–1605 (2011).

Antunes, J. C., Frias, J. G. L., Micaelo, A. C., Sobral, P., "Resin pellets from beaches of the Portuguese coast and adsorbed persistent organic pollutants". *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 130, 62–69 (2013).

APHA/AWWA/WEF, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". *Standard Methods* (2012).

Arthur, C., Baker, J., Bamford, H., "Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris". Group, (January), 530 (2009).

Atamanalp, M., Köktürk, M., Parlak, V., Ucar, A., Arslan, G., Alak, G., "A new record for the presence of microplastics in dominant fish species of the Karasu River Erzurum, Turkey". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (2021) <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16243-w>.

Bakaraki Turan, N., Sari Erkan, H. and Onkal Engin, G., "Microplastics in wastewater treatment plants: Occurrence, fate and identification". *Process Saf. Environ. Prot.*, 146, 77–84 (2021).

Bayo, J., Olmos, S., López-Castellanos, J. and Alcolea, A., "Microplastics and microfibers in the sludge of a municipal wastewater treatment plant". *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, 11(5), 812–821 (2016).

Bayo, J., Olmos, S. and López-Castellanos, J., "Assessment of microplastics in a municipal wastewater treatment plant with tertiary treatment: Removal efficiencies and loading per day into the environment". *Water (Switzerland)*, 13 (10) (2021).

Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M. and Sabbah, I., "Microplastic distributions in a domestic wastewater treatment plant: Removal efficiency, seasonal variation and influence of sampling technique". *Sci. Total Environ.*, 752, 141880 (2021).

Berglund, E., Fogelberg, V., Nilsson, P. A. and Hollander, J., "Microplastics in a freshwater mussel (*Anodonta anatina*) in Northern Europe". *Sci. Total Environ.*, 697, 134192 (2019).

Bergmann, M., Gutow, L. and Klages, M., "Marine anthropogenic litter". *Marine Anthropogenic Litter*, 1–447 (2015).

Bilgin, M., Yurtsever, M. and Karadagli, F., "Microplastic removal by aerated grit chambers versus settling tanks of a municipal wastewater treatment plant". *J. Water Process. Eng.*, 38, 101604 (2020).

Blair, R. M., Waldron, S. and Gauchotte-Lindsay, C., "Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period". *Water Res.*, 163, 114909 (2019).

Boots, B., Russell, C. W., Green, D. S. 2019. "Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and below Ground". *Environ. Sci. Technol.*, 53 (19), 11496–11506.

Botterell, Z. L. R., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C. and Lindeque, P. K., "Bioavailability and effects of microplastics on marine zooplankton: A review". *Environ. Pollut.*, 245, 98–110 (2019).

Bretas Alvim, C., Bes-Piá, M. A. and Mendoza-Roca, J. A. "Separation and identification of microplastics from primary and secondary effluents and activated sludge from wastewater treatment plants". *Chem. Eng. J.*, 402, 126293 (2020a).

Bretas Alvim, C., Mendoza-Roca, J. A. and Bes-Piá, A., "Wastewater treatment plant as microplastics release source – Quantification and identification techniques". *J. Environ. Manage.*, 255 (2020b).

Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., Thompson, R., "Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks". *Environ. Sci. Technol.*, (ACS Publications), 9175–9179 (2011).

Bui, X. T., Vo, T. D. H., Nguyen, P. T., Nguyen, V. T., Dao, T. S. and Nguyen, P. D., "Microplastics pollution in wastewater: Characteristics, occurrence and removal technologies". *Environ. Technol. Innov.*, 19, 101013 (2020).

Campanale, C., Galafassi, S., Savino, I., Massarelli, C., Ancona, V., Volta, P. and Uricchio, V. F., "Microplastics pollution in the terrestrial environments: Poorly known diffuse sources and implications for plants". *Sci. Total Environ.*, 805, 150431 (2022).

Canniff, P. M. and Hoang, T. C., "Microplastic ingestion by *Daphnia magna* and its enhancement on algal growth". *Sci. Total Environ.*, 633, 500–507 (2018).

Carr, S. A., Liu, J. and Tesoro, A. G., "Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants". *Water Res.*, 91, 174–182 (2016).

Chand, R., Rasmussen, L. A., Tumlin, S. and Vollertsen, J., "The occurrence and fate of microplastics in a mesophilic anaerobic digester receiving sewage sludge, grease, and fatty slurries". *Sci. Total Environ.*, 798, 149287 (2021).

Chaukura, N., Kefeni, K. K., Chikurunhe, I., Nyambiya, I., Gwenzi, W., Moyo, W., Nkambule, T. T. I., Mamba, B. B. and Abulude, F. O. "Microplastics in the Aquatic Environment—The Occurrence, Sources, Ecological Impacts, Fate, and Remediation Challenges". *Pollutants*, 1 (2), 95–118 (2021).

Chen, G., Feng, Q. and Wang, J., "Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans". *Sci. Total Environ.*, 703, 135504 (2020).

Chen, G., Fu, Z., Yang, H. and Wang, J., "An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere". *Trends. Analyt. Chem.*, 130, 115981 (2020).

Cheng, Y. L., Kim, J. G., Kim, H. Bin, Choi, J. H., Fai Tsang, Y. and Baek, K., "Occurrence and removal of microplastics in wastewater treatment plants and drinking water purification facilities: A review". *Chem. Eng. J.*, 410, 128381

(2021).

Cheng, Y., Zhu, L., Song, W., Jiang, C., Li, B., Du, Z., Wang, J., Wang, J., Li, D. and Zhang, K., "Combined effects of mulch film-derived microplastics and atrazine on oxidative stress and gene expression in earthworm (*Eisenia fetida*)". *Sci. Total Environ.*, 746, 141280 (2020).

Choy, C. A., Robison, B. H., Gagne, T. O., Erwin, B., Firl, E., Halden, R. U., Andrew Hamilton, J., Katija, K., Lisin, S. E., Rolsky, C. and Van Houtan, K. S., "The vertical distribution and biological transport of marine microplastics across the epipelagic and mesopelagic water column". *Sci. Rep.*, 10 (1), 1–9 (2020).

Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T. S., "Microplastics as contaminants in the marine environment: A review". *Mar. Pollut. Bull.*, 62(12), 2588–2597 (2011).

Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E. and Geissen, V., "Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal". *Sci. Total Environ.*, 671, 411–420 (2019).

Coyle, R., Hardiman, G. and Driscoll, K. O., "Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems". *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 2 (2020).

Crawford, C. B. and Quinn, B., "Microplastics, standardisation and spatial distribution". *Microplastic Pollutants*, 101–130 (2017).

Crossman, J., Hurley, R. R., Futter, M. and Nizzetto, L., "Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment". *Sci. Total Environ.*, 724, 138334 (2020).

de Haan, W. P., Sanchez-vidal, A. and Canals, M., "Floating microplastics in the Western Mediterranean Sea and their export to the deep by marine aggregates". *Mar. Pollut. Bull.*, 140, 523–535 (2019).

De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., ... Rillig, M. C. 2019. "Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance". *Environ. Sci. Technol.*, 53 (10), 6044–6052.

Deng, J., Guo, P., Zhang, X., Su, H., Zhang, Y., Wu, Y. and Li, Y. "Microplastics and accumulated heavy metals in restored mangrove wetland surface sediments at Jinjiang Estuary (Fujian, China)". *Mar. Pollut. Bull.*, 159, 111482 (2020).

Ding, L., Zhang, S., Wang, X., Yang, X., Zhang, C., Qi, Y. and Guo, X., "The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China". *Sci. Total Environ.*, 720, 137525 (2020).

Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N. and Tassin, B., "Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris". *Environ. Chem.*, 12 (5), 592–599 (2015).

Dümichen, E., Eisentraut, P., Bannick, C. G., Barthel, A. K., Senz, R., Braun, U. 2017. "Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method". *Chemosphere*, 174, 572–584.

Dyachenko, A., Mitchell, J. and Arsem, N., "Extraction and identification of microplastic particles from secondary wastewater treatment plant (WWTP) effluent". *Anal. Methods.*, 9 (9), 1412–1418 (2017).

Eckert, E. M., Di Cesare, A., Kettner, M. T., Arias-Andres, M., Fontaneto, D., Grossart, H. P. and Corno, G., "Microplastics increase impact of treated wastewater on freshwater microbial community". *Environ. Pollut.*, 234, 495–502 (2018).

Edo, C., González-Pleiter, M., Leganés, F., Fernández-Piñas, F., Rosal, R., "Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge". *Environ. Pollut.*, 259, 113837 (2020).

EL Hayany, B., EL Fels, L., Quénéa, K., Dignac, M. F., Rumpel, C., Gupta, V. K., Hafidi, M., "Microplastics from lagooning sludge to composts as revealed by fluorescent staining- image analysis, Raman spectroscopy and pyrolysis-GC/MS". *J. Environ. Manage.*, 275 (2020).

Enfrin, M., Dumée, L. F. and Lee, J., "Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions". *Water Res.*, 161, 621–638 (2019).

Estahbanati, S. and Fahrenfeld, N. L., "Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water". *Chemosphere*, 162, 277–284 (2016).

Franco, A. A., Arellano, J. M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Quiroga, J. M. and Coello, M. D., "Microplastic pollution in wastewater treatment plants in the city of Cádiz: Abundance, removal efficiency and presence in receiving water body". *Sci. Total Environ.*, 776, 145795 (2021).

Franco, A. A., Arellano, J. M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Zahedi,

S., Quiroga, J. M. and Coello, M. D., "Mapping microplastics in Cadiz (Spain): Occurrence of microplastics in municipal and industrial wastewaters". *J. Water Process. Eng.*, 38, 101596 (2020).

Free, C. M., Jensen, O. P., Mason, S. A., Eriksen, M., Williamson, N. J. and Boldgiv, B., "High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake". *Mar. Pollut. Bull.*, 85 (1), 156–163 (2014).

Frias, J. P. G. L. and Nash, R., "Microplastics: Finding a consensus on the definition". *Mar. Pollut. Bull.*, 138, 145–147 (2019).

Fu, S. F., Ding, J. N., Zhang, Y., Li, Y. F., Zhu, R., Yuan, X. Z., Zou, H. 2018. "Exposure to polystyrene nanoplastic leads to inhibition of anaerobic digestion system". *Sci. Total Environ.*, 625, 64–70.

Funck, M., Al-Azzawi, M. M. S., Yildirim, A., Knoop, O., Schmidt, T. C., Drewes, J. E., Tuerk, J. 2021. "Release of microplastic particles to the aquatic environment via wastewater treatment plants: The impact of sand filters as tertiary treatment". *Chem. Eng. J.*, 426 (2021).

Gallagher, A., Rees, A., Rowe, R., Stevens, J. and Wright, P., "Microplastics in the Solent estuarine complex, UK: An initial assessment". *Mar. Pollut. Bull.*, 102 (2), 243–249 (2016).

Gao, D., Li, X., Liu, H., "Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil". *Sci. Total Environ.*, 742, 140355 (2020).

Gasperi, J., Wright, S. L., Dris, R., Collard, F., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Kelly, F. J. and Tassin, B., "Microplastics in air: Are we breathing it in?". *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, 1, 1–5 (2018).

Gatidou, G., Arvaniti, O. S. and Stasinakis, A. S., "Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants". *J. Hazard. Mater.*, 367, 504–512 (2019).

Gies, E. A., LeNoble, J. L., Noël, M., Etemadifar, A., Bishay, F., Hall, E. R. and Ross, P. S., "Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada". *Mar. Pollut. Bull.*, 133, 553–561 (2018).

Gopinath, K., Seshachalam, S., Neelavannan, K., Anburaj, V., Rachel, M., Ravi, S., Bharath, M. and Achyuthan, H., "Quantification of microplastic in Red Hills Lake of Chennai city, Tamil Nadu, India". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27 (26), 33297–33306 (2020).

Guo, X. and Wang, J., "Projecting the sorption capacity of heavy metal ions onto microplastics in global aquatic environments using artificial neural networks". *J. Hazard. Mater.*, 402, 123709 (2021).

Gündoğdu, S., "Contamination of table salts from Turkey with microplastics". *Food Addit Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.*, 35 (5), 1006–1014 (2018).

Gündoğdu, S., Çevik, C., Güzel, E. and Kilercioğlu, S., "Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations". *Environ. Monit. Assess.*, 190 (11) (2018).

Güven, O., Gökdağ, K., Jovanović, B. and Kideyş, A. E., "Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish". *Environ. Pollut.*, 223, 286–294 (2017).

Hamidian, A. H., Ozumchelouei, E. J., Feizi, F., Wu, C., Zhang, Y. and Yang, M., "A review on the characteristics of microplastics in wastewater treatment plants: A source for toxic chemicals". *J. Clean. Prod.*, 295, 126480 (2021).

He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y. and Lei, L., "Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks". *Trends Anal. Chem.*, 109, 163–172 (2018).

He, P., Chen, L., Shao, L., Zhang, H. and Lü, F., "Municipal solid waste (MSW)landfill: A source of microplastics? -Evidence of microplastics in landfill leachate". *Water Res.*, 159, 38–45 (2019).

He, Z. W., Yang, W. J., Ren, Y. X., Jin, H. Y., Tang, C. C., Liu, W. Z., Yang, C. X., Zhou, A. J. and Wang, A. J. 2021. "Occurrence, effect, and fate of residual microplastics in anaerobic digestion of waste activated sludge: A state-of-the-art review". *Bioresour. Technol.*, 331, 125035 (2021).

Hernandez, L. M., Xu, E. G., Larsson, H. C. E., Tahara, R., Maisuria, V. B. and Tufenkji, N., "Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea". *Environ. Sci. Technol.*, 53, 12300–12310 (2019).

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., Thiel, M. 2012. "Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification". *Environ. Sci. Technol.*, 46 (6), 3060–3075.

Hidayaturrahman, H. and Lee, T. G., "A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: Identification, quantification, and

fate of microplastics during treatment process". *Mar. Pollut. Bull.*, 146, 696–702 (2019).

Horton, A. A., Cross, R. K., Read, D. S., Jürgens, M. D., Ball, H. L., Svendsen, C., Vollertsen, J. and Johnson, A. C., "Semi-automated analysis of microplastics in complex wastewater samples". *Environ. Pollut.*, 268, 115841 (2021).

Horton, A. A. and Dixon, S. J., "Microplastics: An introduction to environmental transport processes". *WIREs Water*, 5(2), 1–10 (2017).

Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., Svendsen, C. 2017. "Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities". *Sci. Total Environ.*, 586, 127–141.

Huang, C., Ge, Y., Yue, S., Zhao, L. and Qiao, Y., "Microplastics aggravate the joint toxicity to earthworm *Eisenia fetida* with cadmium by altering its availability". *Sci. Total Environ.*, 753, 142042 (2021).

Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X. and Zhang, Y., "Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health". *J. Hazard. Mater.*, 405, 124187 (2021).

Hurley, R. R., Lusher, A. L., Olsen, M. and Nizzetto, L., "Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices". *Environ. Sci. Technol.*, 52 (13), 7409–7417 (2018).

Il Kwak, J. and An, Y.-J., "Microplastic digestion generates fragmented nanoplastics in soils and damages earthworm spermatogenesis and coelomocyte viability". *J. Hazard. Mater.*, 402, 124034 (2020).

Jabeen, K., Su, L., Li, J., Yang, D., Tong, C., Mu, J. and Shi, H., "Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China". *Environ. Pollut.*, 221, 141–149 (2017).

Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M. and Klobučar, G., "Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*". *Environ. Pollut.*, 250, 831–838 (2019).

Jiang, J., Wang, X., Ren, H., Cao, G., Xie, G., Xing, D. and Liu, B., "Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China". *Sci. Total Environ.*, 746, 141378

(2020).

Jin, Y., Lu, L., Tu, W., Luo, T., Fu, Z. 2019. "Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice". *Sci. Total Environ.*, 649, 308–317.

Jones, J. I., Vdovchenko, A., Cooling, D., Murphy, J. F., Arnold, A., Pretty, J. L., ... Resmini, M. 2020. "Systematic analysis of the relative abundance of polymers occurring as microplastics in freshwaters and estuaries". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17 (24), 1–12.

Kang, P., Ji, B., Zhao, Y., Wei, T. 2020. "How can we trace microplastics in wastewater treatment plants: A review of the current knowledge on their analysis approaches". *Sci. Total Environ.*, 745, 140943.

Karlsson, T. M., Vethaak, A. D., Almroth, B. C., Ariese, F., van Velzen, M., Hassellöv, M. and Leslie, H. A., "Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation". *Mar. Pollut. Bull.*, 122 (1–2), 403–408 (2017).

Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K. and Hinata, H., "Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan". *Environ. Pollut.*, 244, 958–965 (2019).

Kazour, M., Terki, S., Rabhi, K., Jemaa, S., Khalaf, G. and Amara, R., "Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill". *Mar. Pollut. Bull.*, 146(May), 608–618 (2019).

Khalid, N., Aqeel, M. and Noman, A., "Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly". *Environ. Pollut.*, 267, 115653 (2020).

Khalid, N., Aqeel, M., Noman, A., Khan, S. M. and Akhter, N., "Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments". *Environ. Pollut.*, 290, 118104 (2021).

Kittipongvises, S., Phetrak, A., Hongprasith, N., Lohwacharin, J., "Unravelling capability of municipal wastewater treatment plant in Thailand for microplastics: Effects of seasonality on detection, fate and transport". *J. Environ. Manage.*, 302(PA), 113990 (2022).

Klein, M. and Fischer, E. K., "Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany". *Sci. Total Environ.*, 685, 96–103 (2019).

Kooi, M. and Koelmans, A. A., "Simplifying microplastic via continuous probability distributions for size, shape, and density". *Environ. Sci. Technol. Letters*, 6 (9), 551–557 (2019).

Kowalski, N., Reichardt, A. M. and Waniek, J. J., "Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors". *Mar. Pollut. Bull.*, 109(1), 310–319 (2016).

Koyuncuoğlu, P. and Erden, G., "Sampling, pre-treatment, and identification methods of microplastics in sewage sludge and their effects in agricultural soils: a review". *Environ. Monit. Assess.*, 193, 175 (2021).

Kumar, R., Sharma, P., Manna, C. and Jain, M., "Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: A review". *Sci. Total Environ.*, 782, 146695 (2021).

Lachenmeier, D. W., Kocareva, J. and Noack, D., "Microplastic identification in German beer - an artefact of laboratory DEUTSCHE LEBENSMITTEL-RUNDSCHAU Microplastic identification in German beer – an artefact of laboratory contamination?". *Deutsche Lebensmittel-Rundschau: Zeitschrift für Lebensmittelkunde und Lebensmittelrecht*, (September) (2018).

Lahive, E., Walton, A., Horton, A. A., Spurgeon, D. J. and Svendsen, C., "Microplastic particles reduce reproduction in the terrestrial worm *Enchytraeus crypticus* in a soil exposure". *Environ. Pollut.*, 255, 113174 (2019).

Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M. and Sillanpää, M., "Intercomparison study on commonly used methods to determine microplastics in wastewater and sludge samples". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26 (12), 12109–12122 (2019).

Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M. and Sillanpää, M., "Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology". *Water Res.*, 133, 236–246 (2018).

Lassen, C., Foss Hansen, S., Magnusson, K., Norén, F., Bloch Hartmann, N. I., Rehne Jensen, P., Gissel Nielsen, T. and Brinch, A., "Microplastics Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark". Copenhagen : The Danish Environmental Protection Agency, (2015).

Lee, H., Kim, Y., "Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea". *Mar. Pollut. Bull.*, 137, 1–8 (2018).

Lee, H., Kunz, A., Shim, W. J. and Walther, B. A., "Microplastic contamination

of table salts from Taiwan, including a global review". *Scientific Reports*, 9 (1), 1–9 (2019).

Lei, L., Wu, S., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Fu, Z., Shi, H., Raley-Susman, K. M. and He, D., "Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*". *Sci. Total Environ.*, 619–620, 1–8 (2018).

Leslie, H. A., Brandsma, S. H., van Velzen, M. J. M. and Vethaak, A. D., "Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota". *Environ. Int.*, 101, 133–142 (2017).

Li, H., Xu, S., Wang, S., Yang, J., Yan, P., Chen, Y., Guo, J. and Fang, F., "New insight into the effect of short-term exposure to polystyrene nanoparticles on activated sludge performance". *J. Water Process. Eng.*, 38 (174), 101559 (2020).

Li, J., Liu, H. and Paul Chen, J., "Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection". *Water Res.*, 137, 362–374 (2018a).

Li, J., Song, Y., Cai, Y. 2020. "Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks". *Environ. Pollut.*, 257, 113570.

Li, J., Zhang, K. and Zhang, H., "Adsorption of antibiotics on microplastics". *Environ. Pollut.*, 237, 460–467 (2018b).

Li, L., Luo, Y., Li, R., Zhou, Q., Peijnenburg, W. J. G. M., Yin, N., Yang, J., Tu, C. and Zhang, Y., "Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode". *Nat. Sustain.*, 3 (11), 929–937 (2020).

Li, Q., Wu, J., Zhao, X., Gu, X., Ji, R., "Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge". *Environ. Pollut.*, 254, 113076 (2019).

Li, W. C. "The occurrence, fate, and effects of microplastics in the marine environment". *Microplastic Contamination in Aquatic Environments: An Emerging Matter of Environmental Urgency*. Elsevier Inc. (2018).

Li, X., Chen, L., Mei, Q., Dong, B., Dai, X., Ding, G., Zeng, E. Y., "Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China". *Water Res.*, 142, 75–85 (2018).

Li, Y., Zhang, H. and Tang, C., "A review of possible pathways of marine microplastics transport in the ocean". *Anthropocene Coasts*, 3 (1), 6–13 (2020).

Liang, T., Lei, Z., Fuad, M. T. I., Wang, Q., Sun, S., Fang, J. K. H. and Liu, X., "Distribution and potential sources of microplastics in sediments in remote lakes of Tibet, China". *Sci. Total Environ.*, 806, 150526 (2022).

Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., ... Geissen, V. 2017. "Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil". *Chemosphere*, 185, 907–917.

Liu, K., Wang, X., Fang, T., Xu, P., Zhu, L., Li, D. 2019. "Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai". *Sci. Total Environ.*, 675, 462–471.

Liu, S., Chen, H., Wang, J., Su, L., Wang, X., Zhu, J. and Lan, W., "Ecotoxicology and Environmental Safety The distribution of microplastics in water, sediment, and fish of the Dafeng River, a remote river in China". *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 228, 113009 (2021).

Liu, W., Zhang, J., Liu, H., Guo, X., Zhang, X., Yao, X., Cao, Z. and Zhang, T., "A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms". *Environ. Int.*, 146, 106277 (2021).

Liu, Z., Zhuan, Q., Zhang, L., Meng, L., Fu, X. and Hou, Y., "Polystyrene Microplastics Induced Female Reproductive Toxicity in Mice". *J. Hazard. Mater.*, 127629 (2021).

Lusher, A. L., Bråte, I. L. N., Munno, K., Hurley, R. R., Welden, N. A. 2020. "Is It or Isn't It: The Importance of Visual Classification in Microplastic Characterization". *Appl. Spectrosc.*, 74(9), 1139–1153.

Lv, X., Dong, Q., Zuo, Z., Liu, Y., Huang, X., Wu, W. M. 2019. "Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies". *J. Clean. Prod.*, 225, 579–586 (2019).

Ma, Y., Huang, A., Cao, S., Sun, F., Wang, L., Guo, H. and Ji, R., "Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water". *Environ. Pollut.*, 219, 166–173 (2016).

Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., Avio, C. G., Della Torre, C., Parenti, C. C., Gorbi, S. and Regoli, F., "The fate of microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant". *Sci. Total Environ.*, 652, 602–610 (2019).

Mahat, S., "Separation and quantification of Microplastics from Beach and Sediment samples using the Bauta microplastic-sediment separator". Faculty of Environment Science and Natural Resource Management (2017).

Mahon, A. M., O'Connell, B., Healy, M. G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R. and Morrison, L., "Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment". *Environ. Sci. Technol.*, 51(2), 810–818 (2017).

Majewsky, M., Bitter, H., Eiche, E. and Horn, H., "Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC)". *Sci. Total Environ.*, 568, 507–511 (2016).

Mallow, O., Spacek, S., Schwarzböck, T., Fellner, J. and Rechberger, H., "A new thermoanalytical method for the quantification of microplastics in industrial wastewater". *Environ. Pollut.*, 259 (2020).

Mason, S. A., Garneau, D., Sutton, R., Chu, Y., Ehmann, K., Barnes, J., Fink, P., Papazissimos, D. and Rogers, D. L., "Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent". *Environ. Pollut.*, 218, 1045–1054 (2016).

McCormick, A., Hoellein, T. J., Mason, S. A., Schluep, J. and Kelly, J. J., "Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river". *Environ. Sci. Technol.*, 48(20), 11863–11871 (2014).

Mendoza, A., Aceña, J., Pérez, S., López de Alda, M., Barceló, D., Gil, A. and Valcárcel, Y., "Pharmaceuticals and iodinated contrast media in a hospital wastewater: A case study to analyse their presence and characterise their environmental risk and hazard". *Environ. Res.*, 140, 225–241 (2015).

Michael S. Bank. 2021. "Microplastic in the Environment: Pattern and Process". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/351939249>.

Michielssen, M. R., Michielssen, E. R., Ni, J. and Duhaime, M. B., "Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed". *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 2 (6), 1064–1073 (2016).

Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., Primpke, S. and Gerdt, G., "Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging". *Water Res.*, 108, 365–372 (2017).

Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F. and Quinn, B., "Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment". *Environ. Sci. Technol.*, 50 (11), 5800–5808 (2016).

Mühlschlegel, P., Hauk, A., Walter, U. and Sieber, R., "Lack of evidence for microplastic contamination in honey". *Food Addit Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.*, 34 (11), 1982–1989 (2017).

Naji, A., Azadkhah, S., Farahani, H., Uddin, S. and Khan, F. R., "Microplastics in wastewater outlets of Bandar Abbas city (Iran): A potential point source of microplastics into the Persian Gulf". *Chemosphere*, 262, 128039 (2021).

Nakao, S., Akita, K., Ozaki, A., Masumoto, K. and Okuda, T., "Circulation of fibrous microplastic (microfiber) in sewage and sewage sludge treatment processes". *Sci. Total Environ.*, 795 (2021).

Napper, I. E., Davies, B. F. R., Clifford, H., Elvin, S., Koldewey, H. J., Mayewski, P. A., Miner, K. R., Elmore, A. C., Gajurel, A. P. and Thompson, R. C., "Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest". *One Earth*, 3 (5), 621–630 (2020).

Napper, I. E. and Thompson, R. C., "Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions". *Mar. Pollut. Bull.*, 112 (1–2), 39–45 (2016).

Ngo, P. L., Pramanik, B. K., Shah, K. and Roychand, R., "Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants". *Environ. Pollut.*, 255 (2019).

Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S., "Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?". *Environ. Sci. Technol.*, 50 (20), 10777–10779 (2016).

Nobre, C. R., Santana, M. F. M., Maluf, A., Cortez, F. S., Cesar, A., Pereira, C. D. S., Turra, A., "Assessment of microplastic toxicity to embryonic development of the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Echinodermata: Echinoidea)". *Mar. Pollut. Bull.*, 92 (1–2), 99–104 (2015).

Okoffo, E. D., O'Brien, S., O'Brien, J. W., Tschärke, B. J. and Thomas, K. V., "Wastewater treatment plants as a source of plastics in the environment: A review of occurrence, methods for identification, quantification and fate". *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 5 (11), 1908–1931 (2019).

Oliveri Conti, G., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., Fiore, M. and Zuccarello, P., "Micro- and nano-plastics in edible fruit and

vegetables. The first diet risks assessment for the general population". *Environ. Res.*, 187, 109677 (2020).

Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., Dicke, W. 2018. "Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water". *Water Res.*, 141, 307–316.

Payton, T. G., Beckingham, B. A. and Dustan, P., "Microplastic exposure to zooplankton at tidal fronts in Charleston Harbor, SC USA". *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 106510 (2020).

Perren, W., Wojtasik, A. and Cai, Q., "Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation". *ACS Omega*, 3 (3), 3357–3364 (2018).

Pfeiffer, F. and Fischer, E. K., "Various Digestion Protocols Within Microplastic Sample Processing—Evaluating the Resistance of Different Synthetic Polymers and the Efficiency of Biogenic Organic Matter Destruction". *Front. Environ. Sci.*, 8, 1–9 (2020).

Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T. and Janda, V., "Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water". *Sci. Total Environ.*, 643, 1644–1651 (2018).

PlasticEurope, "Plastics - the Facts". 01.09.2021 tarihinde <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data> adresinden erişildi (2019).

Prajapati, S., Beal, M., Maley, J. and Brinkmann, M., "Qualitative and quantitative analysis of microplastics and microfiber contamination in effluents of the City of Saskatoon wastewater treatment plant". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28 (25), 32545–32553 (2021).

Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C. and Rocha-Santos, T., "Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects". *Sci. Total Environ.*, 702, 134455 (2020).

Priyanka, G. M. and Udayashankara, T. H., "Methodology for Sampling , Purification , Extraction and Identification of Microplastic - A Review". *Int. J. Sci. Res.*, 7 (1), 2016–2019 (2018).

Priyanka, M. and Saravanakumar, M. P., "Preliminary examination on isolation of microplastics (MPs) in sewage sludge from the local wastewater treatment plant". *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, 9 (1), 7514–7516 (2019).

Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A. M., Huerta Lwanga, E., Beriot, N., Gertsen, H., ...

Geissen, V. 2018. "Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth". *Sci. Total Environ.*, 645, 1048–1056.

Ragoobur, D., Huerta-Lwanga, E. and Somaroo, G. D., "Microplastics in agricultural soils, wastewater effluents and sewage sludge in Mauritius". *Sci. Total Environ.*, 798, 149326 (2021).

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M. and Giorgini, E., "Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta". *Environ. Int.*, 146, 106274 (2021).

Raju, S., Carbery, M., Kuttykattil, A., Senthirajah, K., Lundmark, A., Rogers, Z., SCB, S., Evans, G. and Palanisami, T., "Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant". *Water Res.*, 173, 115549 (2020).

Reed, S., Clark, M., Thompson, R. and Hughes, K. A., "Microplastics in marine sediments near Rothera Research Station, Antarctica". *Mar. Pollut. Bull.*, 133, 460–463 (2018).

Ren, P. J., Dou, M., Wang, C., Li, G. Q., Jia, R., "Abundance and removal characteristics of microplastics at a wastewater treatment plant in Zhengzhou". *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27 (29), 36295–36305 (2020).

Rolsky, C., Kelkar, V., Driver, E., Halden, R. U. 2020. "Municipal sewage sludge as a source of microplastics in the environment". *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.*, 14, 16–22 (2020).

Ross, P. S., Chastain, S., Vassilenko, E., Etemadifar, A., Zimmermann, S., Quesnel, S. A., Eert, J., Solomon, E., Patankar, S., Posacka, A. M. and Williams, B., "Pervasive distribution of polyester fibres in the Arctic Ocean is driven by Atlantic inputs". *Nat. Commun.*, 12 (1), 106 (2021).

Ruan, Y., Zhang, K., Wu, C., Wu, R. and Lam, P. K. S., "A preliminary screening of HBCD enantiomers transported by microplastics in wastewater treatment plants". *Sci. Total Environ.*, 674, 171–178 (2019).

Ruffell, H., Pantos, O., Northcott, G. and Gaw, S., "Wastewater treatment plant effluents in New Zealand are a significant source of microplastics to the environment". *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.*, 0 (0), 1–17 (2021).

Salmi, P., Ryymin, K., Karjalainen, A. K., Mikola, A., Uurasjärvi, E. and

Talvitie, J., "Particle balance and return loops for microplastics in a tertiary-level wastewater treatment plant". *Water Sci. Technol.*, 84(1), 89–100 (2021).

Sarker, A., Deepo, D. M., Nandi, R., Rana, J., Islam, S., Rahman, S., Hossain, M. N., Islam, S., Baroi, A. and Kim, J. E., "A review of microplastics pollution in the soil and terrestrial ecosystems: A global and Bangladesh perspective". *Sci. Total Environ.*, 733, 139296 (2020).

Shim, W. J., Hong, S. H. and Eo, S. E., "Identification methods in microplastic analysis: A review". *Anal. Methods.*, 9 (9), 1384–1391 (2017).

Silva, A. B., Bastos, A. S., Justino, C. I. L., da Costa, J. P., Duarte, A. C. and Rocha-Santos, T. A. P., "Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review". *Anal. Chim. Acta*, 1017, 1–19 (2018).

Simon, M., van Alst, N. and Vollertsen, J., "Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FTIR) imaging". *Water Res.*, 142, 1–9 (2018).

Singh, N., Mondal, A., Bagri, A., Tiwari, E., Khandelwal, N., Monikh, F. A., Darbha, G. K., "Characteristics and spatial distribution of microplastics in the lower Ganga River water and sediment". *Mar. Pollut. Bull.*, 163, 111960 (2021).

Sol, Daniel Laca, A., Laca, A., Díaz, M., "Microplastics in Wastewater and Drinking Water Treatment Plants : Occurrence and Removal of Microfibres". *Appl. Sci.*, 11 (10109) (2021).

Sol, D., Laca, A., Laca, A. and Díaz, M., "Approaching the environmental problem of microplastics: Importance of WWTP treatments". *Sci. Total Environ.*, 740, 140016 (2020).

Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Rani, M., Lee, J. and Shim, W. J., "A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples". *Mar. Pollut. Bull.*, 93 (1–2), 202–209 (2015).

Su, L., Xue, Y., Li, L., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D. and Shi, H., "Microplastics in Taihu Lake, China". *Environ. Pollut.*, 216, 711–719 (2016).

Sujathan, S., Kniggendorf, A. K., Kumar, A., Roth, B., Rosenwinkel, K. H. and Nogueira, R., "Heat and Bleach: A Cost-Efficient Method for Extracting Microplastics from Return Activated Sludge". *Arch. Environ. Contam.*

Toxicol., 73 (4), 641–648 (2017).

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M. and Ni, B. J., "Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal". *Water Res.*, 152, 21–37 (2019).

Sun, M., Yang, Y., Huang, M., Fu, S., Hao, Y., Hu, S., Lai, D. and Zhao, L., "Adsorption behaviors and mechanisms of antibiotic norfloxacin on degradable and nondegradable microplastics". *Sci. Total Environ.*, (92), 151042 (2021).

Sun, W., Meng, Z., Li, R., Zhang, R., Jia, M., Yan, S., Tian, S., Zhou, Z. and Zhu, W., "Joint effects of microplastic and dufulin on bioaccumulation, oxidative stress and metabolic profile of the earthworm (*Eisenia fetida*)". *Chemosphere*, 263, 128171 (2021).

Tagg, A. S., Harrison, J. P., Ju-Nam, Y., Sapp, M., Bradley, E. L., Sinclair, C. J. and Ojeda, J. J., "Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater". *Chem. Commun.*, 53(2), 372–375 (2017).

Tagg, A. S., Sapp, M., Harrison, J. P. and Ojeda, J. J., "Identification and Quantification of Microplastics in Wastewater Using Focal Plane Array-Based Reflectance Micro-FT-IR Imaging". *Anal. Chem.*, 87 (12), 6032–6040 (2015).

Talvitie, J., Heinonen, M., Pääkkönen, J. P., Vahtera, E., Mikola, A., Setälä, O. and Vahala, R., "Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea". *Water Sci. Technol.*, 72 (9), 1495–1504 (2015).

Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. and Setälä, O., "Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies". *Water Res.*, 123, 401–407 (2017a).

Talvitie, J., Mikola, A., Setälä, O., Heinonen, M. and Koistinen, A., "How well is microlitter purified from wastewater? – A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant". *Water Res.*, 109, 164–172 (2017b).

Tan, X., Yu, X., Cai, L., Wang, J., Peng, J. 2019. "Microplastics and associated PAHs in surface water from the Feilaixia Reservoir in the Beijiing River, China". *Chemosphere*, 221, 834–840.

Tang, S., Lin, L., Wang, X., Feng, A. and Yu, A., "Pb(II) uptake onto nylon microplastics: Interaction mechanism and adsorption performance". *J. Hazard. Mater.*, 386, 121960 (2020).

Thompson, R. C., Olson, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D. and Russell, A. E., "Lost at Sea: Where Is All the Plastic?". *Science*, 304 (5672), 838 (2004).

Tsering, T., Sillanpää, M., Sillanpää, M., Viitala, M. and Reinikainen, S. P., "Microplastics pollution in the Brahmaputra River and the Indus River of the Indian Himalaya". *Sci. Total Environ.*, 789 (2021).

Urbano, V. R., Mendonça, T. G., Bastos, R. G. and Souza, C. F., "Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield". *Agric. Water Manag.*, 181, 108–115 (2017).

Urbina, M. A., Correa, F., Aburto, F., Ferrio, J. P. 2020. "Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize". *Sci. Total Environ.*, 741, 140216.

Uzun, P. and Bilgili, U., "Aritma Çamurlarının Tarımda Kullanılma Olanakları". *Bursa Uludag Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 25 (2), 135–146 (2011).

van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F. and Geissen, V. "Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils". *Environ. Pollut.*, 261, 114198 (2020).

Vollertsen, J. (ed), Hansen, A. A. (ed). 2017. "Microplastic in Danish wastewater: Sources, occurrences and fate". Tarihinde adresinden erişildi <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2017/03/978-87-93529-44-1.pdf> <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2017/03/978-87-93529-44-1.pdf>

Wang, F., Yang, W., Cheng, P., Zhang, S., Zhang, S., Jiao, W. and Sun, Y., "Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions". *Chemosphere*, 235, 1073–1080 (2019).

Wang, L. C., Lin, J. C. Te, Dong, C. Di, Chen, C. W. and Liu, T. K., "The sorption of persistent organic pollutants in microplastics from the coastal environment". *J. Hazard. Mater.*, 420, 126658 (2021).

Wang, W., Ge, J. and Yu, X., "Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review". *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 189, 109913 (2020).

Wang, W., Ge, J., Yu, X. and Li, H., "Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective". *Sci. Total Environ.*, 708, 134841 (2020).

Wang, W., Ndungu, A. W., Li, Z. and Wang, J., "Microplastics pollution in

inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China". *Sci. Total Environ.*, 575, 1369–1374 (2017).

Wang, W., Wairimu, A., Li, Z. and Wang, J., "Microplastics pollution in inland freshwaters of China : A case study in urban surface waters of Wuhan , China". *Sci. Total Environ.*, 575, 1369–1374 (2017).

Wang, W., Yuan, W., Chen, Y. and Wang, J., "Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China". *Sci. Total Environ.*, 633, 539–545 (2018).

Wang, Y. L., Lee, Y. H., Chiu, I. J., Lin, Y. F. and Chiu, H. W., "Potent impact of plastic nanomaterials and micromaterials on the food chain and human health". *Int. J. Mol. Sci.*, 21 (5), 1727 (2020).

Way, C., Hudson, M. D., Williams, I. D. and Langley, G. J., "Evidence of underestimation in microplastic research: A meta-analysis of recovery rate studies". *Sci. Total Environ.*, 805, 150227 (2022).

Wei, S., Luo, H., Zou, J., Chen, J., Pan, X., Rousseau, D. P. L. and Li, J., "Characteristics and removal of microplastics in rural domestic wastewater treatment facilities of China". *Sci. Total Environ.*, 739, 139935 (2020).

Wei, W., Huang, Q. S., Sun, J., Wang, J. Y., Wu, S. L. and Ni, B. J., "Polyvinyl Chloride Microplastics Affect Methane Production from the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge through Leaching Toxic Bisphenol-A". *Environ. Sci. Technol.*, 53 (5), 2509–2517 (2019).

Wright, S. L., Ulke, J., Font, A., Chan, K. L. A. and Kelly, F. J., "Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport". *Environ. Int.*, 136, 105411 (2020).

Xu, B., Liu, F., Cryder, Z., Huang, D., Lu, Z., He, Y., Wang, H., Lu, Z., Brookes, P. C., Tang, C., Gan, J. and Xu, J. "Microplastics in the soil environment: Occurrence, risks, interactions and fate—A review". *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 50 (21), 2175-2222 (2020).

Xu, G., Liu, Y., Song, X., Li, M. and Yu, Y., "Size effects of microplastics on accumulation and elimination of phenanthrene in earthworms". *J. Hazard. Mater.*, 403, 123966 (2021).

Xu, J., Wang, X., Zhang, Z., Yan, Z. and Zhang, Y., "Effects of chronic exposure to different sizes and polymers of microplastics on the characteristics of activated sludge". *Sci. Total Environ.*, 783, 146954 (2021).

- Xu, Q., Gao, Y., Xu, L., Shi, W., Wang, F., LeBlanc, G. A., Cui, S., An, L. H. and Lei, K., "Investigation of the microplastics profile in sludge from China's largest Water reclamation plant using a feasible isolation device". *J. Hazard. Mater.*, 388 (2020)
- Xu, X., Jian, Y., Xue, Y., Hou, Q. and Wang, L. P., "Microplastics in the wastewater treatment plants (WWTPs): Occurrence and removal". *Chemosphere*, 235, 1089–1096 (2019).
- Yang, D., Shi, H., Li, L., Li, J., Jabeen, K., Kolandhasamy, P. 2015. "Microplastic Pollution in Table Salts from China". *Environ. Sci. Technol.*, 49 (22), 13622–13627.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., Wu, C., "Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources". *Sci. Total Environ.*, 754, 141948 (2021).
- Yang, S., Zhou, M., Chen, X., Hu, L., Xu, Y., Fu, W., Li, C. 2022. "A comparative review of microplastics in lake systems from different countries and regions". *Chemosphere*, 286 (P2), 131806.
- Yu, F., Li, Y., Huang, G., Yang, C., Chen, C., Zhou, T., Zhao, Y. and Ma, J. 2020. "Adsorption behavior of the antibiotic levofloxacin on microplastics in the presence of different heavy metals in an aqueous solution". *Chemosphere*, 260.
- Yu, F., Yang, C., Huang, G., Zhou, T., Zhao, Y. and Ma, J., "Interfacial interaction between diverse microplastics and tetracycline by adsorption in an aqueous solution". *Sci. Total Environ.*, 721, 137729 (2020).
- Yurtsever, M., "Microplastic pollution threat in table salt that an abiotic sea product". *EgeJFAS*, 35 (3), 243–249 (2018).
- Zhang, B., Yang, X., Chen, L., Chao, J., Teng, J. and Wang, Q., "Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods and ecological impacts". *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 95 (8), 2052-2068 (2020).
- Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S. and Gao, P., "Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China". *J. Clean. Prod.*, 291, 125968 (2021).
- Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., Gao, P. 2020. "An Overlooked Entry Pathway of Microplastics into Agricultural Soils from Application of Sludge-Based Fertilizers". *Environ. Sci. Technol.*, 54 (7), 4248–4255.

Zhang, M., Zhao, Y., Qin, X., Jia, W., Chai, L., Huang, M., Huang, Y. 2019. "Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil". *Sci. Total Environ.*, 688, 470–478.

Zhang, Q., Liu, T., Liu, L., Fan, Y., Rao, W., Zheng, J., Qian, X. 2021. "Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake". *Sci. Total Environ.*, 795, 148745.

Zhang, X., Chen, J. and Li, J., "The removal of microplastics in the wastewater treatment process and their potential impact on anaerobic digestion due to pollutants association". *Chemosphere*, 251 (2020).

Zhu, J., Zhang, Q., Li, Y., Tan, S., Kang, Z., Yu, X., Lan, W., Cai, L., Wang, J., Shi, H., "Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China". *Sci. Total Environ.*, 658, 62–68 (2019).

Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L. and Leusch, F. D. L., "Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics". *Water Res.*, 112, 93–99 (2017).

Ziajahromi, S., Neale, P. A., Telles Silveira, I., Chua, A. and Leusch, F. D. L., "An audit of microplastic abundance throughout three Australian wastewater treatment plants". *Chemosphere*, 263, 128294 (2021).

EKLER

9. EKLER

KIŞ MEVSİMİ ATIKSULARDA MİKROPLASTİK SAYIM ANALİZİ SONUÇLARI														
Numune		Boyut Analizi			Renk Analizi						Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)
Yeri	Tarihi	>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	Parça	Lif	Film	
W1	01.12.2020	216	366	2678	176	798	136	100	1948	102	296	1404	1560	3260
	16.12.2020	284	358	3190	286	930	158	110	2254	94	354	1610	1868	3832
	6.01.2021	402	674	6934	368	1818	314	234	5112	164	1334	3598	3078	8010
	20.01.2021	588	978	3532	288	1346	404	224	2698	138	906	2080	2112	5098
	3.02.2021	456	698	3646	222	1180	326	196	2732	144	754	2240	1806	4800
	17.02.2021	484	682	3708	272	1212	340	198	2706	146	868	2064	1942	4874
	Ortalama	405,00	626,00	3948,00	268,67	1214,00	279,67	177,00	2908,33	131,33	752,00	2166,00	2061,00	4979,00
STD Sapma	136,16	234,07	1511,66	65,30	356,96	107,58	57,75	1124,53	27,35	385,29	769,89	529,97	1644,07	
W2	01.12.2020	436	366	2434	218	794	278	122	1690	134	420	1436	1380	3236
	16.12.2020	466	418	2776	284	902	244	126	1944	160	388	1694	1578	3660
	6.01.2021	346	436	5820	294	1510	280	152	4270	96	1040	2926	2636	6602
	20.01.2021	316	260	3316	236	1004	218	144	2224	66	636	1642	1614	3892
	3.02.2021	404	384	3166	266	848	268	140	2330	102	704	1652	1598	3954
	17.02.2021	380	360	2912	232	778	238	148	2130	126	640	1578	1434	3652
	Ortalama	391,33	370,67	3404,00	255,00	972,67	254,33	138,67	2431,33	114,00	638,00	1821,33	1706,67	4166,00
STD Sapma	55,84	61,76	1223,01	30,80	275,70	24,90	12,11	928,64	32,96	234,94	548,64	465,12	1219,77	
W3	01.12.2020	68	148	950	110	290	74	46	562	84	138	684	344	1166
	16.12.2020	122	226	1306	136	412	150	52	788	116	190	1006	458	1654
	6.01.2021	220	172	1630	56	282	96	78	1496	14	232	1236	554	2022
	20.01.2021	106	184	536	58	66	90	46	538	28	66	522	238	826
	3.02.2021	122	210	1070	102	246	106	70	794	84	158	852	392	1402
	17.02.2021	144	178	1002	98	262	118	62	716	68	196	782	346	1324
	Ortalama	130,33	186,33	1082,33	93,33	259,67	105,67	59,00	815,67	65,67	163,33	847,00	388,67	1399,00
STD Sapma	50,68	27,87	366,76	31,10	111,65	26,30	13,25	350,85	38,21	57,68	250,22	108,32	410,22	
W4	01.12.2020	44	3	152	24	24	41	8	77	25	51	114	34	199
	16.12.2020	41	39	175	31	42	46	11	90	35	59	151	45	255
	6.01.2021	47	70	344	22	77	27	24	302	9	40	267	154	461
	20.01.2021	43	32	132	29	45	29	16	80	8	36	125	46	207
	3.02.2021	26	32	82	10	30	15	25	46	14	26	83	31	140
	17.02.2021	42	46	124	23	51	27	20	74	17	39	130	43	212
	Ortalama	40,50	37,00	168,17	23,17	44,83	30,83	17,33	111,50	18,00	41,83	145,00	58,83	245,67
STD Sapma	7,40	21,82	91,55	7,36	18,63	11,11	6,92	94,48	10,35	11,62	63,80	47,02	111,74	

KIŞ MEVSİMİ ARITMA ÇAMURLARINDA MİKROPLASTİK SAYIM ANALİZİ SONUÇLARI														
Numune		Boyut Analizi			Renk Analizi						Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/g kuru ağırlık)
Yeri	Tarihi	>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	Parça	Lif	Film	
S1	01.12.2020	1706,67	1360,00	5786,67	933,33	1040,00	826,67	240,00	5440,00	373,33	1520,00	5573,33	1760,00	8853,33
	16.12.2020	1157,89	968,42	4884,21	757,89	821,05	673,68	210,53	4294,74	252,63	1305,26	4336,84	1368,42	7010,53
	6.01.2021	1466,67	4506,67	8186,67	720,00	2266,67	1386,67	640,00	9066,67	80,00	1520,00	7760,00	4880,00	14160,00
	20.01.2021	540,00	560,00	3380,00	260,00	460,00	520,00	320,00	2640,00	280,00	360,00	3660,00	460,00	4480,00
	3.02.2021	1340,00	1500,00	4700,00	580,00	1220,00	820,00	480,00	4100,00	340,00	1020,00	4820,00	1700,00	7540,00
	17.02.2021	1400,00	1666,67	4733,33	466,67	1066,67	1066,67	444,44	4400,00	355,56	1111,11	5266,67	1422,22	7800,00
	Ortalama	1268,54	1760,29	5278,48	619,65	1145,73	882,28	389,16	4990,23	280,25	1139,40	5236,14	1931,77	8307,31
	STD Sapma	399,15	1403,36	1619,09	237,45	609,11	306,64	163,20	2189,42	108,41	433,53	1410,72	1517,79	3216,46
S2	01.12.2020	3333,33	3733,33	15933,33	2466,67	2333,33	2733,33	533,33	13666,67	1266,67	3600,00	14266,67	5133,33	23000,00
	16.12.2020	1500,00	2681,82	13409,09	1272,73	2409,09	1772,73	272,73	10818,18	1045,45	2545,45	10909,09	4136,36	17590,91
	6.01.2021	2944,44	2444,44	30277,78	1444,44	4388,89	2500,00	1888,89	25000,00	444,44	1388,89	22555,56	11722,22	35666,67
	20.01.2021	1425,53	1595,74	8872,34	489,36	1170,21	936,17	638,30	8276,60	382,98	744,68	7702,13	3446,81	11893,62
	3.02.2021	463,24	573,53	2823,53	264,71	463,24	345,59	242,65	2404,41	139,71	367,65	2441,18	1051,47	3860,29
	17.02.2021	396,95	526,72	3152,67	229,01	450,38	351,15	229,01	2679,39	137,40	404,58	2625,95	1045,80	4076,34
	Ortalama	1677,25	1925,93	12411,46	1027,82	1869,19	1439,83	634,15	10474,21	569,44	1508,54	10083,43	4422,67	16014,64
	STD Sapma	1229,32	1265,13	10225,29	873,41	1505,60	1053,02	637,59	8390,70	476,33	1309,01	7660,60	3939,31	12204,23
S3	01.12.2020	817,39	1234,78	5408,70	1095,65	1426,09	556,52	278,26	3756,52	347,83	1460,87	3547,83	2452,17	7460,87
	16.12.2020	819,67	1278,69	5852,46	1245,90	1327,87	704,92	278,69	3901,64	491,80	1491,80	3967,21	2491,80	7950,82
	6.01.2021	1238,81	2835,82	18462,69	1388,06	3761,19	1253,73	955,22	15044,78	134,33	2910,45	10716,42	8910,45	22537,31
	20.01.2021	794,52	1123,29	9726,03	726,03	2219,18	643,84	465,75	7273,97	315,07	1671,23	5287,67	4684,93	11643,84
	3.02.2021	469,39	727,89	4476,19	496,60	1122,45	306,12	238,10	3401,36	108,84	836,73	2646,26	2190,48	5673,47
	17.02.2021	583,00	866,40	5117,41	639,68	1271,26	356,28	315,79	3821,86	161,94	769,23	2955,47	2842,11	6566,80
	Ortalama	787,13	1344,48	8173,91	931,99	1854,67	636,90	421,97	6200,02	259,97	1523,39	4853,48	3928,66	10305,52
	STD Sapma	264,07	761,33	5372,50	360,77	1010,49	340,52	272,96	4563,43	150,16	773,43	3017,52	2601,41	6332,12
S4	01.12.2020	2438,27	1944,44	20802,47	5030,86	5061,73	1635,80	401,23	12067,90	987,65	5679,01	9135,80	10370,37	25185,19
	16.12.2020	2392,64	1993,87	23496,93	4539,88	5552,15	1932,52	613,50	13773,01	1472,39	6595,09	9907,98	11380,37	27883,44
	6.01.2021	1069,35	1652,62	26085,55	2559,95	9462,09	1198,96	939,73	14387,56	259,24	6059,62	8457,55	14290,34	28807,52
	20.01.2021	4198,35	4245,00	21551,52	2565,66	6624,06	2239,12	1959,23	15860,43	746,37	5784,39	14880,81	9329,66	29994,87
	3.02.2021	3650,44	3342,57	23881,78	4662,00	6817,08	2374,98	1671,28	14469,81	879,62	7520,78	13898,05	9455,95	30874,79
	17.02.2021	3247,05	3429,98	23735,48	3521,45	7225,83	2240,92	1234,79	15366,32	823,20	6585,57	13399,80	10427,15	30412,51
	Ortalama	2832,68	2768,08	23258,96	3813,30	6790,49	1937,05	1136,63	14320,84	861,41	6370,74	11613,33	10875,64	28859,72
	STD Sapma	1110,32	1046,08	1876,75	1090,26	1541,26	449,65	604,22	1331,61	391,63	683,84	2760,19	1831,77	2108,00

YAZ MEVSİMİ ATIKSULARDA MİKROPLASTİK SAYIM ANALİZİ SONUÇLARI														
Numune		Boyut Analizi			Renk Analizi						Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/L)
Yeri	Tarihi	>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	Parça	Lif	Film	
W1	14.07.2021	408	602	3216	18	300	134	98	3628	48	550	2772	904	4226
	28.07.2021	320	414	2578	14	258	156	126	2706	52	462	1856	994	3312
	11.08.2021	320	416	2822	16	306	124	106	2948	58	608	1828	1122	3558
	25.08.2021	534	728	3832	26	426	184	132	4260	66	766	3014	1314	5094
	8.09.2021	370	508	2936	18	288	132	68	3272	36	488	2438	888	3814
	22.09.2021	396	622	2608	28	334	164	106	2952	42	570	2084	972	3626
	Ortalama	391,33	548,33	2998,67	20,00	318,67	149,00	106,00	3294,33	50,33	574,00	2332,00	1032,33	3938,33
STD Sapma	79,10	124,72	470,40	5,66	58,11	22,97	22,73	570,55	10,84	108,21	492,35	161,11	643,16	
W2	14.07.2021	308	512	2224	8	168	114	78	2640	36	272	2280	492	3044
	28.07.2021	282	396	2346	18	266	116	80	2490	54	506	1460	1058	3024
	11.08.2021	272	354	2512	12	276	100	82	2644	24	498	1528	1112	3138
	25.08.2021	266	510	2900	8	344	156	114	3014	40	568	1890	1218	3676
	8.09.2021	290	450	2300	18	294	100	94	2482	52	484	1454	1102	3040
	22.09.2021	294	486	2186	20	278	130	102	2392	44	446	1502	1018	2966
	Ortalama	285,33	451,33	2411,33	14,00	271,00	119,33	91,67	2610,33	41,67	462,33	1685,67	1000,00	3148,00
STD Sapma	15,32	64,59	265,13	5,37	57,56	21,19	14,33	220,72	11,06	101,30	334,12	257,77	264,52	
W3	14.07.2021	52	82	252	20	12	56	20	272	6	30	308	48	386
	28.07.2021	40	48	192	4	22	22	12	212	8	24	204	52	280
	11.08.2021	40	62	270	8	22	46	18	278	0	30	300	42	372
	25.08.2021	48	52	242	10	22	26	24	252	8	22	246	74	342
	8.09.2021	44	46	308	4	60	32	20	278	4	38	260	100	398
	22.09.2021	48	66	298	8	46	34	28	284	12	46	282	84	412
	Ortalama	45,33	59,33	260,33	9,00	30,67	36,00	20,33	262,67	6,33	31,67	266,67	66,67	365,00
STD Sapma	4,84	13,60	42,09	5,90	18,27	12,77	5,43	27,18	4,08	8,98	38,61	22,97	48,05	
W4	14.07.2021	12	19	57	1	1	9	3	71	3	5	69	14	88
	28.07.2021	27	28	180	5	13	20	16	179	2	16	192	27	235
	11.08.2021	17	25	145	0	8	9	6	163	1	11	143	33	187
	25.08.2021	17	25	104	1	8	12	11	110	4	7	113	26	146
	8.09.2021	19	37	79	2	23	15	5	82	8	15	89	31	135
	22.09.2021	27	42	124	4	19	22	13	127	8	17	138	38	193
	Ortalama	19,83	29,33	114,83	2,17	12,00	14,50	9,00	122,00	4,33	11,83	124,00	28,17	164,00
STD Sapma	6,01	8,55	44,69	1,94	8,05	5,54	5,10	43,13	3,01	5,00	43,71	8,18	51,68	

YAZ MEVSİMİ ARITMA ÇAMURLARINDA MİKROPLASTİK SAYIM ANALİZİ SONUÇLARI														
Numune		Boyut Analizi			Renk Analizi						Şekil Analizi			Mikroplastik Konsantrasyonu (MP/g kuru ağırlık)
Yeri	Tarihi	>1000 µm	500-1000 µm	100-500 µm	Siyah	Kahverengi	Mavi-Lacivert	Kırmızı-Pembe	Şeffaf-Beyaz	Yeşil-Sarı	Parça	Lif	Film	
S1	14.07.2021	526,32	1105,26	2368,42	157,89	0,00	263,16	315,79	3210,53	52,63	368,42	2736,84	894,74	4000,00
	28.07.2021	411,76	1058,82	3470,59	0,00	58,82	352,94	470,59	3823,53	235,29	470,59	3235,29	1235,29	4941,18
	11.08.2021	705,88	1529,41	3176,47	58,82	176,47	588,24	470,59	3705,88	411,76	588,24	4058,82	764,71	5411,76
	25.08.2021	1105,26	1684,21	3684,21	210,53	157,89	684,21	473,68	4947,37	0,00	526,32	4736,84	1210,53	6473,68
	8.09.2021	2687,50	1812,50	4562,50	312,50	250,00	1750,00	500,00	6250,00	0,00	125,00	7687,50	1250,00	9062,50
	22.09.2021	1736,84	1736,84	3000,00	263,16	210,53	1052,63	526,32	4210,53	210,53	421,05	5263,16	789,47	6473,68
	Ortalama	1195,59	1487,84	3377,03	167,15	142,29	781,86	459,49	4357,97	151,70	416,60	4619,74	1024,12	6060,47
STD Sapma	875,10	328,06	735,95	119,99	94,74	549,67	73,76	1093,29	163,66	162,35	1767,23	232,15	1747,73	
S2	14.07.2021	1538,46	2538,46	10884,62	230,77	307,69	538,46	346,15	13461,54	76,92	1384,62	10807,69	2769,23	14961,54
	28.07.2021	1222,22	1814,81	19148,15	148,15	333,33	370,37	481,48	20555,56	296,30	1296,30	17185,19	3703,70	22185,19
	11.08.2021	2366,67	4166,67	17300,00	166,67	266,67	700,00	400,00	21733,33	566,67	2133,33	18300,00	3400,00	23833,33
	25.08.2021	1510,20	2061,22	8836,73	81,63	653,06	387,76	265,31	10775,51	244,90	1142,86	9040,82	2224,49	12408,16
	8.09.2021	2080,00	2120,00	16640,00	240,00	480,00	760,00	600,00	18240,00	520,00	1760,00	15480,00	3600,00	20840,00
	22.09.2021	1740,74	2074,07	14148,15	222,22	666,67	592,59	481,48	15592,59	407,41	1518,52	12962,96	3481,48	17962,96
	Ortalama	1743,05	2462,54	14492,94	181,57	451,24	558,20	429,07	16726,42	352,03	1539,27	13962,78	3196,48	18698,53
STD Sapma	417,08	867,02	3982,26	61,34	176,94	159,21	117,69	4228,02	183,09	358,37	3651,77	577,94	4408,71	
S3	14.07.2021	578,43	1088,24	5166,67	147,06	225,49	284,31	88,24	5980,39	107,84	686,27	3892,16	2254,90	6833,33
	28.07.2021	750,00	1137,50	10887,50	75,00	600,00	387,50	162,50	11387,50	162,50	1575,00	7725,00	3475,00	12775,00
	11.08.2021	740,74	1585,19	11377,78	177,78	385,19	444,44	222,22	12222,22	251,85	1792,59	8207,41	3703,70	13703,70
	25.08.2021	776,98	1582,73	9410,07	100,72	647,48	532,37	158,27	10158,27	172,66	1625,90	6561,15	3582,73	11769,78
	8.09.2021	475,81	991,94	5354,84	80,65	387,10	282,26	161,29	5766,13	145,16	1000,00	3685,48	2137,10	6822,58
	22.09.2021	880,60	1776,12	9358,21	119,40	597,01	537,31	253,73	10298,51	208,96	1582,09	6716,42	3716,42	12014,93
	Ortalama	700,43	1360,28	8592,51	116,77	473,71	411,37	174,38	9302,17	174,83	1376,98	6131,27	3144,98	10653,22
STD Sapma	146,79	326,28	2701,79	39,88	166,31	114,00	57,58	2761,84	50,24	432,47	1916,93	741,26	3038,87	
S4	14.07.2021	1552,46	1927,19	12740,90	267,67	107,07	803,00	214,13	14561,03	267,67	1445,40	10010,71	4764,45	16220,56
	28.07.2021	995,52	2638,13	18168,24	547,54	945,74	447,98	597,31	18815,33	447,98	1841,71	11498,26	8461,92	21801,89
	11.08.2021	2615,19	2739,73	23723,54	311,33	934,00	1556,66	996,26	24533,00	747,20	4420,92	17310,09	7347,45	29078,46
	25.08.2021	1512,93	1952,17	17032,70	195,22	976,09	780,87	780,87	17618,35	146,41	2342,61	12689,12	5466,08	20497,80
	8.09.2021	2067,34	2480,80	20437,09	295,33	1358,54	1240,40	826,93	20850,56	413,47	3071,47	14294,15	7619,61	24985,23
	22.09.2021	1865,67	2345,42	16098,08	213,22	959,49	959,49	586,35	17270,79	319,83	2132,20	12473,35	5703,62	20309,17
	Ortalama	1768,19	2347,24	18033,43	305,05	880,15	964,73	666,98	18941,51	390,43	2542,38	13045,94	6560,52	22148,85
STD Sapma	552,29	343,23	3766,46	127,14	412,12	388,17	269,60	3425,08	205,29	1068,77	2522,07	1450,12	4414,52	