

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

**YAPAY SULAKALANLARDA MİKROPLASTİK GİDERİMİNİN
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NERİMAN BAYLAN

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

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



**YAPAY SULAKALANLARDA MİKROPLASTİK GİDERİMİNİN
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NERİMAN BAYLAN

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi tarafından 2021FEBE005 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.

NERİMAN BAYLAN

ÖZET

**YAPAY SULAKALANLARDA MİKROPLASTİK GİDERİMİNİN
BELİRLENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
NERİMAN BAYLAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. GÜLBİN ERDEN)**

DENİZLİ, TEMMUZ - 2022

Sentetik plastiğin üretilmesi ile artan plastik kullanımı, yüksek miktarda plastik atık oluşumu ile sonuçlanmıştır. Plastik atıkların büyük bir çoğunluğu uygun bir şekilde bertaraf edilmeyerek sucul, karasal ve atmosferik ortamlara salınmakta ve bu ortamlarda birikmektedir. Plastikler, zamanla çevresel faktörlerin etkisi ile daha küçük parçalara ayrılmakta ve boyutu 5 mm'den küçük olan plastik parçacıklar mikroplastik şeklinde tanımlanmaktadır. 1972 yılında okyanus yüzeyinde tespit edilen ve henüz mikroplastik olarak tanımlanmamış olan plastik parçacıkların keşfedilmesi ile birlikte sucul ekosistemlerde plastiklerin varlığından söz edilmeye başlanmıştır. Evsel kökenli atıksuların arıtılması ve alıcı ortamlara deşarj edilmesi sonucunda sucul ekosistemlere önemli miktarda mikroplastik salınımı gerçekleşmektedir. Yapay sulakalan sistemleri, evsel atıksuların kırsal bölgelerde arıtılması amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. Yürütülen tez çalışması kapsamında, yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalan (Y-YAS) sisteminin yaz ve kış mevsimlerinde sahip olduğu mikroplastik giderim veriminin belirlenmesi, sucul ortamlara salınan mikroplastik konsantrasyonunun ve morfolojik özelliklerinin tespit edilmesi ve *Phragmites australis* bitkisinin bünyesine mikroplastik alma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, yüzeysel akış aracılığıyla taşınan ve hava ortamında askıda bulunan mikroplastiklerin artan yağış miktarı sonucunda kış mevsiminde daha fazla deşarj edildiği ve Y-YAS sisteminde daha fazla mikroplastik konsantrasyonu tespit edildiği belirlenmiştir. Ortalama olarak %92,35 oranında mikroplastik giderimine rağmen yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik salınımı gerçekleştiği ve yapay sulakalan sistemlerinin önemli bir mikroplastik kaynağı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. *Phragmites australis* bitkisinde yapılan çalışmalarda ise bitki bünyesine mikroplastik alınımının gerçekleştiği belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Yapay sulakalan, mikroplastik, atıksu

ABSTRACT

DETERMINATION OF MICROPLASTIC REMOVAL IN CONSTRUCTED WETLANDS

MSC THESIS

NERİMAN BAYLAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. GÜLBİN ERDEN)

DENİZLİ, JULY 2022

The increased use of plastic with the production of synthetic plastic has resulted in a high amount of plastic waste generation. Most plastic wastes are not disposed of properly and are released into aquatic, terrestrial and atmospheric environments and accumulate in these environments. Plastics break down into smaller pieces over time due to environmental factors, and plastic particles smaller than 5 mm are defined as microplastics. With the discovery of plastic particles, which were detected on the ocean surface and not yet defined as microplastics, in 1972, the presence of plastics in aquatic ecosystems began to be mentioned. As a result of the treatment of domestic wastewater and its discharge to receiving environments, significant amounts of microplastics are released into aquatic ecosystems. Constructed wetland systems are frequently used to treat domestic wastewater in rural areas. Within the scope of the thesis study carried out, a series of series was conducted to determine the microplastic removal efficiency of the horizontal subsurface flow constructed wetland (HF-CW) system in the summer and winter seasons, to determine the microplastic concentration and morphological properties released into aquatic environments, and to determine the microplastic uptake potential of the *Phragmites australis* plant. The study has been carried out. As a result of the studies, it has been determined that the microplastics carried by the surface flow and suspended in the air environment are discharged more in the winter season because of the increased rainfall, and higher microplastic concentration is detected in the HF-CW system. It has been concluded that despite the 92.35% removal of microplastics on average, high concentrations of microplastics are released, and constructed wetland systems are an essential source of microplastics. The studies carried out on the *Phragmites australis* plant determined that microplastic uptake occurred in the plant body.

KEYWORDS: Constructed wetland, microplastic, wastewater

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	11
2. MİKROPLASTİKLER.....	13
2.1 Mikroplastiklerin Tanımı, Kaynakları ve Sınıflandırılması	13
2.2 Alıcı Ortamlarda Mikroplastikler	15
2.2.1 Sucul Ekosistemde Mikroplastikler ve Etkileri	15
2.2.2 Karasal Ekosistemde Mikroplastikler ve Etkileri	16
2.2.3 Havada Bulunan Mikroplastikler ve Etkileri	18
2.3 Mikroplastikler ve İnsan Sağlığı	19
2.4 Mikroplastiklerin Örneklenmesi.....	20
2.5 Mikroplastiklerin İzolasyonu	21
2.6 Mikroplastiklerin Geri Kazanımı	23
2.7 Mikroplastiklerin Analizi	24
2.7.1 Görsel Analiz Yöntemleri	24
2.7.2 Kimyasal Analiz Yöntemleri	25
3. YAPAY SULAKALANLARDA MİKROPLASTİK VARLIĞI	26
3.1 Yapay Sulakalanlar.....	26
3.2 Yapay Sulakalanların Sınıflandırılması.....	26
3.2.1 Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalanlar (SYS).....	27
3.2.1.1 Köklü Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri.....	28
3.2.1.2 Yüzücü Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri.....	28
3.2.1.3 Batık Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri.....	29
3.2.2 Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulakalanlar (YAS).....	29
3.2.2.1 Yatay Yüzeyaltı Akışlı Sulakalan Sistemleri (Y-YAS).....	30
3.2.2.2 Düşey Yüzeyaltı Akışlı Sulakalan Sistemleri (D-YAS)	30
3.3 Yapay Sulakalanların Avantajları ve Dezavantajları	31
3.4 Literatür Özeti	32
3.5 Tezin Amacı	40
4. YÖNTEM.....	41
4.1 Çalışma Alanı	41
4.2 Örnekleme Yöntemi	44
4.3 İzolasyon Metodunun Belirlenmesi.....	49
4.3.1 Elek Sayısı ve Boyutu.....	49
4.3.2 Reaksiyon Sıcaklığı	49
4.3.3 Oksidan Madde	50
4.4 Numuneler için Optimum Oksidasyon Koşullarının Belirlenmesi	50

4.4.1	Giriş Atıksu Numunesi	50
4.4.2	Sediman Numunesi	52
4.4.3	Aritılmış Su Numunesi	53
4.5	Geri Kazanım Testi	53
4.6	Mikroplastik Analizi.....	55
4.7	Kontaminasyon Kontrolü	56
4.8	Yapay Sulakalan Bitkisi <i>Phragmites Australis</i> 'in Ekstraksiyonu	56
4.8.1	Ön-Hazırlık	57
4.8.2	Ekstraksiyon İşlemi.....	58
5.	BULGULAR	60
5.1	Yaz Dönemi Verileri	60
5.1.1	Mikroplastik Boyutları.....	60
5.1.2	Mikroplastik Renkleri	62
5.1.3	Mikroplastik Şekilleri	65
5.1.4	Mikroplastik Giderim Verimleri	68
5.2	Kış Dönemi Verileri	70
5.2.1	Mikroplastik Boyutları.....	70
5.2.2	Mikroplastik Renkleri	73
5.2.3	Mikroplastik Şekilleri	76
5.2.4	Mikroplastik Giderim Verimleri	79
5.3	<i>Phragmites Australis</i> Bitkisi Mikroplastik İçeriği	80
5.3.1	<i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastiklerin Renk Dağılımı.....	80
5.3.1.1	YSA Giriş Bölgesinden Alınan <i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Mikroplastik Renk Dağılımı.....	80
5.3.1.2	YSA Aritılmış Su Bölgesinden Alınan <i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Mikroplastik Renk Dağılımı.....	82
5.3.2	<i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastiklerin Şekil Dağılımı	85
5.3.2.1	YSA Giriş Bölgesinden Alınan <i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Mikroplastik Şekil Dağılımı.....	85
5.3.2.2	YSA Aritılmış Su Bölgesinden Alınan <i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Mikroplastik Şekil Dağılımı.....	87
5.3.3	<i>Phragmites Australis</i> Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastik Konsantrasyonları	89
6.	SONUÇLAR.....	91
6.1	Y-YAS Sisteminde Mikroplastik Varlığının ve Gideriminin Değerlendirilmesi	91
6.2	<i>Phragmites Australis</i> Numunelerinin Değerlendirilmesi	97
7.	ÖNERİLER.....	100
8.	KAYNAKLAR.....	101
9.	ÖZGEÇMİŞ	121

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Farklı yapay sulakalan sistemlerinin tipik enkesitleri (a: Y-YAS, b: D-YAS, c: SYS) (Gorgoglione ve Torretta, 2018).....	27
Şekil 4.1: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'nin bulunduğu bölgeye ait bir görüntü	42
Şekil 4.2: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi girişi	42
Şekil 4.3: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'ne ait genel bir görüntü.....	43
Şekil 4.4: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi giriş yapısı ve giriş atıksuyu numunesi toplama istasyonu	45
Şekil 4.5: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi sediman numunesi toplama istasyonu.....	45
Şekil 4.6: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış atıksu numunesi toplama istasyonu.....	46
Şekil 4.7: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış su numunesine ait deşarj noktası	46
Şekil 4.8: 1957–2021 yılları arasında Denizli ilinde ölçülen yağış verileri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).....	48
Şekil 4.9: Deney prosedürü	55
Şekil 4.10: Ekstraksiyon işlemi öncesi küçük parçalara ayrılan bitki numunesi ..	58
Şekil 4.11: Ekstraksiyon prosedürü akış şeması	59
Şekil 5.1: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	61
Şekil 5.2: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	61
Şekil 5.3: Yaz döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	62
Şekil 5.4: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	63
Şekil 5.5: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	64
Şekil 5.6: Yaz döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	64
Şekil 5.7: Yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	64
Şekil 5.8: Numunelerde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastikler (a:lif, b:film, c: parça)	65
Şekil 5.9: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	67
Şekil 5.10: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	67
Şekil 5.11: Yaz döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı.....	67
Şekil 5.12: Yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin genel dağılımı	68
Şekil 5.13: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	71

Şekil 5.14: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	72
Şekil 5.15: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	72
Şekil 5.16: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	73
Şekil 5.17: Farklı renklerde tespit edilen mikroplastikler	74
Şekil 5.18: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	75
Şekil 5.19: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	75
Şekil 5.20: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	76
Şekil 5.21: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	76
Şekil 5.22: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	78
Şekil 5.23: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı	78
Şekil 5.24: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı.....	79
Şekil 5.25: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin genel dağılımı	79
Şekil 5.26: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	81
Şekil 5.27: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	81
Şekil 5.28: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	82
Şekil 5.29: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	82
Şekil 5.30: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	83
Şekil 5.31: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	83
Şekil 5.32: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	84
Şekil 5.33: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı	84
Şekil 5.34: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı	85
Şekil 5.35: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı.....	86
Şekil 5.36: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı.....	86
Şekil 5.37: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı	87
Şekil 5.38: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı.....	88

Şekil 5.39: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı	88
Şekil 5.40: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı	89
Şekil 5.41: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı	89
Şekil 5.42: <i>Phragmites Australis</i> bünyesinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu	90
Şekil 6.1: Yaz ve kış dönemlerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarının toplam mikroplastik konsantrasyonundaki oranı	92
Şekil 6.2: PET polimerine ait FT-IR spektrumu (%83,57)	94
Şekil 6.3: PEVA polimerine ait FT-IR spektrumu (%86,87)	95
Şekil 6.4: FT-IR analizi yapılan mikroplastikler (a: PES, b: PET, c: PEVA)	95
Şekil 6.5: <i>Phragmites australis</i> bitkisinde tespit edilen mikroplastik örnekleri	97

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Mikroplastiklerin morfoloji özellikleri (Ebere ve diğ., 2019; Willis ve diğ., 2017)	14
Tablo 3.1: Literatür çalışmaları kapsamında incelenen yapay sulakalan sistemleri ve tespit edilen mikroplastiklerin özellikleri	37
Tablo 4.1: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'ne ait tasarım parametreleri (Göçmez ve diğ., 2018).....	41
Tablo 4.2: Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerinin yaz dönemi karakterizasyonu.....	43
Tablo 4.3: Giriş, arıtılmış su ve sediman numunesinin yaz dönemine ait atıksu karakterizasyonu.....	44
Tablo 4.4: Giriş numunesinin farklı koşullarda elde edilen AKM giderim verimleri.....	51
Tablo 4.5: Sediman numunesinin farklı koşullarda elde edilen AKM giderim verimleri.....	53
Tablo 4.6: Mikroplastik geri kazanım oranları	54
Tablo 5.1: Yaz döneminde farklı boyut aralıklarında tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu	60
Tablo 5.2: Yaz döneminde farklı renklerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu.....	63
Tablo 5.3: Yaz döneminde farklı şekillerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu.....	66
Tablo 5.4: Yaz dönemi mikroplastik konsantrasyonları ve giderim verimleri.....	68
Tablo 5.5: Yaz döneminde haftalık, aylık ve dönemlik olarak elde edilen mikroplastik giderim verimleri.....	69
Tablo 5.6: Kış döneminde farklı boyut aralıklarında tespit edilen mikroplastikler konsantrasyonu.....	71
Tablo 5.7: Kış döneminde farklı renklerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu.....	74
Tablo 5.8: Kış döneminde farklı şekillerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu.....	77
Tablo 5.9: Kış dönemi mikroplastik konsantrasyonları ve giderim verimleri	80
Tablo 5.10: Kış döneminde elde edilen mikroplastik giderim verimleri.....	80
Tablo 6.1: <i>Phragmites australis</i> bitkisinin farklı bölgelerden alınan örneklerinin mikroplastik konsantrasyonlarına ait istatistiksel verileri.....	98

SEMBOL LİSTESİ

AKM	:	Askıda Katı Madde
ATR-FT-IR	:	Zayıflatılmış Toplam Yansıma Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
BOI	:	Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
D-YAS	:	Düşey Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulakalan
FT-IR	:	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
H₂O₂	:	Hidrojen Peroksit
HDPE	:	Yüksek Yoğunluk Polietilen
HRT	:	Hidrolik Alıkonma Süresi
KOI	:	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
LDPE	:	Düşük Yoğunluklu Polietilen
MP	:	Mikroplastik
NaCl	:	Sodyum Klorür
NaI	:	Sodyum İyodür
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
OM	:	Organik Madde
PA	:	Poliamid
PC	:	Polikarbonat
PE	:	Polietilen
PES	:	Polyester
PET	:	Polietilen Teraftalat
PEVA	:	Polietilen Vinil Asetat
PHMB	:	Poliheksamit
PP	:	Polipropilen
PS	:	Polistiren
PVC	:	Polivinil Klorür
Pyr-GC/MS	:	Kütle Spektrometresi İle Birleştirilmiş Piroliz Gazı Kromatografisi
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
SYS	:	Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan
TKM	:	Toplam Katı Madde
UV	:	Ultraviyole
YAS	:	Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulakalan
YSA	:	Yapay Sulakalan
Y-YAS	:	Yatay Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulakalan
ZnCl₂	:	Çinko Klorür

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli düşünceleri ve tecrübeleri ile bana ışık tutan, öğrencisi olmaktan mutluluk duyduğum değerli danışman hocam Prof. Dr. Gülbin ERDEN'e teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarında bana yol gösteren, sorularımı cevaplamaktan hiçbir zaman çekinmeyen değerli hocam Arş. Gör. Dr. Pelin KOYUNCUOĞLU'na teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım süresince numune temin etmemi sağlayan DESKİ (Denizli Büyükşehir Belediyesi Su Ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü) ve Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi personellerine teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımı eğlenceli hale getiren sevgili arkadaşım Nuray ÇÖVÜT'e, lisansüstü eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen sevgili arkadaşım Kübra DONTLU'ya ve tez sürecimde motivasyon kaynağım haline gelen sevgili arkadaşlarım İkbal ÖREN, Dilara KAPLAN ve Tugay GEÇGEL'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, varlığını hep yanımda hissettiğim ve bir parçası olmaktan mutluluk duyduğum sevgili ailem, Ali Haldun BAYLAN, Münevver BAYLAN ve Merih ZEYTİN'e çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Üretim amacına uygun şekilde kalıplanabilen, uzun polimer zincirlerinden oluşan yapılar plastik olarak adlandırılmaktadır (GESAMP, 2016). 1907 yılında sentetik reçine kullanılarak üretilen ilk modern plastik olan bakalit ile birlikte; hafif, korozyona dayanıklı olan plastiklerin seri üretim sürecine geçilmiştir (Baekeland, 1909; PlasticsEurope, 2010). Artan plastik talebine bağlı olarak geri dönüşüm oranlarında artış gerçekleşmemekle birlikte sadece %6-%26 oranında bir geri dönüşüm oranı elde edilmiştir (Alimi ve diğ., 2018). Düşük geri dönüşüm oranları, uygunsuz plastik atık bertarafı ve artan plastik kullanımı ile birlikte plastik atıklar önemli bir kirletici haline gelmiştir (Ribeiro ve diğ., 2019).

Alıcı ortamlara karışan plastik atıklar, zamanla çeşitli çevresel faktörlerin etkisiyle parçalanarak mikroplastik olarak adlandırılan boyutu 5 mm'den küçük olan parçacıkları meydana getirmektedir (Enfrin ve diğ., 2019; Thompson ve diğ., 2004). Mikroplastik teriminin ilk kez 2004 yılında kullanılması ile mikroplastik kirliliği daha görünür bir kontaminasyon kaynağı haline gelmeye başlamıştır (Thompson ve diğ., 2004). Mikroplastikler, buldukları ortamda var olan diğer kirleticileri adsorbe edebilmekte ve bu kirleticilerin sahip olduğu konsantrasyonun 100 katına kadar birikim gerçekleştirebilmektedirler (Naqash ve diğ., 2020). Dolayısıyla, çeşitli taşınım mekanizmaları aracılığıyla sucul, karasal ve atmosferik ortamlara taşınan mikroplastikler, bu ortamlarda önemli bir kontaminasyon kaynağı haline gelmekte ve canlılar üzerinde olumsuz etkilerin oluşmasına sebep olabilmektedirler (Desforges ve diğ., 2014).

Mikroplastikler tarafından kontaminasyona uğrayan ortamlardan biri olan sucul ekosistemlerde, plastik parçacıkların varlığından ilk kez 1972 yılında söz edilmiştir (Carpenter ve Smith, 1972). Sucul ekosistemde yıllardır birikimi gerçekleşen mikroplastiklerin önemli bir kaynağı da atıksu arıtma tesisleridir (Sun ve diğ., 2019). Yüksek giderim verimine sahip olmalarına rağmen, atıksu arıtma tesislerinden sucul ortamlara yüksek miktarda mikroplastik salınımı gerçekleşmektedir. Avustralya'da yapılan bir çalışmada, bir atıksu arıtma tesisinden

salınan mikroplastik miktarının $4,6 \times 10^8$ adet/gün olduğu rapor edilmiştir (Ziajahromi ve diğ., 2017).

Atıksuların arıtılması amacıyla başvurulmuş sistemlerden biri de yapay sulakalan sistemleridir (Sethulekshmi ve Chakraborty, 2021). Mikroplastik kirliliğinin tespiti üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapay sulakalanlardan sucul ortama salınan mikroplastik miktarının ve yapay sulakalanların mikroplastik giderim veriminin belirlendiği çok az çalışma olduğu belirlenmiştir.

Yapay sulakalanlarda kirlenici gideriminde makrofitler önemli bir rol oynamaktadır (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001). Yapay sulakalan sistemlerinde sıklıkla kullanılan makrofitlerden biri de *Phragmites australis*'tir (Vymazal, 2011). Foladori ve diğ. tarafından 2013 yılında yapılan çalışmada, *Phragmites australis* aracılığıyla sucul ortamlarda mikroplastik gideriminin gerçekleştiği rapor edilmiştir (Foladori ve diğ., 2013). Yao ve diğ. tarafından 2019 yılında yapılan bir başka çalışmada ise, *Phragmites australis* bitkisinin yapay sulakalan bünyesinde bulunan mikroplastikleri kök ve yaprak yüzeyinde tutabildiği ifade edilmiştir (Yao ve diğ., 2019). Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bitki bünyesinin mikroplastik alma potansiyelinin belirlendiği az sayıda çalışmaya rastlanmış ve *Phragmites australis* bitkisinin bünyesine mikroplastik alma potansiyelini belirleyen bir çalışma tespit edilmemiştir.

Tez çalışması kapsamında, Denizli ilinde kırsal bir bölgede yer alan yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalan (Y-YAS) sisteminin mikroplastik giderim veriminin yaz ve kış mevsimlerindeki değişiminin tespit edilmesi; giriş, sediman ve arıtılmış su numunelerinde bulunan mikroplastiklerin morfolojik özelliklerinin ve konsantrasyonlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapay sulakalanda yapılan bu çalışma ile bu sistemlerin, sucul ekosistemlere mikroplastik salınımindaki rolünün tespit edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma alanı olan yapay sulakalan sisteminde bulunan *Phragmites australis* bitkisinin bünyesine mikroplastik alma potansiyelinin belirlenmesi ise bir diğer amaçtır.

2. MİKROPLASTİKLER

2.1 Mikroplastiklerin Tanımı, Kaynakları ve Sınıflandırılması

2004 yılında mikroplastik olarak tanımlanan 5 mm'den küçük boyutta bulunan plastik parçacıklar, ilk olarak 1972 yılında Carpenter & Smith tarafından Sargasso Denizi'nde gözlemlenmiştir (UNEP, 2022; Carpenter ve Smith, 1972; Thompson ve diğ., 2004). Mikroplastikler, kaynaklarına göre birincil ve ikincil mikroplastikler olarak sınıflandırılmaktadır. Birincil mikroplastikler; kişisel bakım ve kozmetik ürünlerinde, endüstriyel faaliyetlerde ve temizlik maddelerinde kullanılmak üzere direkt olarak ekstrüzyon ve polimerizasyon gibi çeşitli teknikler aracılığıyla üretilmektedir (Khalid ve diğ., 2021; Okoffo ve diğ., 2019). Araç lastiklerinin aşınmasıyla oluşan parçacıklar ve tekstil kökenli lifler birincil mikroplastikler olarak tanımlanmakta ve dış macunları, yüz yıkama jelleri ve duş jellerinde de birincil mikroplastikler bulunabilmektedir (Khalid ve diğ., 2021; Okoffo ve diğ., 2019; Estahbanati ve Fahrenfeld, 2016; Silva ve diğ., 2021; Sun ve diğ., 2019; Ó Briain ve diğ., 2020; Michielssen ve diğ., 2016). Ayrıca, birincil mikroplastik sınıfında bulunan plastik parçacıkların ortalama boyutlarının 150 ve 330 µm aralığında değişkenlik gösterdiği bilinmektedir (Talvitie ve diğ., 2017; Herbort ve diğ., 2018). Bir diğer mikroplastik sınıfı olan ikincil mikroplastikler, makro boyutta bulunan plastiklerin; rüzgar, UV radyasyonu vb. çeşitli dış ortam şartlarının etkisiyle ve fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkileşimler aracılığıyla daha küçük boyutlu plastik parçacıklara dönüşmesi sonucunda meydana gelmektedir (Okoffo ve diğ., 2019; Hu ve diğ., 2019; Horton ve diğ., 2017; Xu ve diğ., 2020). Mikroplastikler şekillerine göre; film, lif, parça ve mikroboncuk olmak üzere dört farklı kategoride incelenmektedir (Ebere ve diğ., 2019; Willis ve diğ., 2017). Mikroplastik şekillerine ait fiziksel özellikler Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Mikroplastiklerin morfolojik özellikleri (Ebere ve diğ., 2019; Willis ve diğ., 2017)

Mikroplastik Şekli	Fiziksel Özellikler	Yapı / Doku
Film	Esnek, ince, düz	Yumuşak
Lif	Çok ince, uzun veya kısa	Yumuşak
Parça	Kalın, keskin ve eğri kenar yapısı	Sert
Mikroboncuk	Küresel, pürüzsüz	Sert

Mikroplastikler, alıcı ortamlarda farklı polimer türlerinde bulunabilmektedir. Tespit edilen polimer türleri ile mikroplastiklerin kaynakları hakkında bilgi edinmek mümkündür. Örneğin, PS polimeri tek kullanımlık ürünlerden; HDPE polimeri ise deterjan şişelerinden kaynaklanabilmektedir (K ve diğ., 2021; Lares ve diğ., 2018).

Mikroplastikler, birçok farklı renk kategorisinde tespit edilmektedir. Renkler aracılığıyla, mikroplastiklerin bozunma süreleri ve kökenleri hakkında çeşitli verilere ulaşmak mümkün hale gelmektedir (Andrady, 2017). Örneğin, şeffaf ve net bir görüntüye sahip olan mikroplastiklerin ambalaj ürünlerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Polimer türü açısından değerlendirildiğinde beyaz ve mat görüntüdeki mikroplastiklerin ise PE polimerinden oluştuğu tahmin edilmektedir (Santos ve diğ., 2022). Ayrıca, atıksu arıtma tesisi numunelerinde tespit edilen mikroplastiklerin sahip olduğu renklerin; kimyasal boyalar, yüzey aktif maddeler ve deterjanlar gibi çeşitli dış etkenlerden kaynaklanabileceği öngörülmektedir (Prinz ve Korez, 2020).

Mikroplastiklerin standartlaşmış bir boyut kategorisi bulunmamakta ve bu değerler çalışmanın amacına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu sebeple, yapılan çalışmalarda birbirinden farklı boyut aralıkları ortaya çıkmaktadır (Egessa ve diğ., 2020; Everaert ve diğ., 2018; Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012). Örneğin, bir çalışmada küçük boyutlu mikroplastikler 0,5–1 mm boyut aralığında bulunurken; bir diğer çalışmada küçük boyutlu mikroplastikler <1 mm şeklinde tanımlanmıştır (Everaert ve diğ., 2018; Najji ve diğ., 2019).

2.2 Alıcı Ortamlarda Mikroplastikler

2.2.1 Sucul Ekosistemde Mikroplastikler ve Etkileri

1972 yılında açık denizlerde tespiti gerçekleştirilen ilk plastik parçacıklar ile birlikte sucul ekosistemlerde mikroplastiklerin varlığından söz edilmeye başlanmıştır (Carpenter ve Smith, 1972). Mikroplastikler sucul ekosisteme çeşitli yollar ile giriş yapmaktadır. Bunlar:

- Yetersiz atık yönetimi,
- Yüzeysel akış,
- Balıkçılık faaliyetleri,
- Turizm faaliyetleri,
- Atıksu arıtma tesislerinin sucul ekosisteme deşarjı,
- Nakliye işlemleri,
- Arıtma çamurunda bulunan mikroplastiklerin yağış vb. faktörler ile taşınması şeklinde ifade edilmektedir (Hann ve diğ., 2018; Hasan Anik ve diğ., 2021; Waldschläger ve diğ., 2020; Hammer ve diğ., 2012).

Karasal ortama deşarjı gerçekleştirilen mikroplastikler yüzeysel akış, yağmur ve rüzgar gibi çevresel faktörlerin etkisiyle sucul ekosisteme taşınmaktadır. Örneğin, atıksu arıtma tesisinde meydana gelen prosesler sonucunda oluşan arıtma çamurunun, karasal ekosistemde gübre olarak kullanımı ile mikroplastikler ilk olarak karasal ekosisteme, ardından da yüzeysel akış aracılığıyla sucul ekosisteme taşınmaktadır (Hammer ve diğ., 2012). Atıksu arıtma tesisleri, %64 ve %99 aralığında değişen bir mikroplastik giderme verimine sahip olmasına rağmen, yüksek mikroplastik konsantrasyonları elde edilmesi nedeniyle günde 10^9 adete ulaşan mikroplastik salınımının gerçekleşebildiği bildirilmiştir (Elkhatib ve Oyanedel-Craver, 2020; Hidayaturrahman ve Lee, 2019; Sol ve diğ., 2020).

Sucul ekosistemin bir parçası olan tatlı su sistemleri, mikroplastik birikimi için uygun bir ortam sağlamaktadır. Bunun sebebi; açık denizlere kıyasla daha kapalı bir yapıda olması, su akışının daha yavaş bir şekilde gerçekleşmesi ve genel olarak insan yaşamına ve faaliyetlerine daha yakın olmasıdır (Wang ve diğ., 2022). Deniz ortamına

mikroplastik akışının gerçekleşmesinde ise nehirler önemli bir rol oynamaktadır. Bu akışın, %80'lik bir bölümü nehirler tarafından sağlanmaktadır (Alimi ve diğ., 2018). Sucul ekosistemde mikroplastikler, uzun mesafeler boyunca taşınabilmektedir. Bu taşınımında; rüzgar, türbülans ve çeşitli hidrolojik faktörlerin etkisi bulunmaktadır (Van Sebille ve diğ., 2012; He ve diğ., 2021).

Mikroplastikler, sucul ekosistemde yaşayan canlılar üzerinde çeşitli etkilere sahiptirler. Sucul ekosistemde yaşayan canlılar tarafından yutulan mikroplastikler, canlıların sindirim sistemlerinden uzun süre boyunca atılmayarak diğer organ ve dokulara ulaşabilmekte ve toksik etkilere sebep olabilmektedir (Huang ve diğ., 2021; Zhang ve diğ., 2020). Sucul ekosistemin bir parçası olan 267 canlı türünün mikroplastiklerden olumsuz şekilde etkilendiği varsayılmaktadır (Desforges ve diğ., 2014). 2016 yılında Ryan ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, deniz kaplumbağalarının mikroplastikleri yutarak bünyelerine alması ile mikroplastiklerin bu canlıların ölümüne neden olan etkilere yol açabildiği sonucu rapor edilmiştir (Ryan ve diğ., 2016). Yapılan bir başka çalışmada ise su kuşlarına ait dışkı örneklerinde mikroplastik bulunduğu bilgisine ulaşılmıştır (Gil-Delgado ve diğ., 2017). Bu durum, mikroplastiklerin sucul ekosistemde besin zinciri aracılığıyla taşınımının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir (Markic ve diğ., 2018).

2.2.2 Karasal Ekosistemde Mikroplastikler ve Etkileri

İnsan kaynaklı birçok faaliyet, karasal ekosistemde yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik tespit edilmesine sebep olmaktadır. Bu faaliyetlerin bir sonucu olarak karasal ortamda yıllık bazda tespit edilen mikroplastik miktarının denizlerde tespit edilen miktardan 4–23 kat aralığında değişen bir değerde olduğu rapor edilmiştir (de Souza Machado ve diğ., 2018).

Karasal ortamda tespit edilen potansiyel mikroplastik kaynakları şu şekilde sıralanmaktadır:

- Aşınan araç lastikleri,
- Uygun şekilde yapılmayan atık yönetimi,
- Tarımsal faaliyetlerde kullanılan plastik materyaller,

- Arıtma çamurlarının gübre olarak değerlendirilmesi,
- Arıtılmış suların tarımsal sulamada kullanılması (Waldschläger ve diğ., 2020; Zhang ve Chen, 2020).

Mikroplastikler rüzgar, yağmur, yüzeysel akış gibi çeşitli faktörler aracılığıyla karasal ekosisteme taşınmaktadır (Waldschläger ve diğ., 2020). Bu mikroplastiklerin ana kaynaklarından bazıları; malçlama, sulama ve gübreleme faaliyetleridir. Tarımsal faaliyetlerde kullanılan ve plastik materyallerden oluşan malç filmleri, çevresel faktörlerin etkisiyle zaman içerisinde parçalanarak mikroplastik kaynaklarından biri haline gelmektedir (Huang ve diğ., 2020). Atıksu arıtma tesislerinde arıtılan suların, sulama ve gübreleme faaliyetlerinde kullanımı sonucunda da karasal ortama mikroplastik taşınımı gerçekleşmektedir (Okoffo ve diğ., 2020; Zhang ve diğ., 2020). Yapılan çalışmalarda, Avrupa’da her yıl 43.000–63.000 ton mikroplastığın tarım topraklarında biriktiği rapor edilmiştir (Nizzetto ve diğ., 2016).

Mikroplastiklerin karasal ortama taşınımında etkili olan kaynaklardan biri de hava ortamıdır. Örneğin, katı atık düzenli depolama tesislerinde bulunan lifler havada taşınarak atmosferik birikimi gerçekleştirmekte ve karasal ortama aktarımı meydana gelmektedir. Karasal ortama taşınan mikroplastikler, rüzgar ve yağış gibi çevresel faktörlerin etkisiyle daha uzak mesafelere ulaşabilmektedir (Waldschläger ve diğ., 2020; Dris ve diğ., 2016; Rillig, 2012).

Karasal ortama taşınan ve burada biriken mikroplastikler; toprak, bitki ve toprakta yaşayan canlı bünyesi üzerinde bazı etkilere sahiptir. Karasal ortamda artan mikroplastik konsantrasyonu, toprağın fizikokimyasal yapısını olumsuz şekilde etkilemektedir (Xi ve diğ., 2022). Bitki bünyesinde protein sentezi işleminin gerçekleşmesini engellemektedir. Bu durum, bitkilerin büyüme ve gelişme süreçleri üzerinde negatif bir etki yaratmaktadır (Khalid ve diğ., 2020). Bitkilerde artan mikroplastik konsantrasyonu ile birlikte gıda güvenliğinin önemli bir sorun haline geleceği tahmin edilmektedir (Sun ve diğ., 2020). Toprakta yaşayan organizmalardan biri olan solucanların mikroplastikleri yutarak bünyelerine alması ile birlikte mikroplastiklerin; canlı yaşamında önemli olan süreçler olan üreme, gelişme ve büyüme üzerinde inhibe edici etkilere yol açabildiği rapor edilmiştir (Zurier ve Goddard, 2020).

2.2.3 Havada Bulunan Mikroplastikler ve Etkileri

Hava ortamında bulunan mikroplastiklere, dış ortamda veya iç ortam olarak adlandırılan ev ortamında maruz kalınabilmektedir. Dış ortamda bulunan mikroplastikler; araç lastiklerinin aşınması, atıkların yakılması, yetersiz atık yönetimi vb. kaynaklara bağlı olarak meydana gelmektedir (UNEP, 2016; Catarino ve diğ., 2018). Dış ortamda önemli bir mikroplastik kaynağı olan araç lastiği aşınması ilk olarak 1974 yılında yapılan bir çalışmada bildirilmiştir (Cardina, 1974; Pierson ve Brachaczek, 1974). Yapılan diğer çalışmalarda, araç lastiklerinin aşınması sonucunda yüksek konsantrasyonlarda mikroplastığın hava ortamına salındığı rapor edilmiştir. Örneğin, Hollanda’da yapılan bir çalışmada lastik aşınması kaynaklı yıllık tahmini 17,000 ton mikroplastığın alıcı ortamlara salındığı ifade edilmiştir (Verschoor ve diğ., 2014). 2017 yılında yapılan bir diğer çalışmada, küresel anlamda kişi başına düşen yıllık lastik aşınması kaynaklı emisyonun ortalama 0,81 kg olduğundan bahsedilmiştir (Jan Kole ve diğ., 2017). Çin’de yapılan bir çalışmada ise bir kişinin yıllık 7665 adet dış ortam kökenli mikroplastik soluduğu belirlenmiştir (Liu ve diğ., 2019).

İç ortamda oluşan mikroplastikler ise genellikle sentetik kumaş kaynaklı giysilerin ve ev eşyalarının kullanımı sonucunda oluşmaktadır (Catarino ve diğ., 2018). Sentetik kökenli giysilerin; yıkanması, kurutulması ve giyilmesi süreçlerinde zarar görebildiği ve bunun sonucunda da mikroplastik salınımı gerçekleştiği bilinmektedir (Chen ve diğ., 2020). Buna ek olarak, sentetik materyalden yapılan halı ve perde gibi eşyaların günlük kullanımı da mikroplastik oluşumuna sebep olmaktadır (Zhang ve diğ., 2020). Dris ve diğerleri (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, elektrik süpürgesi kullanılarak yapılan örneklemede mg bazında 190–670 adet sentetik lif tespit edildiği bildirilmiştir (Dris ve diğ., 2017).

İç ortamda bulunan ve genellikle uzun yapıda olan liflerin, insan sağlığı açısından ciddi sorunlara yol açtığı bilinmektedir (Kacprzak ve Tijing, 2022). Amerika ve Avrupa’da insanların zamanlarını çoğunlukla iç ortamlarda geçirmeleri, daha çok iç ortam kaynaklı mikroplastiklere maruz kalmalarına sebep olmaktadır (Catarino ve diğ., 2018; ASHRAE, 2010). Bu durum da iç ortamda bulunan mikroplastiklerin varlığını önemli bir sağlık tehdidi haline getirmektedir.

Havada bulunan mikroplastikler 100 km ve daha fazla mesafelere taşınabilmektedir (Allen ve diğ., 2019). Bu taşınımında; rüzgar hızı, sıcaklık, yağış gibi çevresel etkenlerin yanı sıra mikroplastığın boyutu, şekli ve yoğunluğu gibi koşullar da etkili olmaktadır (Prata, 2018; Horton ve Dixon, 2018). Havada bulunan mikroplastikler, sucul ve karasal ekosistem için de bir tehdit oluşturmaktadır. Boucher ve Friot (2017) tarafından yapılan çalışmada, okyanusta tespit edilen mikroplastiklerin tahmini olarak %7'sinin hava kaynaklı mikroplastiklerden oluştuğu bildirilmiştir (Boucher ve Friot, 2017).

Hava ortamında bulunan mikroplastikler, karasal ve sucul ortamlarda olduğu gibi çeşitli sağlık sorunlarına yol açmaktadırlar. Özellikle, 11 µm'den daha küçük boyuttaki mikroplastiklerin önemli olduğu vurgulanmaktadır (Bergmann ve diğ., 2019). Boyutu 5 µm'den küçük olan mikroplastiklerin solunum yoluyla akciğere taşınarak akciğer enfeksiyonuna varabilen sağlık problemlerine sebep olduğu; 2,5 µm'den daha küçük boyutta olan mikroplastiklerin ise akciğerde kalıcı hasara yol açtığı ve kan dolaşımına karışarak kanser gibi ciddi sağlık sorunları meydana getirebildiği bildirilmiştir (Materials, 2022; Kevin Luo, 2018).

2.3 Mikroplastikler ve İnsan Sağlığı

Mikroplastiklerin ekosistemlerdeki varlığı ile birlikte, insan ve mikroplastik etkileşimi artmakta ve mikroplastikler çeşitli yollar vasıtasıyla insan bünyesine taşınmaktadır. Ekosistemlerin bir parçası olan canlıların besin olarak tüketilmesi de bu yollardan biridir (Hamidian ve diğ., 2021). Bünyesinde mikroplastik barındıran kümes hayvanlarının ya da sucul ekosistemde bulunan canlıların tüketilmesi ile insan bünyesine mikroplastik taşınımı gerçekleşmektedir (Abbasi ve diğ., 2018; Toussaint ve diğ., 2019). Yapılan çalışmalarda, midye ve balık gibi çeşitli sucul organizmalarda mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Yu ve diğ., 2020; Campanale ve diğ., 2020). Bunlara ilaveten, topraktaki mikroplastikler bitki bünyesine alınmakta ve bu topraklarda yetişen meyve ve sebzelerin tüketilmesiyle de insan bünyesine mikroplastik taşınımı meydana gelmektedir. Meyve ve sebze tüketimi sonucunda insan bünyesine günlük 80 g mikroplastik alındığı bildirilmiştir (Christian Eber ve diğ., 2019). Yapılan çalışmalarda; tuz, içme suyu, bal, bira, poşet çay, şeker, maden

suyu ve süt gibi birçok besinde mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Oßmann ve diğ., 2018; Liebezeit ve Liebezeit, 2014, 2013, 2015; Kutralam-Muniasamy ve diğ., 2020; Mason ve diğ., 2018). İçme suyu ile insan bünyesine alınan mikroplastikler, besin yoluyla alınan mikroplastiklerin %88'ini oluşturarak en büyük katkıya sahiptir. İçme suyu aracılığıyla yıllık 5800 adet mikroplastik insan bünyesine girmektedir (Kosuth ve diğ., 2018).

İnsan bünyesine taşınan mikroplastiklerin bir diğer kaynağı da atmosferde bulunan mikroplastiklerdir. Havada bulunan mikroplastiklerin solunması ya da deri ile teması aracılığıyla mikroplastikler insan bünyesine taşınabilmektedir (Hamidian ve diğ., 2021). Vianello ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, simülasyonda elde edilen verilere göre bir kişi günde 272 adet mikroplastığı solunum yolu ile bünyesine alabilmektedir (Vianello ve diğ., 2019). 2022 yılında Jenner ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ise 13 akciğer doku örneğinin 11'inde mikroplastik varlığından söz edilmiştir (Jenner ve diğ., 2022).

İnsan bünyesine alınan mikroplastikler, akciğer ve karaciğerde hasara yol açarak bu organların fizyolojisi üzerinde değişikliklere yol açmakta ve metabolizmayı olumsuz şekilde etkilemektedir (Karbalaee ve diğ., 2018; Oliveira ve diğ., 2013). Wright ve Kelly tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, boyutu 130 µm'den daha küçük olan mikroplastiklerin hücre dokusunda birikebildiği sonucuna ulaşılmıştır (Wright ve Kelly, 2017). 2021 yılında yapılan bir diğer çalışmada ise plasentada mikroplastik tespiti gerçekleştirilmiş ve mikroplastiklerin çeşitli taşınım mekanizmaları aracılığıyla dokulara ulaşabildiğinden bahsedilmiştir (Ragusa ve diğ., 2021). Mikroplastiklerin insan vücuduna verdiği zararlara ilaveten, mikroplastiklerin ortamda bulunan ağır metalleri, katkı maddelerini ve diğer zararlı maddeleri adsorbe edebilme yeteneğine bağlı olarak insan vücudu üzerindeki olumsuz etkileri artmaktadır (Rist ve diğ., 2018).

2.4 Mikroplastiklerin rneklenmesi

Mikroplastiklerin rneklenmesi aşaması, çevresel matrislerde bulunan mikroplastiklerin tespiti için gerekmektedir ve numune alma adımı, mikroplastiklerin örneklenmesi için gerekli olan ilk adım olarak tanımlanmaktadır (Dmichen ve diğ.,

2015). Atıksularda mikroplastik tespiti için numune alımı gerçekleştirilirken çeşitli yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu yöntemler; otomatik örnekleyici, plastik/çelik numune alma kabı, yüzey filtrasyonu ve pompa sistemiyle bütünleşik filtrasyon sistemleri ile gerçekleşmektedir (Carr ve diğ., 2016; Alexander S. Tagg ve diğ., 2015; Talvitie ve diğ., 2017; Ziajahromi ve diğ., 2017).

Çevresel matrislerde bulunan mikroplastiklerin konsantrasyon miktarının ve morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli örnekleme yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Örnekleme işlemleri için tercih edilen yöntemler, tespit edilecek olan mikroplastik konsantrasyonunun miktarı üzerinde etkili olmaktadır (Han ve diğ., 2019). Bu sebeple, seçilen yöntemlerin mikroplastik konsantrasyonu üzerindeki etkileri dikkate alarak örnekleme yöntemine karar vermek gerekmektedir.

Numune alma adımı gerçekleştirildikten sonra, mikroplastiklerin örneklenmesi amacıyla farklı yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu amaçla, toplanan numuneler direkt olarak kullanılabilen ya da bu numunelerin hacminin azaltılması ile örnekleme işlemi gerçekleştirilmektedir (Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012). Numune hacminin azaltılarak kullanılması durumunda sadece örnekleme işlemi için gerekli olan bölümlerin laboratuvar ortamına getirilmesi şeklinde meydana getirilmektedir (Cutroneo ve diğ., 2020).

2.5 Mikroplastiklerin İzolasyonu

Mikroplastiklerin karakterizasyonu hakkında bilgi edinebilmek için mikroplastikleri atıksu numunelerinden izole etmek gerekmektedir. Atıksu numunelerinde bulunan organik ve inorganik yapıdaki kirleticiler, mikroplastiklerin görüntülenmesini ve analizini zorlaştırmaktadır (Okoffo ve diğ., 2019; Prata ve diğ., 2019; Tagg ve diğ., 2016). Diğer yandan, atıksuda bulunan organik maddelerin ve çeşitli safsızlıkların mikroplastik olduğu varsayımı ile analiz işlemleri sırasında hatalı sonuçlar elde etmek mümkün hale gelmektedir (Zhao ve diğ., 2017). Bu kirleticilerin ortamdaki giderilmesi için çeşitli izolasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Literatürde, mikroplastikleri çeşitli ortamlardan izole etmeyi hedefleyen birçok çalışma bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan yöntemler; kimyasal oksidasyon yöntemi, yoğunluk farkına dayalı ayırma yöntemi ve filtrasyon yöntemidir.

Kimyasal oksidasyon yöntemi, çalışmalarda sıklıkla tercih edilen izolasyon yöntemlerinden biridir (Nuelle ve diğ., 2014; Tagg ve diğ., 2016; Liu ve diğ., 2022; Pignatello ve diğ., 2006). Kimyasal oksidasyon yönteminde; enzimler, asitler, alkaliler ve çeşitli oksitleyici maddeler aracılığıyla organik madde giderimi amaçlanmaktadır (Courtene-Jones ve diğ., 2017; Dehaut ve diğ., 2016; Erni-Cassola ve diğ., 2017; Karami ve diğ., 2017). Kimyasal oksidasyon yöntemleri, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Alkali oksidasyonda, bazı filtre kağıtlarının olumsuz şekilde etkilendiği; asidik oksidasyonun, polimerlerin morfolojileri üzerinde sıklıkla değişime yol açtığı; enzimatik oksidasyonun ise pahalı ve zaman alıcı olduğu daha önce yapılan çalışmalar tarafından ifade edilmiştir (Gao ve diğ., 2020; Mintenig ve diğ., 2017; Okoffo ve diğ., 2019; Prata ve diğ., 2019).

Yoğunluk farkına dayalı ayırma yönteminde, inorganik yapıdaki maddelerin giderilmesi amaçlanmaktadır (Stock ve diğ., 2019). Bu amaçla, çözeltinin yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip olan mikroplastikler yüzdürülmekte ve inorganik maddeler giderilmektedir (Campanale ve diğ., 2020). Bir başka deyişle, numune ile gerekli oranlarda bir araya getirilerek karıştırılan yüksek konsantrasyonlu tuz belirli bir süre boyunca bekletilerek yoğunluğa dayalı ayırma işlemi gerçekleştirilir (Löder ve Gerdts, 2015). Uygun maliyetli ve çevre dostu olması sebebiyle, doymuş çözelti elde etmek için en sık tercih edilen çözeltilerden biri NaCl çözeltisidir (Liu ve diğ., 2022). Yüksek verimli çözeltiler elde edebilmek için NaI ve ZnCl₂ çözeltilerine başvurulmakta fakat çevresel riskler taşıdıkları için yüksek maliyetli bertaraf işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Okoffo ve diğ., 2019; Nuelle ve diğ., 2014).

Filtrasyon, sıvı ve katı ortamların birbirinden ayrılması işlemidir (Tirkey ve Upadhyay, 2021). Bu işlem; çoğunlukla filtre kağıdı, vakum pompası ve huniden oluşan bir sistem aracılığıyla gerçekleştirilmektedir (Crawford ve Quinn, 2016). Filtrasyon sonrasında, mikroplastik konsantrasyonu hakkında hatalı veriler elde edilebilmektedir. Bunun sebebi, filtre kağıdının petri kabına taşınması esnasında mikroplastik kaybının meydana gelebilmesi durumudur (Lares ve diğ., 2019).

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, izolasyon yöntemine karar verme sürecinde deney prosedürünün sahip olması istenen kriterler şu şekilde özetlenmiştir;

- Düşük maliyetli olması,

- Yüksek organik madde giderimi elde edebilme imkanı sunması,
- Polimer yapısı üzerinde ihmal edilebilir boyutta olumsuz etkiye sahip olması,
- Mikroplastik geri kazanım testinde yüksek geri kazanım oranları elde edilebilmesi,
- Kullanılacak malzemelerin çoğunlukla laboratuvarında bulunan malzemelerden seçilebilmesi,
- Filtre kağıtları üzerinde minimum düzeyde olumsuz etkiye sahip olması,
- Elde edilen verilerin diğer çalışmalarla karşılaştırılabilir olması,
- Sürdürülebilir olması,
- Reaktif maddelerin oluşturabileceği tehlikeli durumların göz önüne alınması,
- Gerçek numune üzerinde uygulanmış olması koşullarıdır (Prata ve diğ., 2019; Alvarez-Zeferino ve diğ., 2020; Campanale ve diğ., 2020).

2.6 Mikroplastiklerin Geri Kazanımı

Mikroplastiklerin tespiti için gerekli olan ön işlemlerde kullanılan kimyasal maddeler ve deney koşullarına bağlı olarak mikroplastiklerin polimer yapısı üzerinde olumsuz etkiler gözlemlenebilmektedir. Mikroplastiklerin bu deney bileşenlerinden ne boyutta etkilendiğini belirleyebilmek için geri kazanım testlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Geri kazanım oranlarının belirlenmesi ile birlikte, çevresel matrislerde bulunan mikroplastiklerin doğru şekilde tespit edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu amaçla, mikroplastik standartları kullanılmaktadır. Mikroplastik standartlarının elde edilmesi için farklı yöntemlerden yararlanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda; satın alma, kişisel bakım ürünlerinden ekstrakte etme ve büyük boyutlu plastiklerden öğütme şeklinde mikroplastik standartlarının elde edildiği belirlenmiştir (Mahat, 2017.; Raju ve diğ., 2020; Xu ve diğ., 2021).

2.7 Mikroplastiklerin Analizi

Mikroplastiklerin analizi için iki farklı yöntemden faydalanılmaktadır. Bunlar; görsel ve kimyasal analiz olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Görsel analiz yöntemlerinde, mikroplastiklerin morfolojik özelliklerine ait verilerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Kimyasal analiz yöntemlerinde ise, mikroplastığın polimer yapısına ait verilerin elde edilmesi amaçlanmaktadır (Sun ve diğ., 2019).

2.7.1 Görsel Analiz Yöntemleri

Mikroplastiklerin tanımlanması ve sınıflandırılması amacıyla görsel analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu sebeple; çevresel matrislerden örneklenip izole edilen mikroplastikler, filtre kağıdı ve petri kabında toplanarak çeşitli yöntemler ile analiz edilmektedir (Song ve diğ., 2015; Palatinus ve diğ., 2015). Optik mikroskop, stereo mikroskop, floresan mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla mikroplastiklerin görsel analizi gerçekleştirilmektedir (Wang ve diğ., 2017; Vermeiren ve diğ., 2020).

Görsel tanımlama süreci, kişiden kişiye değişebilmekte ve farklı sonuçların elde edilmesine sebep olabilmektedir (Corradini ve diğ., 2019). Bu sebeple, mikroplastiklerin mikroskop altında sınıflandırılması ve tanımlanması süreçlerinde hata payını en aza indirebilmek için bazı kriterlere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu kriterler aşağıda özetlenmiştir:

- Plastik materyaller hücresel veya organik yapıya sahip olmamalı,
- Film ve parça şeklindeki mikroplastiklerde homojen renk dağılımı olmalı,
- Lif şekline sahip mikroplastiklerin uzunluğu her noktada eşit olmalı,
- Özellikle şeffaf, kırmızı ve yeşil renklere sahip mikroplastikler olabildiğince yüksek büyütme oranında incelenmelidir (Dris ve diğ., 2015; Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012; Mintenig ve diğ., 2017).

2.7.2 Kimyasal Analiz Yöntemleri

Mikroplastiklerin görsel analizi sonrasında elde edilen verilerin doğruluğunun kanıtlanabilmesi amacıyla kimyasal analiz yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Rasmussen ve diğ., 2021). Mikroplastik konsantrasyonu belirlenirken sadece görsel analiz yöntemlerinden faydalanılması durumunda, çevresel matrislerden elde edilen mikroplastiklerin doğru şekilde tespit edilememesi durumu ortaya çıkabilmektedir (Sun ve diğ., 2019; Franco, ve diğ., 2020).

Mikroplastiklerin polimer yapılarının tanımlanması amacıyla, spektroskopik yöntemler ve termal analiz yöntemlerinden faydalanılmaktadır (Tirkey ve Upadhyay, 2021; Lastovina ve Budnyk, 2021). Bu amaçla; Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR), Raman Spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmaktadır. Termal analiz yöntemlerinden sıklıkla kullanılan yöntem ise kütle spektrometresi ile birleştirilmiş piroliz gazı kromatografisidir (Pyr-GC/MS).

FT-IR Spektroskopisi, türü bilinmeyen polimerlerin kendisi için parmak izi niteliği taşıyan spektrumlarının, bilinen spektrumlarla karşılaştırılması sonucunda polimer türlerinin tespit edilmesi şeklinde bir işleyişe sahiptir (Liu ve diğ., 2022). FT-IR Spektroskopisi aracılığıyla polimerler tanımlanırken, mikroplastiklerin mikroskop altında tek tek seçilmesine ve seçilen her parçacığa ait spektrumun değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple, FT-IR Spektroskopisi zahmetli bir yöntem olarak ifade edilmektedir (Harrison ve diğ., 2012).

Raman Spektroskopisi, lazer ışınımı sonrasında ortaya çıkan Raman saçılımının ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Raman Spektroskopisi aracılığıyla yapılan analizlerin tamamlanması için FT-IR analizine kıyasla daha uzun sürelerle ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, bu yöntemin çoğunlukla 1–50 µm boyut aralığındaki mikroplastiklerin analizinde kullanılması önerilmektedir (Liu ve diğ., 2022).

Kütle spektrometresi ile birleştirilmiş piroliz gazı kromatografisi (Pyr-GC/MS), termal analiz yöntemlerinde en sık tercih edilen yöntemlerdendir. Bu yöntemde, ısınarak gaz halini alan yapıların gaz kromatografisi aracılığıyla analizi gerçekleştirilmektedir (Li ve diğ., 2018). Pyr-GC/MS ile yapılan mikroplastik analizlerinde, numune üzerinde tahribat meydana gelmektedir (Fries ve diğ., 2013).

3. YAPAY SULAKALANLARDA MİKROPLASTİK VARLIĞI

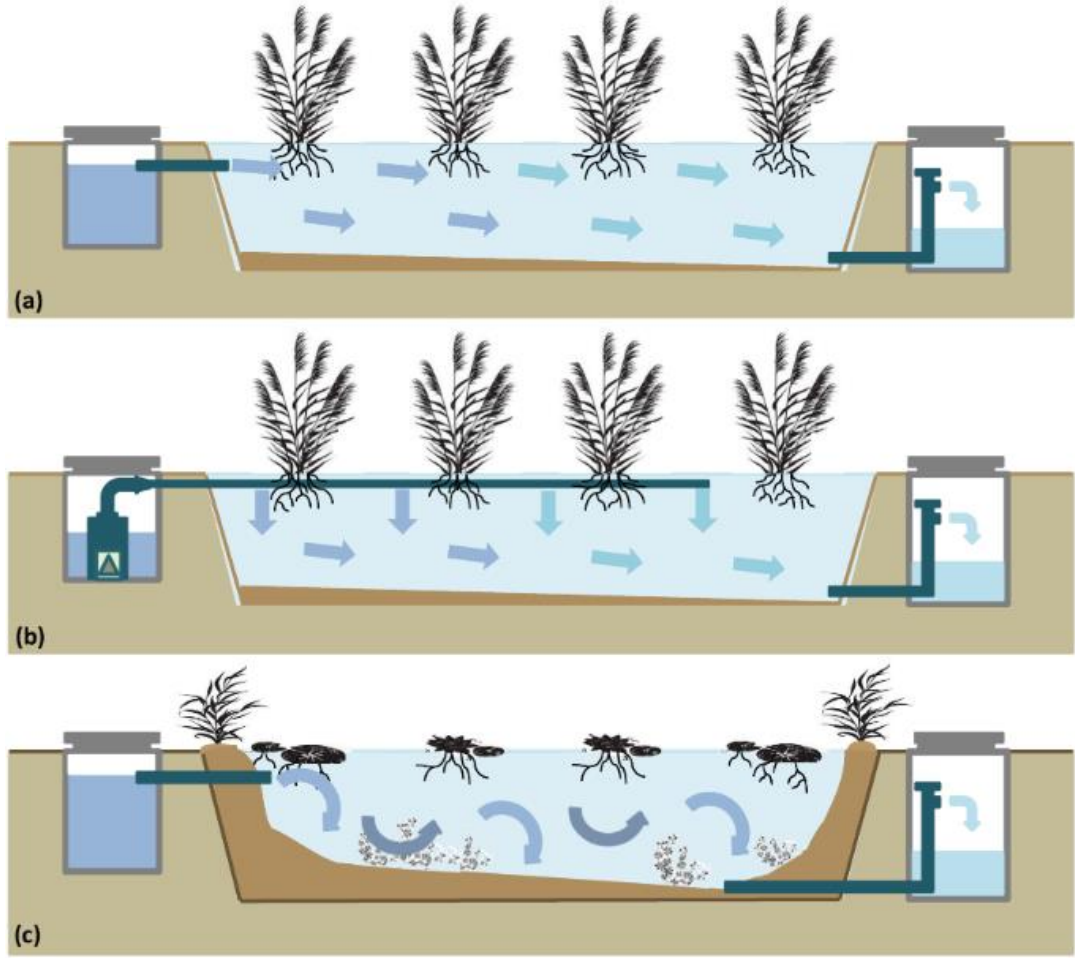
3.1 Yapay Sulakalanlar

Atıksuların sulakalanlarda arıtılması yöntemi, Antik Mısır ve Çin kültürlerine kadar uzanmaktadır. Yapay sulakalanların kullanımı ile ilgili bildirilen ilk yazılı belgenin ise 1904 yılında Hornsby Edebiyat Enstitüsü başkanına yazılan deneme olduğu tahmin edilmektedir. Daha sonra, 1953 yılında Max-Planck Enstitüsü'nden Dr. Kathe Seidel tarafından bitkilerin atıksu arıtılmasındaki rolü ilk kez rapor edilmiş ve çalışmalara başlanmıştır (Seidel, 1976; Brix, 1994).

Yapay sulakalanlar, atıksuların arıtılması amacıyla doğal sulakalanlardan esinlenerek tasarımı gerçekleştirilen doğal arıtma sistemleridir. Uygun maliyetli olmasının yanı sıra çevre dostu olarak da tanımlanan ve birçok avantaja sahip bu sistemler; fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım mekanizmaları yardımıyla farklı faaliyetler sonucunda oluşan atıksu türlerinin verimli bir şekilde arıtılmasını sağlamaktadırlar (Vymazal, 2011; Liu ve diğ., 2022; Xu ve diğ., 2022).

3.2 Yapay Sulakalanların Sınıflandırılması

Yapay sulakalanlar, sulakalan sisteminin hidrolojik yapısına göre farklı gruplara ayrılmaktadır. Substrat yatağında bulunan su sütununun sahip olduğu seviyeye bağlı olarak serbest yüzey akışlı yapay sulakalanlar (SYS) ve yüzeyaltı akışlı yapay sulakalanlar (YAS) olarak sınıflandırılmaktadırlar (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001; Saeed ve Sun, 2012). Şekil 3.1'de yapay sulakalan türlerinin enkesitlerine yer verilmiştir.



Şekil 3.1: Farklı yapay sulakalan sistemlerinin tipik enkesitleri (a: Y-YAS, b: D-YAS, c: SYS)
(Gorgoglione ve Torretta, 2018)

3.2.1 Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalanlar (SYS)

SYS sistemleri ilk kez 1968 yılında evsel ve kentsel kökenli atıksuların arıtılması amacıyla Macaristan'da inşa edilmiştir (Kadlec ve Wallace, 2008). SYS sistemleri, su sütununun, substrat yüzeyinin üzerinde bulunduğu ve substratın yoğun bir bitki örtüsü ile kaplı olduğu sulakalanlardır. Bu sistemlerde, suyun yoğunluğundan daha yüksek yoğunluğa sahip olan kirleticilerin çökme mekanizması aracılığıyla giderimi sağlanmaktadır (Pedescoll ve diğ., 2013). SYS sistemlerinde, derin bölgeler anaerobik iken yüzeye yakın olan bölgeler aerobiktir. Genellikle bataklıklar ile benzer yapıya sahip olan SYS'ler vahşi yaşam için uygun bir habitat ortamı oluşturmaktadırlar (USEPA, 2013; Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001).

SYS sistemlerinde küresel anlamda 150'den fazla makrofit türünden yararlanıldığı düşünülmektedir. Bu türler arasında en çok tercih edilenleri; *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Juncus effusus*, *Scirpus lacustris*, *Scirpus californicus* ve *Phalaris arundinacea* şeklinde ifade edilmiştir (Vymazal, 2013).

3.2.1.1 Köklü Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri

SYS sistemleri arasında en sık karşılaşılan sistemdir. Bu sistemlerde, bitkiler kil benzeri geçirimsizlik tabakasına sahip olan kanal veya havuz yapısına ekilmekte ve bu katman, toprak tabakası ile örtülmektedir (Tousignant ve diğ., 1999). Sığ bir yapıya sahip olan bu sistemin seviyesinin sabit kalmasını sağlamak amacıyla atıksu akışı yavaş bir şekilde gerçekleştirilmektedir (Hamilton ve diğ., 1993). Bu sistemde sıklıkla tercih edilen bitki türleri; *Phragmites australis*, *Glyceria spp.*, *Eleocharis spp.*, *Typha spp.*, *Scirpus spp.*, *Iris spp.* ve *Zizania aquatica* şeklinde özetlenmektedir (Brix, 2003).

SYS sistemlerinde kirletici giderimi çökelme mekanizması aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Kirleticilerin giderilmesinden sonra sulakalan sisteminin tabanında ortaya çıkan çamur yapısına yapay sulakalan bitkileri aracılığıyla oksijen transferi gerçekleşmekte ve aerobik bir ortam meydana gelmektedir (Tousignant ve diğ., 1999).

3.2.1.2 Yüzücü Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri

Yüzücü makrofitler, büyüme süreçleri için bir substrata ihtiyaç duymayan bitkilerdir (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001). Örnek olarak; *Lemna spp.*, *Nuphar spp.*, *Potamogeton natans*, *Hydrocotyle vulgaris*, *Pistiastratiotes*, *Spirodella spp.* türleri verilebilir (Brix, 2003). Yüzer durumda olan bu bitkilerin sulakalanda sürüklenmesini engellemek amacıyla, yüzer halde bulunan ızgara formunda bir bariyerden faydalanılmaktadır. Bu sayede, bitkilerin sürüklenmesi önlenmekte ve

büyüme aşamasına da katkı sağlanmaktadır. Bunlara ilaveten, ızgara yapısının askıda katı maddelerin (AKM) çökmesini kolay hale getirdiği düşünülmektedir (Tousignant ve diğ., 1999).

Yapılan bir çalışmada, yüzücü makrofitlerin fotosentez sürecinde ve algler üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu bildirilmiştir. Bunun sebebi, yüzer halde bulunan makrofitlerin güneş ışığını engellemesidir. Ayrıca, makrofitlerin işletme koşullarına uygun şekilde belirlenen periyodik sürelerde hasat edilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Lemna Corporation, 1994). Hasat sonrasında, yüzücü su bitkilerinin gübre ve yakıt amacıyla değerlendirilebileceği de bir başka çalışmada rapor edilmiştir (Tilak ve diğ., 2016).

3.2.1.3 Batık Bitkilerin Hakim Olduğu Serbest Yüzey Akışlı Yapay Sulakalan Sistemleri

Batık bitkiler, fotosentezden görevli olan yapıları batık halde bulunduğundan çiçekleri aracılığıyla atmosferle etkileşime geçmektedirler (Brix, 2003). *Hydrilla verticillata*, *Ceratophyllum demersum*, *Vallisneria natans*, *Myriophyllum verticillatum* türleri, bu sistemde en sık karşılaşılan türler arasındadır (Wu ve diğ., 2015). Bu sistemler sıklıkla birinci ve ikinci arıtım aşamaları sonrasında tercih edilmektedir (Brix, 1994).

Batık bitkilerin hakim olduğu bu sistemler üzerine çok fazla çalışma yapılmamıştır (Xu ve diğ., 2022). Bu nedenle, literatürde bu sistem hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

3.2.2 Yüzeyaltı Akışlı Yapay Sulakalanlar (YAS)

YAS sistemlerinde, atıksuların dolgu malzemesi ile direkt olarak temas etmesi sağlanarak adsorpsiyon mekanizması aracılığıyla kirletici maddelerin giderimi hedeflenmektedir (Hernández-Crespo ve diğ., 2017). Buna ilaveten, dolgu malzemesi varlığında oluşan biyofilm yapısının yüksek giderim verimi elde edilmesine katkı sağladığı bilinmektedir (Andreo-Martínez ve diğ., 2017).

YAS sistemi, atıksuyun yatak yapısından hızlı bir şekilde geçerek sızmasını sağlamak amacıyla çakıldan oluşan bir alt tabakaya sahiptir. Çakıl ile birlikte, yüksek oranda boşluklu bir yapı elde edilmektedir. Toprak alt tabakasına sahip olan YAS sistemleri de bulunmaktadır (USEPA, 2013).

YAS sistemleri, atıksuyun akış yönüne bağlı olarak yatay yüzeyaltı akışlı sulakalan sistemleri (Y-YAS) ve düşey yüzeyaltı akışlı sulakalan sistemleri (D-YAS) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır.

3.2.2.1 Yatay Yüzeyaltı Akışlı Sulakalan Sistemleri (Y-YAS)

Y-YAS sistemleri, sazlık sulakalan sistemleri şeklinde de tanımlanmaktadır (Parde ve diğ., 2021). Y-YAS sistemlerinde, substratın yatay şekilde akan atıksu ile sürekli olarak temas etmesi ve suya doymun halde kalması sağlanmaktadır (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001). Bu sistem, aerobik ve anaerobik koşullara sahiptir. Bu sebeple, BOI, KOI, AKM ve fosfat gibi birçok kirleticinin etkili bir şekilde giderimi gerçekleştiği için endüstriyel ve tarımsal kökenli olmak üzere farklı atıksu türlerinin arıtılması amacıyla kullanılabilir (Steer ve diğ., 2002; Parde ve diğ., 2021).

3.2.2.2 Düşey Yüzeyaltı Akışlı Sulakalan Sistemleri (D-YAS)

D-YAS sistemlerinde, atıksuların sisteme farklı noktalardan verilmesi ve farklı noktalardan toplanarak alıcı ortama deşarj edilmesi ile düşey akış elde edebilmek mümkün hale gelmektedir. Sızdırmalı sulakalan olarak da tanımlanan bu sistemler, atıksuların substratın bulunduğu yatak yapısından sızması sebebiyle bu isimle de ifade edilmektedir (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001). Aerobik koşullara sahip olması sebebiyle BOI, KOI ve diğ. kirleticiler yüksek oranda giderilmektedir (Parde ve diğ., 2021).

Y-YAS sistemlerinin aksine, atıksu sisteme sürekli olarak değil, belirli aralıklarla verilerek filtre yapısının da temizlenmesi sağlanmaktadır (Tousignant ve diğ., 1999). Y-YAS sistemlerinde yatak derinliği 0,6 m'den daha az iken bu

sistemlerde 2–3 m'ye kadar ulaşmaktadır (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001). Ek olarak, D-YAS sistemleri Y-YAS sistemlerine kıyasla daha az alan ve bakım masrafına ihtiyaç duymaktadır (Parde ve diğ., 2021).

3.3 Yapay Sulakalanların Avantajları ve Dezavantajları

Yapay sulakalan sistemleri, sahip olduğu bazı özellikler sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bunlar;

- Çevre dostu bir yaklaşım olması,
- Sucul organizmalar için yaşam alanı oluşturması,
- İşletme ve bakım işlemleri için sulakalanda sürekli olarak personel bulundurulmasına ihtiyaç duyulmaması,
- İnşaat sürecinin, işletme ve bakım giderlerinin düşük maliyetli olması,
- Atıksu akışında meydana gelen değişikliklerin tolere edilebilmesi,
- Vahşi yaşamın iyileştirilmesine yardımcı olması,
- Bulunduğu bölgeye estetik açıdan olumlu katkı sağlaması,
- Problemlili alt yapıya sahip bölgelerde de uygulanabilmesi,
- Tasarım ömrü açısından bir kısıtlamaya sahip olmaması ve ilerleyen süreçlerde arıtma kapasitesinin artırılabilmesi imkanı sunması,
- Hava kalitesini artırması şeklinde ifade edilmektedir (Sundaravadivel ve Vigneswaran, 2001; USEPA, 2013).

Yapay sulakalanların avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar;

- Diğer sistemlerle kıyaslandığında daha fazla alan ihtiyacına sahip olması,
- Yüksek giderim verimi elde edebilmek amacıyla, sulakalan bitki örtüsünün yeterli oranda büyümesi için fazla zamanın gereksinimi olması,
- Açık havada bulunmaları sebebiyle olumsuz hava koşullarından etkilenebilmesi,

- Giderim verimlerinin mevsimsel değişikliklere göre farklılık gösterebilmesi,
- Bitki türlerinin, kirleticilere bağlı olarak değişen giderim verimlerine sahip olması sebebiyle her kirleticinin giderilememesi şeklinde belirtilmektedir (Parde ve diğ., 2021; USEPA, 2013).

3.4 Literatür Özeti

Long ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada, Çin'in kırsal bir bölgesinde bulunan ve üçüncül arıtma olarak kullanılan yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalanın mikroplastik giderim verimi incelenmiştir. Deney süreci 2020 yılının Kasım ayı boyunca iki farklı yapay sulakalanda gerçekleştirilmiştir. Yapay sulakalanda arıtımı gerçekleştirilen atıksular, tarım ve evsel faaliyetlerden kaynaklanan atıksulardır. Seçilen iki yapay sulakalanda farklı yoğunluklarda ve farklı gruplar halinde *Cyperus alternifolius*, *Phragmites communis*, *Canna indica L.* ve *Thalia Dealbata* bitkileri kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, yapay sulakalanların mikroplastik giderim verimleri sırasıyla %26,59 ve %10,61 olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, yapay sulakalanlarda mikroplastik giderim veriminin kullanılan yapay sulakalan bitkisi ve substrata bağlı olarak değişiklik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple, bitki yoğunluğunun artırılması, farklı yapay sulakalan bitkilerinin kullanılması ve yapay sulakalan sisteminin uygun şekilde boyutlandırılması ile mikroplastik giderim veriminin artırılacağı şeklinde değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Xia ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada, Çin'in en büyük karstik yapıdaki kentsel nitelikli serbest yüzey akışlı yapay sulakalanında bulunan mikroplastiklerin taşınım mekanizması, sulakalana değarj edilen farklı türdeki atıksuların mikroplastik konsantrasyonu ve özellikleri araştırılmıştır. Yüzey sularından alınan numunelerde, sediman örneklerine kıyasla daha küçük boyutlu mikroplastiklerin tespiti gerçekleştirilmiş ve mikroplastik konsantrasyonunun nehir akışı boyunca kademeli bir şekilde azalma gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada, bitki yoğunluğunun fazla olduğu bölgeden alınan sediman numunelerinde daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastığın bulunduğundan bahsedilmiştir. Bu sebeple, bitki

yoğunluğunun mikroplastiklerin yatay taşınımını üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunlara ek olarak, kentsel bölgeye yakın olan bölgelerden alınan numunelerde daha fazla mikroplastik konsantrasyonu tespit edilmiştir. Kentsel bölgeden sonra elde edilen diğer yüksek konsantrasyonlu numunenin ise tarımsal bölgeden alınan numuneye ait olduğu rapor edilmiştir.

Liu ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan çalışma, Çin’de bulunan en büyük kentsel nitelikli serbest yüzey akışlı yapay sulakalanında gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, kentsel sulakalanlarda bulunan mikroplastiklerin tespit edilmesi, bu mikroplastiklerin oluşumunun ve akıbetinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ağustos ve Ocak aylarında yapılan deneylerde yüzey suyu ve sediman numuneleri incelenmiştir. Yüzey suyunda tespit edilen mikroplastik konsantrasyonları Ağustos ayında 0,06–3,05 adet/L olarak belirlenmiştir. Sediman numunelerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonları; 0,01–16,23 adet/L aralığında bulunmuştur. Mikroplastik giderim verimleri incelendiğinde; Ocak ayında %53 iken Ağustos ayında ise %95’e varan bir giderim verimi elde edilmiştir. Sonuç olarak, kentsel sulakalanların mikroplastik giderimi üzerine etkili olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, Ağustos ayında bitki örtüsünün büyümesi ile birlikte mikroplastik gideriminde artış yaşanması sebebiyle, sulakalan bitki örtüsünün büyümesi sonucunda mikroplastik gideriminde daha yüksek verimler elde edileceği tahmin edilmiştir.

Zhou ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada, yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalanlar ve dikey yüzeyaltı akışlı yapay sulakalanlardan oluşan çok aşamalı olarak adlandırılan sulakalan sisteminde mikroplastiklerin giderimi, tespiti ve özelliklerinin belirlenmesi için incelemeler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, her iki yapay sulakalan sisteminde de mikroplastik varlığından bahsedilmiştir. Sulakalan sisteminde bulunan çeşme yapılarının oluşturduğu hidrolik hareket ile büyük boyutlu plastiklerin parçalanarak daha küçük boyutlu parçacıklara dönüşebileceği tahmin edilmiştir. Bunun sebebi, çeşmelerin bulunduğu bölgelerde daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik miktarının tespit edilmiş olmasıdır. Yatay yüzeyaltı akışlı yapay sulakalan sistemlerinde, dikey yüzeyaltı akışlı yapay sulakalan sistemine kıyasla daha yüksek oranda mikroplastik giderim verimi elde edilmiştir. Yatay yüzeyaltı akışlı yapay sulakalan sistemlerinde meydana gelen

filtrasyon ve biyofilm mekanizmalarının mikroplastik giderim verimi üzerinde etkili olduğu düşünülmüştür.

Wang ve diğerleri tarafından 2022 yılında kentsel nitelikli atıksuların artıldığı serbest yüzey akışlı yapay sulakalanda yapılan çalışmada, yüzey suyundan ve sedimandan alınan numuneler incelenerek mikroplastik kirliliğinin boyutu belirlenmiştir. Sulakalanda, kentsel ve kırsal bölgelerden alınan numunelerde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarında istatistiksel farklılıklar belirlenmiş ve bu durum, antropojenik kaynaklarla ilişkilendirilmiştir. Benzer şekilde, nüfus yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde daha fazla mikroplastik konsantrasyonu elde edilmiştir. Deney sonucunda tespit edilen mikroplastik konsantrasyon değerleri; yüzey sularında 150–1067 adet/m³, sedimanda ise 4–148 adet/kg kuru ağırlık şeklindedir. Mikroplastiklerin boyut fraksiyonları incelendiğinde, büyük boyutlu mikroplastiklerin ortamdaki mikroplastik konsantrasyonunda daha az bir paya sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Renk skalası değerlendirildiğinde, sulakalanda yoğun şekilde tespit edilen şeffaf renkteki mikroplastiklerin varlığının balıkçılık faaliyetleri ile bağlantılı olduğu düşünülmüştür.

Chen ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, sentetik kentsel atıksu kullanılarak laboratuvar ölçekli dört farklı deney seti oluşturulmuş; farklı boyut ve şekillerde bulunan mikroplastiklerin yapay sulakalan ortamındaki davranışı ve akıbeti incelenmiştir. Yüzey akışlı yapay sulakalan ve yatay yüzeyaltı akışlı sulakalanlar için farklı koşullara sahip laboratuvar ölçekli deney setleri oluşturulmuştur. Bu deney setinde bulunan yapay sulakalanların birinde yapay sulakalan bitkisi kullanılmış ve farklı tane boyutlarına sahip dolgu materyali tercih edilmiştir. Deney boyunca hidrolik alıkonma süresi 3,9 gün olarak belirlenmiştir. Deney sonucunda, %81,63 ve %100'e varan mikroplastik giderim verimleri elde edilmiştir. Yüzey akışlı yapay sulakalan deney setine eklenen farklı şekillere sahip mikroplastik örnekleri incelendiğinde; film ve parça şeklindeki mikroplastiklerin, liflere kıyasla daha kolay bir şekilde yapay sulakalan sisteminden alıcı ortama deşarj edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır. Deney setlerinde genel olarak aynı şekle sahip farklı boyuttaki mikroplastikler incelendiğinde 2–4 mm aralığındaki mikroplastiklerin daha fazla tespit edildiği belirlenmiştir. Mikroplastik yüzeyinde gözlenen biyofilm tabakasının, mikroplastiklerin çökme davranışı sergilemesine sebep olduğu öne

sürülmüştür. Yatay yüzey altı akışlı sulakalana ait deney setlerinde mikroplastik tespit edilmemiş ve bu durum da mikroplastiklerin yatay yüzeyaltı akışlı sulakalan sisteminde tutulduğuna işaret etmiştir. Bunlara ek olarak, yapay sulakalan sistemlerinin filtrasyon mekanizmasının mikroplastik gideriminde önemli bir etken olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yu ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, laboratuvar ölçekli sulakalan sistemine eklenen PS, PVC, PP ve PE polimerlerinin; bir sulakalan bitkisi olan *Bacopa sp*'nin gelişim sürecine, toprak yapısına ve ortamda bulunan mikroorganizmalara olan etkilerini tespit etmek hedeflenmiştir. Çalışma sonunda, sulakalan bitkisinin boyunda ve ağırlığında düşüş olduğu belirlenmiştir. Ortama eklenen mikroplastikler nedeniyle, toprakta bulunan organik madde, potasyum, toplam azot ve fosfor değerlerinde ciddi oranda bir değişiklik meydana gelmiştir. Toprağın pH değerinin mikroplastik varlığından ihmal edilebilir bir düzeyde etkilendiği ifade edilmiştir.

Wang ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, laboratuvar ölçekli dikey akışlı yapay sulakalan sistemine ait dört farklı deney seti hazırlanarak dolgu materyali tane boyutunun, biyofilm varlığının ve solucanların mikroplastik giderimi üzerindeki etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Mikroplastik örnekleri olarak PS, HDPE, PP ve PE polimerlerinden oluşan mikrobuncuklar seçilmiş, farklı boyut fraksiyonlarına sahip kum ve çakıldan faydalanarak oluşturulan yapay sulakalan sistemlerine *Eisenia fetida* ve *Lumbricus castaneus* olmak üzere iki farklı türde solucan dahil edilmiştir. 45 gün süren deneyin sonunda, dolgu materyali olarak kum kullanılan yapay sulakalanların daha yüksek mikroplastik giderme verimine sahip olduğu ortaya konulmuş ve bu ortamda %100'e varan bir giderme verimi elde edilmiştir. Çakıl kullanılan yapay sulakalan sistemlerinde ulaşılan mikroplastik giderim verimi ise %96 olarak rapor edilmiştir. Yapay sulakalan sistemine eklenen solucanlar ile birlikte mikroplastiklerin daha derin noktalara ulaştığı ifade edilmiştir.

Wang ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, evsel atıksu ve yağmur suyu için üçüncül arıtma olarak kullanılan yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalanın mikroplastik giderimi üzerindeki etkisi ilk kez belirlenmiştir. Bu çalışmanın bir diğer amacı da bir solucan türünün yapay sulakalandaki mikroplastik dağılımı üzerindeki etkisinin tespit edilmesi şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan

deneyler sonucunda, yapay sulakalarda elde edilen mikroplastik giderim verimi %88 olarak rapor edilmiştir. 6,45 adet/L olan mikroplastik konsantrasyonunun azalarak 0,77 adet/L'lik bir değere ulaştığı belirlenmiştir. Yapay sulakalarda kullanılan dolgu materyalinden daha büyük boyutta olan mikroplastiklerin daha düşük oranda giderildiği tespit edilmiştir. Bu sonucun, granül filtrasyonunda bulunan bir kuralla ilişkili olduğu düşünülmüş ve mikroplastik çapının ortam materyali çapından %15 daha küçük olması gerektiği koşuluna bağlanmıştır. Yapay sulakalarda bulunan solucanların etkinliği değerlendirildiğinde ise, solucanların bünyesinde çoğunlukla lif şeklindeki mikroplastikler tespit edilmiş ve bu durum, liflerin organizma için daha kolay sindirilebilir bir yapıda olması ile ilişkilendirilmiştir.

Ziajahromi ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, yağmur suyu arıtımı amacıyla kullanılan SYS sisteminde araç lastiklerinin aşınmasından kaynaklanan mikroplastiklerin varlığını belirlemek amacıyla giriş, çıkış ve sediman bölgelerinden numune alınmıştır. Çalışma sonucunda, yapay sulakalan sisteminin PET polimerinden oluşmasına rağmen alınan numunelerde PET polimerine rastlanmamıştır. FT-IR analizleri sonucunda, otomobil lastiklerinin ana materyallerinden biri olan sentetik kauçuk polimeri tespit edilmiştir. Giriş numunesinde ortalama $0,9 \pm 0,3$ adet/L, çıkış numunesinde $4,0 \pm 2,4$ adet/L ve sediman numunelerinde ise ortalama 595 ± 120 adet/kg kuru ağırlık ve 320 ± 42 adet/kg kuru ağırlık konsantrasyonlarında mikroplastik varlığı rapor edilmiştir. Sediman numunelerinde yapılan FT-IR analizlerinin %15–38'inde sentetik kauçuk materyali tespit edilmiş ve bu materyalin yüksek ihtimalle araç lastiklerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Tablo 3.1: Literatür çalışmaları kapsamında incelenen yapay sulakalan sistemleri ve tespit edilen mikroplastiklerin özellikleri

YSA Türü	Çalışma Alanı	Atıksu Türü	YSA Bitkisi	Bitki Yoğunluğu	Dolgu Materyali	Debi	Şekil	Konsantrasyon	Renk	Polimer Türü	Baskın boyut	Mikroplastik Giderim Verimi	Referans
Kentsel sulakalan	Saha çalışması	Kentsel	-	-	-	-	Film, lif, parça	16,5–605,0 adet/L, $16,8 \times 10^3$ – $52,8 \times 10^3$ adet/kg	-	PE, PP, PVC, PA, PS	50–500 µm	%53,7 -%61,4	(Xia ve diğ., 2022)
Y- YAS + SYS	Saha çalışması	Kentsel	<i>Reed, Cattail, Scallion</i>	-	İri, orta ve ince taneli çakıl	-	Lif, parça, film, mikroboncuk	-	Beyaz, şeffaf, yeşil, kırmızı, siyah, sarı, mavi	PVC, PS, PP, PET, PE	-	%82,8	(Zhou ve diğ., 2022)
D-YAS + SYS			<i>Reed, Cattail</i>	-	İri, orta ve ince taneli çakıl	-	Lif, parça, film, mikroboncuk	-	-		%88,9		
Kentsel sulakalan	Saha çalışması	Kentsel	-	-	-	-	Film, parça, mikroboncuk, lif, köpük	150–1067 adet/m ³ , 4–148 adet/kg kuru ağırlık	Beyaz, siyah, mavi, şeffaf, yeşil	PES, PE, PP	<0.05 mm	-	(Wang ve diğ., 2022)

Tablo 3.1: Literatür çalışmaları kapsamında incelenen yapay sulakalan sistemleri ve tespit edilen mikroplastiklerin özellikleri (devam)

YSA Türü	Çalışma Alanı	Atıksu Türü	YSA Bitkisi	Bitki Yoğunluğu	Dolgu Materyali	Debi	Şekil	Konsantrasyon	Renk	Polimer Türü	Baskın boyut	Mikroplastik Giderim Verimi	Referans	
Y-YAS	Saha çalışması/ Üçüncül arıtma	Evsel ve tarımsal atıksu	<i>Cyperus alternifolius.</i> , <i>Phragmites communis</i>	40 bitki/m ² ,	Çakıl	750 m ³ /gün	Lif, parça	1.45x10 ⁷ adet/gün	Kırmızı, şeffaf, mavi, siyah	PE, PS, PP, PA	<0,5 mm	%26,59	(Long ve diğ., 2022)	
	Saha çalışması/ Üçüncül arıtma		<i>Canna indica</i> <i>L.</i> , <i>Thalia</i> <i>Dealbata</i>	20 bitki/m ²										
Y-YAS	Saha çalışması/ Üçüncül arıtma	Evsel ve tarımsal atıksu	<i>Cyperus alternifolius.</i> , <i>Phragmites communis</i>	50 bitki/m ²	Çakıl	1000 m ³ /gün	Lif, mikrobuncuk, parça	1.73x10 ⁷ adet/gün	Kırmızı, şeffaf, mavi, siyah	PE, PS, PP, PA	<0,5 mm	%10,61		(Long ve diğ., 2022)
	Saha çalışması/ Üçüncül arıtma		<i>Canna indica</i> <i>L.</i> , <i>Thalia</i> <i>Dealbata</i>	25 bitki/m ²										

Tablo 3.1: Literatür çalışmaları kapsamında incelenen yapay sulakalan sistemleri ve tespit edilen mikroplastiklerin özellikleri (devam)

YSA Türü	Çalışma Alanı	Atıksu Türü	YSA Bitkisi	Bitki Yoğunluğu	Dolgu Materyali	Debi	Şekil	Konsantrasyon	Renk	Polimer Türü	Baskın boyut	Mikroplastik Giderim Verimi	Referans
SYS	Laboratuvar ölçekli çalışma	Sentetik kentsel atıksu	Bitki yok	-	İnce taneli çakıl	2,5 mL/dk	Film, parça, lif	-	-	PP, PET	0,5–1 mm, 2–4 mm	%81,63	(Chen ve diğ., 2021)
Y- YAS			Bitki yok	-				-	-			%100	
Y- YAS			<i>Phragmites</i>	40 bitki/m ²				-	-				
Y- YAS			Bitki yok	-	İri taneli çakıl			-	-				
D-YAS	Laboratuvar ölçekli çalışma	-	Bitki yok	-	Çakıl ve kum	-	Mikroboncuk	-	-	PS, HDPE, PP, PE		%96- %100	(Wang ve diğ., 2021)
Y-YAS	Saha çalışması/ Üçüncül arıtma	Evsel atıksu ve yağmur suyu	<i>Phragmites australis</i>	-	Çakıl	261 m ³ /gün	Lif, parça, film	428–27381 adet/kişi/gün	-	PS, PE, PHMB,	75 – 425 µm	%88	(Wang ve diğ., 2020)
SYS	Saha çalışması	Yağmur suyu	-	-	Geri dönüştürülmüş PET	-	Lif, parça	0,9 ± 0,3 adet/L, 4,0 ± 2,4 adet/L, 595 ± 120 adet/kg kuru ağırlık, 320 ± 42 adet/kg kuru ağırlık	Siyah	PA, PP, PES, PE, sentetik kauçuk, akrilik	190–500 µm, 25–100 µm	-	(Ziajahromi ve diğ., 2020)

3.5 Tezin Amacı

Yapay sulakalan sistemleri çoğunlukla kırsal bölgelerde oluşan atıksuların arıtılması amacıyla kullanılan sistemlerdir. Arıtılan atıksuların alıcı ortamlara deşarjı ile bu ortamlara mikroplastik salınımı gerçekleşmektedir. Literatürde, yapay sulakalanlarda mikroplastik kirliliğinin ve mikroplastik giderim verimlerinin belirlendiği az sayıda çalışma bulunmaktadır (Tablo 3.1).

Bu tez çalışması kapsamında, Denizli ilinde bulunan yatay yüzey altı akışlı yapay sulakalan (Y-YAS) sisteminde salınımı gerçekleştirilen mikroplastik miktarının belirlenmesi, yaz ve kış mevsimlerinde tesisin mikroplastik giderim veriminin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanı olan Y-YAS sisteminde bulunan *Phragmites australis* bitkisinin bünyesine mikroplastik alma potansiyelini belirlemek için bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tez Projesinin hedeflerine ulaşması için izlenen süreçte, belirlenen optimum mikroplastik izolasyon metodu kullanılarak yaz ve kış dönemlerinde numune alımı gerçekleştirilmiştir. Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerine ait atıksu karakterizasyonları belirlenmiş, tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyon değerleri ve morfolojik özelliklerine ait veriler tablolar halinde verilmiştir. Bunlara ilaveten, giriş ve arıtılmış su bölgesinden alınan *Phragmites australis* numuneleri ekstrakte edilerek mikroplastik alma potansiyeli hakkında veriler elde edilmiştir.

4. YÖNTEM

4.1 Çalışma Alanı

Çalışmanın gerçekleştirildiği yapay sulakalan, Denizli iline bağlı Bozkurt ilçesinin Alikurt Mahallesi’nde bulunmaktadır. 2005 yılında inşası gerçekleştirilen tesis, zaman içerisinde atıl duruma geldiği için “Denizli ilinde daha önce farklı kurum/kuruluşlar tarafından yapılmış olan atıl durumdaki Yapay Sulak Alanların (doğal arıtmalar) yenilenmesi alternatiflerinin geliştirilmesi” projesi ile 2016–2017 yılları arasında Göçmez ve diğerleri tarafından yenilenerek tekrardan işletmeye alınmıştır. Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi’nin genel görüntüsü aşağıda verilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3).

Alikurt Mahallesi’nde evsel faaliyetler sonucunda oluşan atıksular, kanalizasyon hattı aracılığıyla sızdırmaz beton fosseptik yapısına iletilerek tesise gelmekte ve burada arıtılarak alıcı ortama deşarj edilmektedir (Göçmez ve diğ., 2022). Yatay yüzeyaltı akışlı yapay sulakalana ait tasarım parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi’ne ait tasarım parametreleri (Göçmez ve diğ., 2022)

Tasarım Parametreleri	
Debi	37800 L/gün
Günlük kişi başına düşen debi miktarı	60 L/kişi.gün
Nüfus	630 kişi
Dolgu Materyali	Dere çakılı
Yapay Sulakalan Bitkisi	<i>Phragmites australis</i>
Kök Derinliği	0,70 m
Yatak Genişliği	20,0 m
Yatak Uzunluğu	60,0 m
Yatak Eğimi	% 0,3
Alıkonma Süresi	5,88 gün



Şekil 4.1: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'nin bulunduğu bölgeye ait bir görüntü



Şekil 4.2: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi girişi



Şekil 4.3: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'ne ait genel bir görüntü

Atıksu karakterizasyonunu belirlemek için kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), pH, toplam katı madde (TKM), organik madde (OM) ve askıda katı madde (AKM) tayinleri Standart Metotlarda verilen prosedüre göre gerçekleştirilmiştir (APHA, 2012). Karakterizasyon deneyleri yaz ve kış dönemlerinde numunelerin alındığı iki haftalık periyoda uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerinin yaz dönemine ait karakterizasyonu Tablo 4.2'de; kış dönemine ait karakterizasyonları ise Tablo 4.3'te verilmiştir. Sonuçlar, iki tekrarlı deneylerin ortalaması alınarak verilmiştir.

Tablo 4.2: Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerinin yaz dönemi karakterizasyonu

Tarih	Numune Adı	KOİ (mg/L)	AKM (mg/L)	pH	TKM (mg/L)
Haziran	Giriş	894,6	280	7,36	860
		757,5	37,5	7,16	882
	Sediman	5009,44	3580	7,18	4712,75
		4502,99	4270	7,44	4844,73
	Arıtılmış su	<50	4	7,39	474
		<50	18	8,76	732

Tablo 4.2: Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerinin yaz dönemi karakterizasyonu (devam)

Tarih	Numune Adı	KOI (mg/L)	AKM (mg/L)	pH	TKM (mg/L)
Temmuz	Giriş	159,5	55	8,57	824
		213,8	325	7,87	884
	Sediman	6485,38	4750	9,89	5187,01
		10968,09	25615	7,44	25027,95
	Arıtılmış su	<50	28	7,82	744
<50		62	7,8	744	
Ağustos	Giriş	302,4	200	7,58	1050
		562,9	450	7,73	1172
	Sediman	16321,99	25615	7,48	10938,18
		3154,29	8960	7,59	2818,21
	Arıtılmış su	<50	19,33	7,81	890
		<50	7	7,73	760

Tablo 4.3: Giriş, arıtılmış su ve sediman numunelerinin kış dönemine ait atıksu karakterizasyonu

Tarih	Numune Adı	KOI (mg/L)	AKM (mg/L)	pH	TKM (mg/L)
Aralık	Giriş	235,49	215	8,46	876
		564,68	207,5	7,4	1032
	Sediman	876,49	1195	7,97	1488,62
		1914,72	1550	8,21	2353,93
	Arıtılmış su	<50	31	8,5	532
<50		34	7,96	728	
Ocak	Giriş	354,87	225	8,61	874
		524,89	482,5	7,75	964
	Sediman	1968,72	1602	7,84	697,18
		2001,54	1765	8,55	638,89
	Arıtılmış su	<50	21	8,33	554
<50		10	7,91	602	
Şubat	Giriş	380,19	175	8,22	932
		134,2	110	9,14	894
	Sediman	597,95	715	8,63	1116,26
		1748,31	2620	8,82	2707,68
	Arıtılmış su	<50	7	8,79	694
<50		29	9,02	616	

4.2 Örneklem Yöntemi

Giriş ve arıtılmış su numuneleri, 2 saatlik kompozit numuneler şeklinde otomatik örnekleyici ile toplanmıştır. Sediman numunesi ise anlık olarak manuel bir

şekilde alınmıştır. Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi giriş yapısı Şekil 4.4'te, Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi sediman numunesi toplama istasyonu Şekil 4.5'te, Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış atıksu numunesi toplama istasyonu Şekil 4.6'da ve Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış su numunesine ait deşarj noktası Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi giriş yapısı ve giriş atıksuyu numunesi toplama istasyonu



Şekil 4.5: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi sediman numunesi toplama istasyonu



Şekil 4.6: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış atıksu numunesi toplama istasyonu



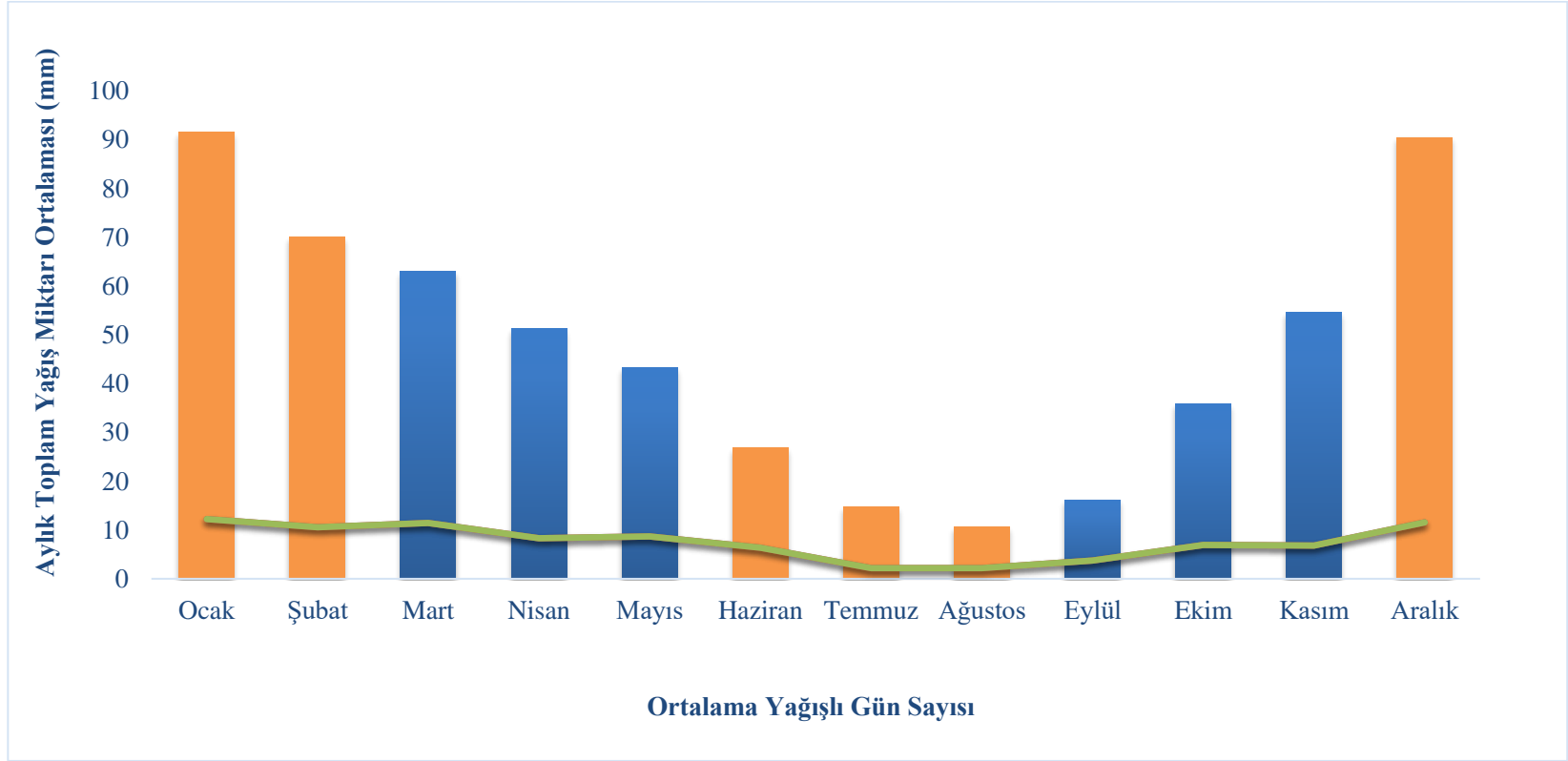
Şekil 4.7: Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi arıtılmış su numunesine ait deşarj noktası

Mevsimsel değişime bağlı olarak mikroplastik konsantrasyonlarında ve çeşitli morfolojik özelliklerinde gerçekleşebilecek değişimi belirleyebilmek amacıyla, farklı yağış miktarlarına sahip olan yaz ve kış aylarında numune alımı gerçekleştirilmiştir. Ayda iki kez, iki haftalık sürelerle olacak şekilde kış mevsimini temsilen Aralık, Ocak, Şubat aylarında ve yaz mevsimini temsilen Haziran, Temmuz, Ağustos aylarında toplanan numuneler laboratuvara getirilerek 4°C’de saklanmıştır. Karakterizasyon

deneyleri ise numuneler laboratuvara ulaştıktan sonra en kısa sürede içerisinde, Standart Metotlara uygun olarak ve üç tekrarlı deneyler şeklinde gerçekleştirilmiştir (APHA, 2012).

Yapılan bazı çalışmalarda, yağışlı mevsimlerde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunun kurak mevsimlerde tespit edilen konsantrasyondan daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Rodrigues ve diğ., 2018; Jiang ve diğ., 2022). Bu sebeple, çalışma dönemleri seçilirken bu kriter de göz önüne alınmıştır.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen veriler ışığında, Denizli iline ait 1957 ve 2021 yılları arasında aylık toplam yağış miktarı ortalaması ve ortalama yağışlı günler sayısına ait değerler özetlenmiştir. Şekil 4.8'deki veriler incelendiğinde Aralık, Ocak ve Şubat aylarının çok yağış alan aylar olduğu belirlenmiştir. Yaz mevsimi kapsamında incelenen Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları ise en az yağış alan aylardandır. Bir diğer az yağış alan ay ise eylül ayı olarak belirlenmiştir. Eylül ayı, yaz ve kış mevsimlerindeki değişikliği belirlemek amacıyla kapsam dışında kaldığı için tercih edilmemiştir.



Şekil 4.8: 1957–2021 yılları arasında Denizli ilinde ölçülen yağış verileri (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022)

4.3 İzolasyon Metodunun Belirlenmesi

Yüksek organik madde içeriği, mikroplastiklerin analizini zorlaştırmakta ve izolasyon işleminin verimini düşürmektedir (Okoffo ve diğ., 2019). Bu sebeple, farklı organik madde içerikleri dolayısıyla, numuneler birbirinden farklı hacimlerde toplanmıştır. Numuneler arasında en düşük organik madde içeriğine sahip olan arıtılmış su numunesinden en çok hacimde, en yüksek organik madde içeriğinin sahip olan sediman numunesinden ise en az hacimde numune alınmıştır. Giriş atıksu numunesinde 500 mL, sedimanda 50 mL ve arıtılmış suda 1 L hacmindeki numuneler ile deneyler yürütülmüştür.

4.3.1 Elek Sayısı ve Boyutu

Mikroplastik konusu üzerine son yıllarda çalışılmaya başlanması dolayısıyla henüz standartlaşmış bir elek boyutu bulunmamaktadır. Çalışmanın amacı doğrultusunda belirlenen elek boyutları, çalışmadan çalışmaya farklılık göstermektedir (Franco ve diğ., 2020; Sayed ve diğ., 2021; Xu ve diğ., 2020).

Tez çalışması kapsamında hedeflenen mikroplastik boyutları göz önüne alındığında elek boyutları sırasıyla; 100 µm, 500 µm ve 1000 µm olmak üzere üç farklı gözenek boyutunda tercih edilmiştir.

4.3.2 Reaksiyon Sıcaklığı

Prata ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, reaksiyon sıcaklığı ile birlikte organik madde gideriminde artış gerçekleştiği rapor edilmiştir (Prata ve diğ., 2019). Bir diğer yandan, reaksiyon sıcaklığının polimer yapısı üzerinde olumsuz etki yaratmasını engellemek amacıyla, Munno ve diğerleri tarafından 2018 yılında yapılan çalışma referans alınarak 70°C'lik bir reaksiyon sıcaklığı tercih edilmiştir (Munno ve diğ., 2018).

4.3.3 Oksidan Madde

H₂O₂ ile gerçekleştirilen kimyasal oksidasyon süreçlerinde; H₂O₂'nin sağladığı yüksek organik madde giderim potansiyeli ve polimerler üzerinde ihmal edilebilir boyutta olumsuz etkiye sahip olması koşulları, izolasyon yöntemi seçiminde etkili olan kriterlerden olmuştur (Kang ve diğ., 2020). Bu sebeple, oksidan madde olarak H₂O₂ tercih edilmiştir. H₂O₂ oksidasyonu ile mikroplastik izolasyonu işleminin gerçekleştirildiği çalışmalar incelendiğinde; farklı reaksiyon süreleri, farklı sıcaklık kombinasyonları ve farklı oranlarda H₂O₂ kullanıldığı belirlenmiştir (Prata ve diğ., 2019; Nuelle ve diğ., 2014; Duan ve diğ., 2020).

4.4 Numuneler için Optimum Oksidasyon Koşullarının Belirlenmesi

H₂O₂ oksidasyonu, konsantrasyona bağlı olan yavaş bir süreç olduğundan deney koşulları önem arz etmektedir (Tirkey ve Upadhyay, 2021). Bu nedenle, kimyasal oksidasyon yönteminde optimum koşulların belirlenebilmesi amacıyla çeşitli deney setleri oluşturulmuştur. Tez kapsamında incelenen üç farklı numunenin sahip olduğu farklı atıksu karakterizasyonları nedeniyle, her bir numune için farklı deney koşulları ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Yapılan çalışmalarda, AKM giderimi ile mikroplastik giderimi arasında bir ilişki olduğu ifade edilmiştir (Long vd., 2022; Wang vd., 2021). Bundan dolayı, AKM gideriminin yüksek olduğu noktalar optimum koşullar için belirleyici bir kriter olmuştur. Ayrıca, izolasyon yöntemi ile birlikte organik madde giderimi amaçlandığı için numunelerin askıda katı madde (AKM) tayini verilerine ihtiyaç duyulmuştur. Standart metotlarda verilen prosedür referans alınarak AKM tayini gerçekleştirilmiştir.

4.4.1 Giriş Atıksu Numunesi

İlk olarak, giriş atıksu numunesi için optimum oksidasyon koşulları belirlenmiştir. Bu amaçla, kimyasal oksidasyonun verimini etkileyen faktörlerden olan oksidan dozu ile farklı süre kombinasyonları denenmiştir. Reaksiyon sıcaklığı 70°C

olarak tercih edildiği için bu sıcaklık değeri bütün deney noktalarında sabit tutulmuştur.

Giriş atıksu numunesi yüksek organik madde içeriğine sahip olduğundan yüksek organik madde giderimi elde etmek amacıyla yüksek konsantrasyonlarda H₂O₂ dozları ve uzun reaksiyon süreleri tercih edilmiştir. Belirlenen reaksiyon süreleri sırasıyla 60, 90, 120 ve 180 dakika; H₂O₂ (%50) dozları ise 20 mL, 30 mL ve 40 mL olarak seçilmiştir (Tablo 4.4). Farklı reaksiyon süreleri ve H₂O₂ dozu konsantrasyonlarında elde edilen AKM giderim verimleri, optimum izolasyon koşullarının belirlenmesinde önemli bir etken olarak kabul edilmiştir. Düşük maliyetli bir deney prosedürü elde edebilmek adına, düşük H₂O₂ konsantrasyonu ve kısa reaksiyon sürelerine dikkat edilerek bu değerlerin yüksek AKM giderim verimi ile kesiştiği noktayı bulmak amaçlanmıştır. Yüksek AKM giderimi eldesi temel amaç olduğu için ilk olarak bu değerler incelenmiştir. Tabloda genel olarak, oksidan dozu ve reaksiyon süresi artışı ile birlikte AKM giderim veriminde de artış gözlenmiştir. Elde edilen en yüksek AKM giderim verimleri %85,38, %99,13, %88,12 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasında, düşük oksidan dozu olan 20 mL'de %85,38'lik bir giderim verimi elde edilmişken tüm yüksek AKM giderim verimlerine 180 dakikalık bir reaksiyon süresi sonunda ulaşılmıştır. Mikroplastik analizinde hatalı sonuçlar elde edilmesini önlemek amacıyla, mikroskop altında incelenen filtre kağıtlarında en net görüntüye %99,13 AKM giderim verimi noktasında gözlenmiştir. Bu sebeple, giriş atıksu numunesi için seçilen optimum izolasyon koşulları; 30 mL oksidan dozu ve 180 dakika reaksiyon süresi olarak tercih edilmiştir. Bunlara ek olarak, bu koşullarda filtre kağıdında olumsuz bir durum ile karşılaşılmamıştır.

Tablo 4.4: Giriş numunesinin farklı koşullarda elde edilen AKM giderim verimleri

H ₂ O ₂ (ml)	Süre (dk)	AKM Giderme Verimi (%)
20	60	64,87
20	90	68,87
20	120	73,25
20	180	85,38

Tablo 4.4: Giriş numunesinin farklı koşullarda elde edilen AKM giderim verimleri (devam)

H₂O₂ (ml)	Süre (dk)	AKM Giderme Verimi (%)
30	60	51,75
30	90	69,62
30	120	66,00
30	180	99,13
40	60	52,62
40	90	65,62
40	120	64,25
40	180	88,12

4.4.2 Sediman Numunesi

Sediman numunesinde AKM tayinleri yapılmış ve giderim verimleri üzerinden optimum koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Sediman numunesi için 20 mL, 30 mL ve 40 mL'lik oksidan dozları ile 90, 120 ve 180 dakikalık reaksiyon süreleri seçilmiştir (Tablo 4.5). Giriş atıksu numunesinde olduğu gibi sediman numunesinde de AKM giderim veriminin genel olarak, artan oksidan dozu ve reaksiyon süresiyle doğru orantılı bir şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir. Tüm yüksek AKM giderim verimleri 180 dakikalık bir reaksiyon süresinin sonunda elde edilmiştir. 20 mL'lik oksidan dozunda elde edilen maksimum AKM giderim verimi %97,40 olarak tespit edilmiştir. 30 mL ve 40 mL oksidan dozlarında ise sırasıyla %98,17 ve %98,93'e ulaşan giderim verimleri eldesi gerçekleşmiştir. Optimum koşullar seçilirken izolasyon yönteminin sürdürülebilirliği açısından maliyetin düşük olması amaçlanmıştır. Bu nedenle, 40 mL ve 30 mL dozlarında ihmal edilebilecek düzeyde AKM giderim verimi farkından dolayı daha uygun maliyetli olan 30 mL oksidan dozu ve 180 dakikalık reaksiyon süresi tercih edilmiştir. Ayrıca, bu koşullarda filtre kağıdında olumsuz bir durum gözlenmemiştir.

Tablo 4.5: Sediman numunesinin farklı koşullarda elde edilen AKM giderim verimleri

H₂O₂ (ml)	Süre (dk)	AKM Giderme Verimi (%)
20	90	85,50
20	120	96,03
20	180	97,40
30	90	88,55
30	120	96,95
30	180	98,17
40	90	91,15
40	120	98,32
40	180	98,93

4.4.3 Arıtılmış Su Numunesi

Arıtılmış su numunesi, AKM içermediğinden bu numune için optimum koşullar belirlenirken mikroskop altında net görüntü elde eldesi amaçlanmıştır. Arıtılmış su numunesinde optimum koşullar belirlenirken AKM giderim verimlerinden yararlanılmadığı için mikroskop altında en net görüntünün elde edildiği oksidan dozu ve reaksiyon süresinin tercih edilmesi amaçlanmıştır. Düşük organik madde içeriği nedeniyle seçilen oksidan dozları 5 mL, 7 mL, 10 mL; reaksiyon süreleri ise 15, 30 ve 45 dakika olarak belirlenmiştir. Reaksiyon süresi ve oksidan dozu kombinasyonları arasında en net görüntüye, 5 ml H₂O₂ dozu ve 45 dakikalık reaksiyon süresi sonunda ulaşılmıştır. Bu deney prosedüründe de düşük maliyetli bir prosedür gerçekleştirmek amaçlandığı için bu kritere uygun bir seçim yapılmıştır. Diğer numunelerle benzer şekilde, bu proste de filtre kağıdı üzerinde olumsuz bir etki saptanmamıştır.

4.5 Geri Kazanım Testi

Mikroplastiklerin atıksu ortamından izolasyonu sürecinde deney sonuçlarının gerçek verileri yansıtabilmesini sağlamak amacıyla, izolasyon yönteminin polimer

yapısı üzerinde ihmal edilebilir düzeyde olumsuz etkiye sahip olması hedeflenmektedir.

İlk olarak, mikroplastik standartları tedarik edilmiştir. Satın alınan ve öğütülen mikroplastik standartları, atıksu numunelerinde sıklıkla tespit edilen PET, PS, LDPE, HDPE ve PS örneklerinden seçilmiştir. Mikroplastik standartları kullanılarak her bir numune için belirlenen optimum izolasyon prosesleri uygulanmıştır. Yaklaşık olarak %100'e yakın geri kazanım oranı elde etmek amaçlanmıştır. İzolasyon işlemleri sonrasında kütleli ve sayısal geri kazanım oranları sırasıyla Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Kütleli geri kazanım oranı (R)} = \frac{\text{Bulunan mikroplastik (g)} \times 100}{\text{Başlangıçta eklenen mikroplastik (g)}} \quad (4.1)$$

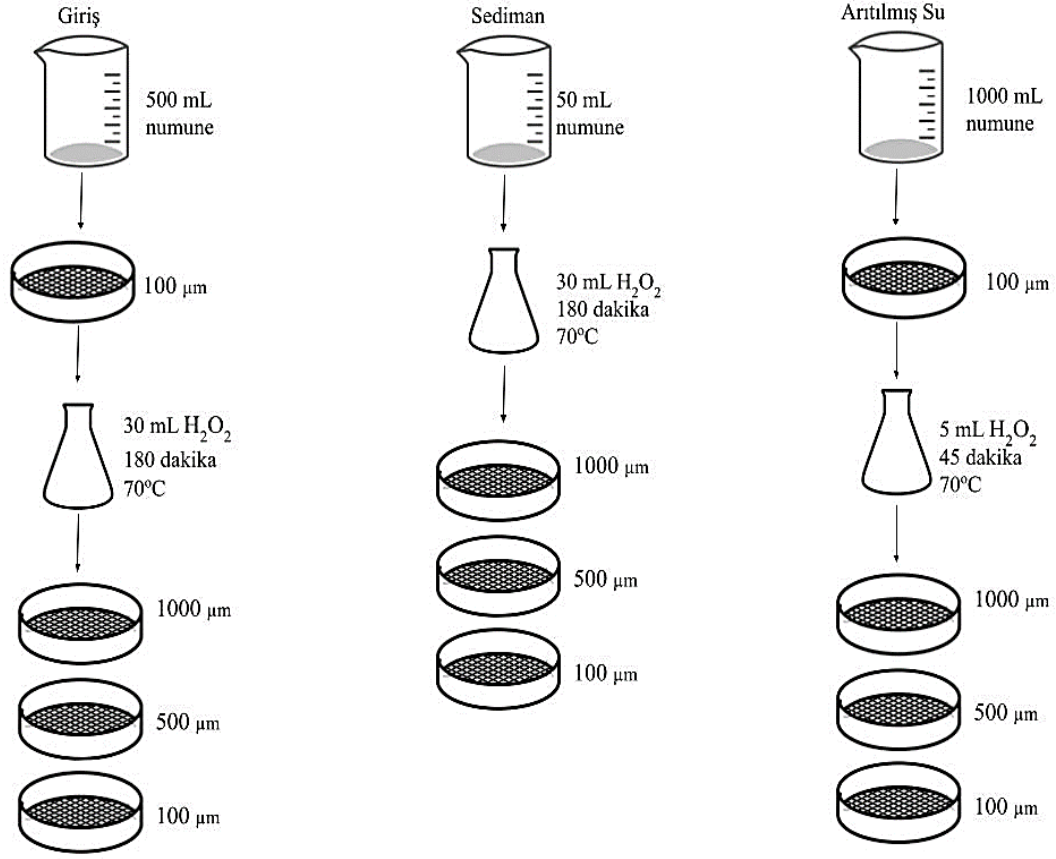
$$\text{Sayısal geri kazanım oranı (R)} = \frac{\text{Bulunan mikroplastik (adet)} \times 100}{\text{Başlangıçta eklenen mikroplastik (adet)}} \quad (4.2)$$

İzolasyon prosesi sonrasında, kütleli ve sayısal yüksek geri kazanım oranları elde edilmiştir (Tablo 4.6). Mikroplastiklerin morfolojik olarak herhangi bir değişime uğramadığı gözlemlenmiştir. Böylece, izolasyon yönteminin optimum koşulları sağladığına dair nihai sonuca ulaşılmıştır.

Tablo 4.6: Mikroplastik geri kazanım oranları

Mikroplastik ağırlığı (g)		Kütleli geri kazanım oranı (R)
Başlangıçta eklenen	Bulunan	
0,4635	0,4524	%98
Mikroplastik sayısı (adet)		Sayısal geri kazanım oranı (R)
Başlangıçta eklenen	Bulunan	
25	25	%100

İzolasyon yönteminin belirlenmesinden sonra her bir numune için tercih edilen optimum deney koşulları ile birlikte, çalışma süresince gerçekleştirilen deney prosedürü Şekil 4.9'da özetlenmiştir.



Şekil 4.9: Deney prosedürü

İlk olarak, giriş ve arıtılmış su numuneleri 100 µm gözenek boyutuna sahip eleklerden süzülmüş ve geri yıkama işlemi yapılmıştır. Sediman numunesine ise hiçbir ön işlem yapılmamıştır. Oksidasyon prosesleri, 70°C'lik bir reaksiyon sıcaklığında ve her bir numune için belirlenen reaksiyon süreleri boyunca orbital çalkalamalı inkübatörde gerçekleşmiştir. Reaksiyon süresi sonunda tüm numuneler, çalışmada hedeflenen 1000 µm, 500 µm ve 100 µm gözenek boyutundaki eleklerden süzülmüş ve böylece, izolasyon prosesi tamamlanmıştır.

4.6 Mikroplastik Analizi

Tez kapsamında incelenen, atıksu ve sediman numunelerine ek olarak ekstraksiyonu gerçekleştirilen *Phragmites australis* bitkisinin görsel analizi, sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri olan stereo mikroskoptan (Stemi 305 Carl Zeiss, Almanya) faydalanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen mikroplastik görüntüleri stereo mikroskop ile bütünleşik halde olan dijital kamera (MshOt MD50) aracılığıyla

alınmıştır. Görsel analiz sırasında filtre kağıtları önce soldan sağa doğru incelenmiş, ardından bir alt satıra geçilerek sağdan sola olacak şekilde analize devam edilmiştir (Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012). Filtre kağıdında bulunan parçacıkların plastik olarak tanımlanması esnasında, daha önce yapılan çalışmalarda belirtilen kriterler dikkate alınmıştır (Dris ve diğ., 2015; Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012; Mintenig ve diğ., 2017). Buna ilaveten, tanımlama aşamasında şüpheli yaklaşılan parçacıklara bir pens aracılığıyla baskı uygulanmış ve parçalanan partiküller plastik olarak kabul edilmemiştir (Masura ve diğ., 2015).

Görsel analiz işlemleri sonrasında atıksu ve sediman numunelerinden seçilen 8 adet parçacığın kimyasal analizi ATR-FT-IR Spektroskopisi (Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50 FT-IR Spektrometresi) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

4.7 Kontaminasyon Kontrolü

Mikroplastiklerin örneklenmesinden analizine kadar gerçekleşen her aşamada, numunelerin ve kullanılan kimyasalların işlem sonrasında hava ile temasına izin verilmemiştir. Laboratuvar malzemeleri, her deney öncesinde distile su ile yıkanmış; deney öncesi ve sonrasında, laboratuvar tezgahı etanol çözeltisi kullanılarak temizlenmiştir. Analiz işlemlerinde kullanılan petri kaplarının kapalı bir şekilde tutulmasına özen gösterilmiş ve laboratuvar çalışması boyunca pamuklu laboratuvar önlüğü ve nitril eldiven kullanılmıştır.

4.8 Yapay Sulakalan Bitkisi *Phragmites Australis*'in Ekstraksiyonu

Tez kapsamında incelenen Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'nde yapay sulakalan bitkisi olan *Phragmites Australis*'in bünyesine mikroplastik alma potansiyelini belirlemek amacıyla deneysel çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla, sulakalan giriş ve çıkış bölgelerinden toplanan *Phragmites Australis* örnekleri; kök, gövde ve sürgün ucu olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Ardından, bu bölümler ayrı ayrı ekstrakte edilerek mikroplastik analizi yapılmıştır. Ekstraksiyon deney prosedürü için Standart Metotlarda bulunan Eriyiş Tayini modifiye edilmiştir (APHA, 2012).

4.8.1 Ön-Hazırlık

- Alikurt Doğal Atıksu Arıtma Tesisi'nin giriş ve arıtılmış su numunelerinin alındığı bölgeden *Phragmites australis* örnekleri toplanmıştır.
- Toplanan numuneler, yüzeysel kaynaklı mikroplastik kontaminasyonunu önlemek ve sadece bitki bünyesinde bulunan mikroplastik konsantrasyonunu belirlemek amacıyla distile su ile yıkanmıştır.
- Yıkanan bitki örnekleri; kök, gövde ve sürgün ucu şeklinde bölümlerine ayrılmıştır.
- Öğütme işlemini kolaylaştırmak amacıyla, numuneler küçük parçalar halinde kesilmiştir.
- Küçük parçalara ayrılan bitki örnekleri bir gece boyunca etüvde 70°C'lik sıcaklıkta kurutulmuştur.
- Bir gece sonunda, örnekler etüvden çıkarılarak desikatöre alınmıştır.
- Ardından, bitki örnekleri öğütülmüş ve eleme işlemi ile devam edilmiştir.
- 5000 µm, 1000 µm ve 500 µm olmak üzere farklı gözenek boyutuna sahip elekler yardımıyla eleme işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Ekstraksiyon işlemini kolaylaştırmak amacıyla, bitki numunelerinden 500 µm'den küçük boyutta olanları bu işlem için tercih edilmiştir.

Ekstraksiyon işlemi öncesi küçük parçalara ayrılan bitki numunesi görseli Şekil 4.10'da verilmiştir.



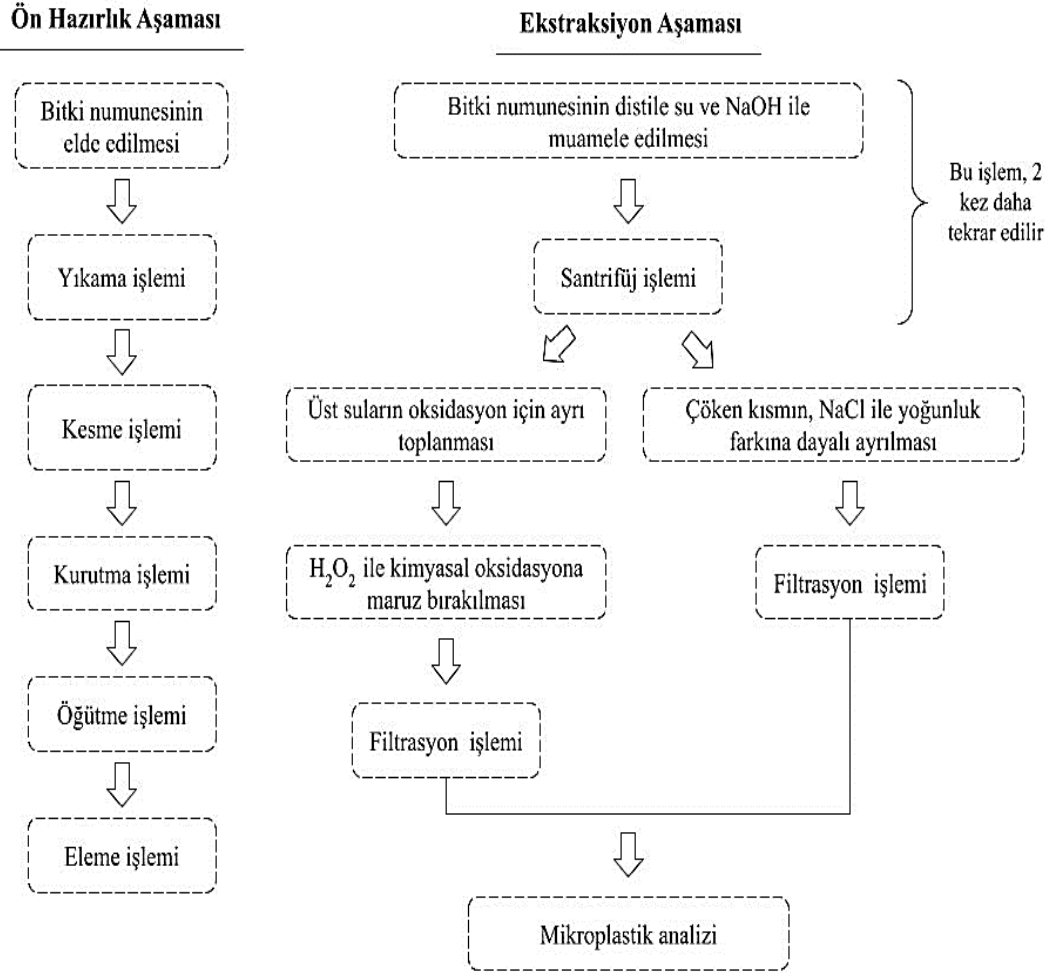
Şekil 4.10: Ekstraksiyon işlemi öncesi küçük parçalara ayrılan bitki numunesi

4.8.2 Ekstraksiyon İşlemi

Ön hazırlık işlemleri tamamlandıktan sonra, ekstraksiyon sürecine geçilmiştir. Giriş ve arıtılmış su bölgelerinden toplanan bitki örneklerinin kök, gövde ve sürgün ucu bölümleri ayrı ayrı ekstrakte edilmiştir. Bu sebeple, giriş numunesinden üç adet ve arıtılmış su numunesinden üç adet olmak üzere, bir deney setinde toplamda altı adet ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11). Mikroplastik analizi aşamasında oluşabilecek deney kaynaklı hata payını minimize etmek amacıyla, deneyler her bir numune için üçer kez tekrarlanmıştır.

- İlk olarak, her bir bitki numunesinden 0,1 gram tartılarak falkon tüpü içerisine aktarılmıştır.
- Ardından, falkon tüpünde bulunan bitki numunesinin üzerine 10 mL saf su ve 5 mL NaOH eklenmiştir.
- Numuneler, su banyosunda 90°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca bekletilmiştir.
- 10 dakikanın sonunda, 4000 rpm'de 15 dakika boyunca santrifüj edilmiştir.
- Santrifüj sonrasında oluşan üst su tabakası ayrı bir erlene aktarılmıştır.
- Çöken kısım ise saf su ve NaOH ile iki kez daha muamele edilmiştir.
- Toplamda, bu işlem üç kez tekrarlanmış ve üç adet üst su elde edilmiştir.
- Toplanan üst su numuneleri, hacimlerinin 1/5'i oranında H₂O₂ ile bir gece boyunca okside edilmiştir.
- Çöken kısım, NaCl ile yoğunluk ayırma işlemine tabi tutulmuştur.

- Üst su ve çöken kısım ayrı ayrı filtre edilerek toplamda iki adet filtre kağıdı eldesi gerçekleştirilmiştir.
- Mikroplastik analizinin yapılması amacıyla, filtre kağıtları stereo mikroskop altında incelenmiştir.



Şekil 4.11: Ekstraksiyon prosedürü akış şeması

5. BULGULAR

5.1 Yaz Dönemi Verileri

5.1.1 Mikroplastik Boyutları

Örnekleme aşamasında seçilen elek boyutlarına bağlı olarak mikroplastiklerin farklı boyut aralıklarında yoğunlaştığı belirlenmiştir (Tablo 5.1). Yaz döneminde alınan numuneler incelendiğinde mikroplastiklerin her bir boyut aralığında farklı oranlarda buldukları tespit edilmiştir.

Yaz döneminde giriş, sediman ve arıtılmış su örneklerinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te özetlenmiştir.

Yaz döneminde tespit edilen numunelerin tümünde, en sık tespit edilen mikroplastik boyutunun 100–500 µm olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Genel olarak, küçük gözenek boyutuna sahip eleklerde daha fazla mikroplastik konsantrasyonu elde edilmiştir. Azalan gözenek boyutuyla birlikte, tespit edilen mikroplastik konsantrasyonunun artış gösterdiği belirlenmiştir.

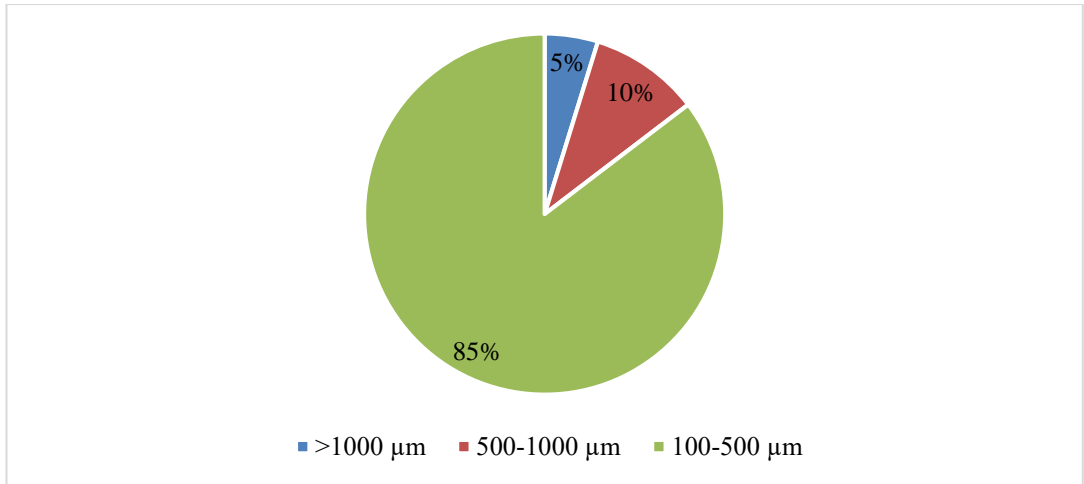
Tablo 5.1: Yaz döneminde farklı boyut aralıklarında tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

Numune		Boyut Analizi			Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	>1000 µm	500–1000 µm	100–500 µm	
Giriş	Haziran	39	120	1627	3572
	Temmuz	62	94	642	1596
	Ağustos	80	160	969	2418
Arıtılmış Su	Haziran	43	55	183	281
	Temmuz	43	78	230	351
	Ağustos	21	47	119	187
Sediman	Haziran	74	193	912	23580
	Temmuz	112	149	819	21600
	Ağustos	98	94	1620	36240

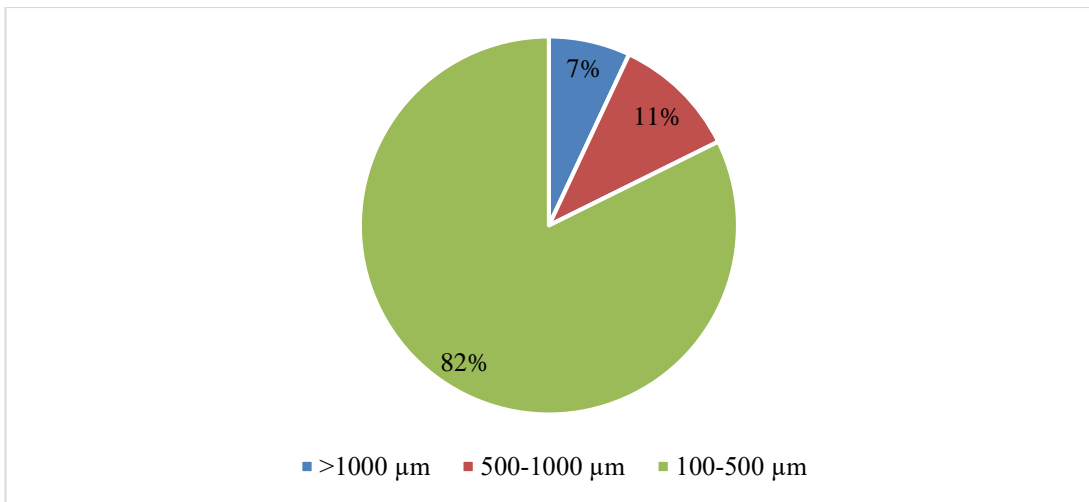
Giriş numunesinde 100–500 µm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %85 iken 500-1000 µm boyut aralığında bu oran %10 ve 1000 µm’den büyük mikroplastik oranı %5 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.1).

Sediman numunesinde 100–500 µm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %82 iken 500-1000 µm boyut aralığındaki oran %11 ve 1000 µm’den büyük mikroplastik oranı %7 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.2).

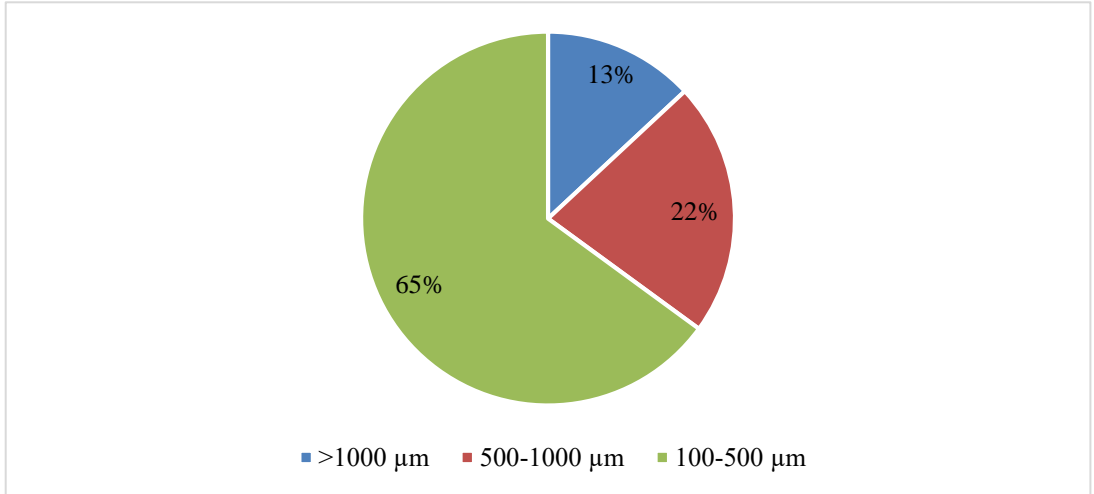
Artılmış su numunesinde 100–500 µm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %65 iken 500-1000 µm boyut aralığında oran %22 ve 1000 µm’den büyük mikroplastik oranı %13 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.1: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.2: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.3: Yaz döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı

5.1.2 Mikroplastik Renkleri

Renk analizi, mikroplastiklerin morfolojik olarak tanımlanması aşamasında incelenen bir diğer özelliktir. Yaz döneminde, farklı bölgelerden alınan giriş atıksu ve sediman numunelerinde tespit edilen renkler; siyah-kahverengi, şeffaf-beyaz, mavi, pembe ve sarı-yeşil olarak gruplandırılmıştır. Yaz döneminde alınan numunelerin tümünde en çok şeffaf-beyaz renkteki mikroplastiklerin varlığı ile karşılaşılmıştır. Şeffaf-beyaz rengi takip eden renk ise mavidir (Tablo 5.2).

Giriş numunesinde şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %82 iken mavi pembe, siyah, ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı sırasıyla %12, %3, %2, ve %1 şeklinde belirlenmiştir (Şekil 5.4).

Sediman numunesinde şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %67 iken mavi pembe, siyah, ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı sırasıyla %23, %6, %3, ve %1 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.5).

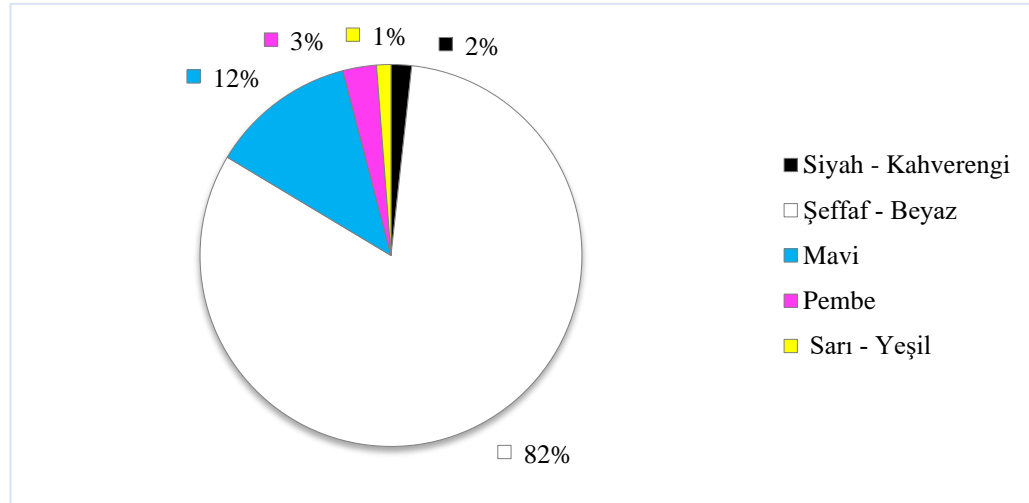
Arıtılmış su numunesinde şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %54 iken mavi pembe, siyah, ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı sırasıyla %30, %7, %5, ve %4 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.6).

Yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı incelendiğinde şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %72 iken mavi pembe, siyah, ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı sırasıyla %19, %7, %5, ve %4 şeklinde belirlenmiştir (Şekil 5.7).

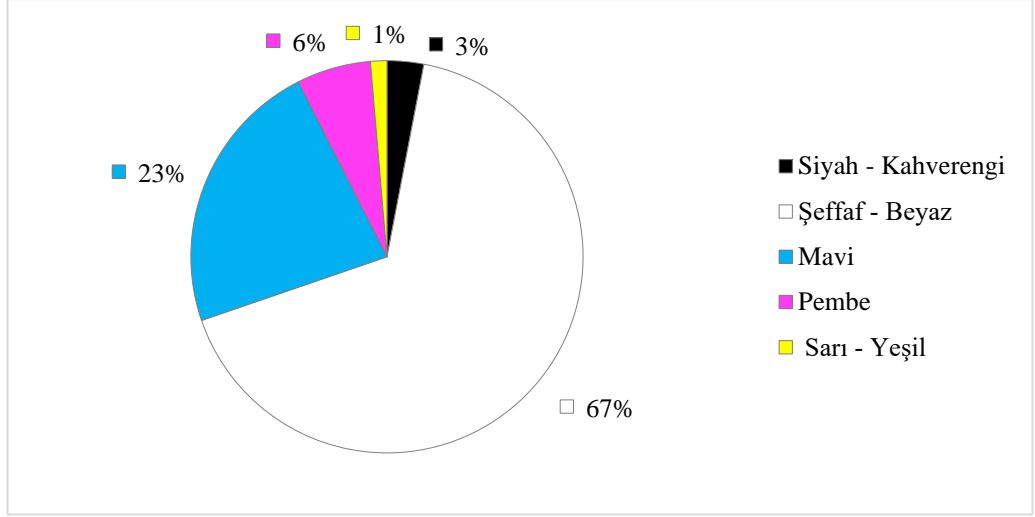
Tablo 5.2: Yaz döneminde farklı renklerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

Numune		Renk Analizi (adet)					Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	Siyah - Kahverengi	Şeffaf - Beyaz	Mavi	Pembe	Sarı - Yeşil	
Giriş	Haziran	10	1582	147	39	8	3572
	Temmuz	19	575	157	29	18	1596
	Ağustos	37	948	164	40	20	2418
Arıtılmış Su	Haziran	8	145	99	16	13	281
	Temmuz	38	200	101	10	2	351
	Ağustos	13	99	43	13	19	187
Sediman	Haziran	42	782	255	91	9	23580
	Temmuz	39	627	322	78	14	21600
	Ağustos	42	1307	351	80	32	36240

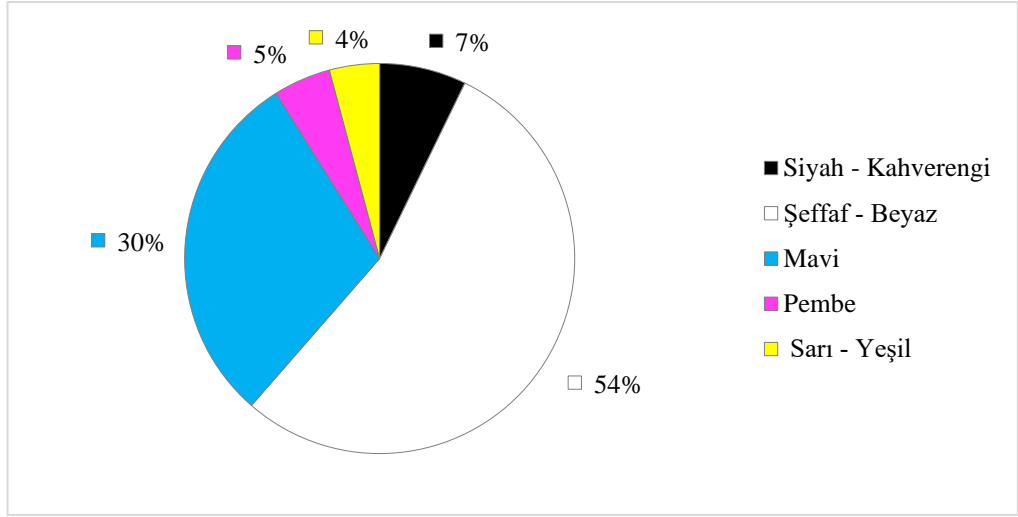
Renk dağılımına bağlı olarak elde edilen sonuçlar, renk dağılımının her bir numunede uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.



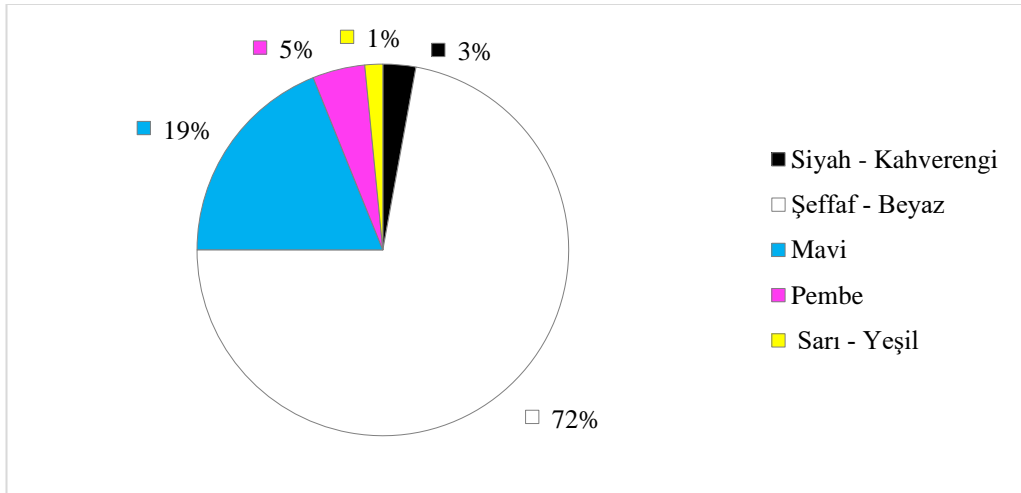
Şekil 5.4: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı renklerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.5: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



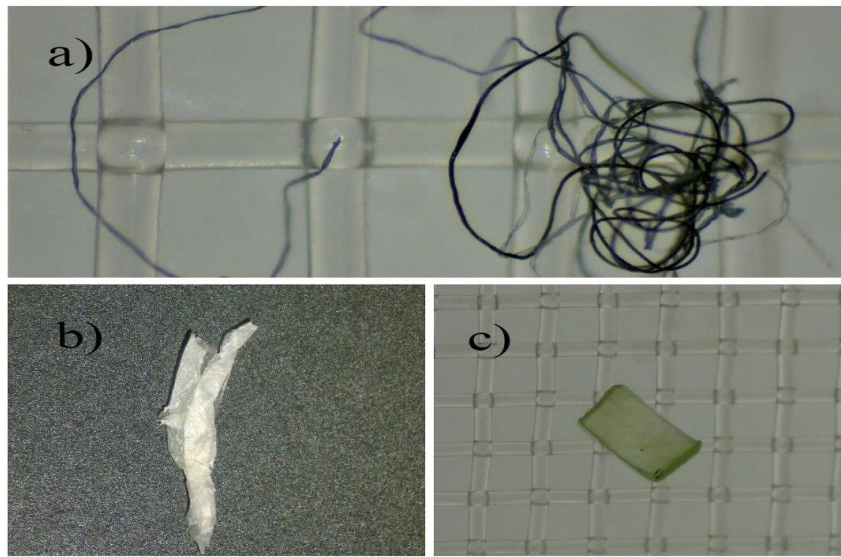
Şekil 5.6: Yaz döneminde artırılmış su numunesinde tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.7: Yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı

5.1.3 Mikroplastik Şekilleri

Yaz döneminde tespiti gerçekleştirilen mikroplastikler, sahip oldukları şekil sınıfına göre film, lif ve parça olarak gruplandırılmıştır (Şekil 5.8, Şekil 5.12). Yaz döneminde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin büyük çoğunluğunu oluşturan şekil sınıfının lif olduğu belirlenmiştir (Tablo 5.3). Lifi sırayla, film ve parça şekilli mikroplastikler takip etmiştir. Parça şekli, tüm numunelerde en az oranda tespit edilen mikroplastik şekli olmuştur. Bir başka mikroplastik şekli olan mikroboncuk ise hiçbir numunede tespit edilmemiştir.



Şekil 5.8: Numunelerde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastikler (a:lif, b:film, c: parça)

Tablo 5.3'te yaz döneminde giriş, sediman ve arıtılmış su örneklerinde farklı şekillerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonları adet/L olarak özetlenmiştir. Her üç numunede de en çok görülen mikroplastik türü lif şeklindeki mikroplastiklerdir. Bu şekli film ve parça şekilli mikroplastikler takip etmiştir.

Giriş numunesindeki mikroplastik şekilleri yüzdeler oranda incelendiğinde; lif şeklindeki mikroplastiklerin oranı %77,91 iken film ve parça şeklindeki mikroplastiklerin oranı sırasıyla %21,83 ve %0,26 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.9).

Sediman numunesindeki mikroplastik şekilleri yüzdeler oranda incelendiğinde; lif şeklindeki mikroplastiklerin oranı %85,04 iken film ve parça

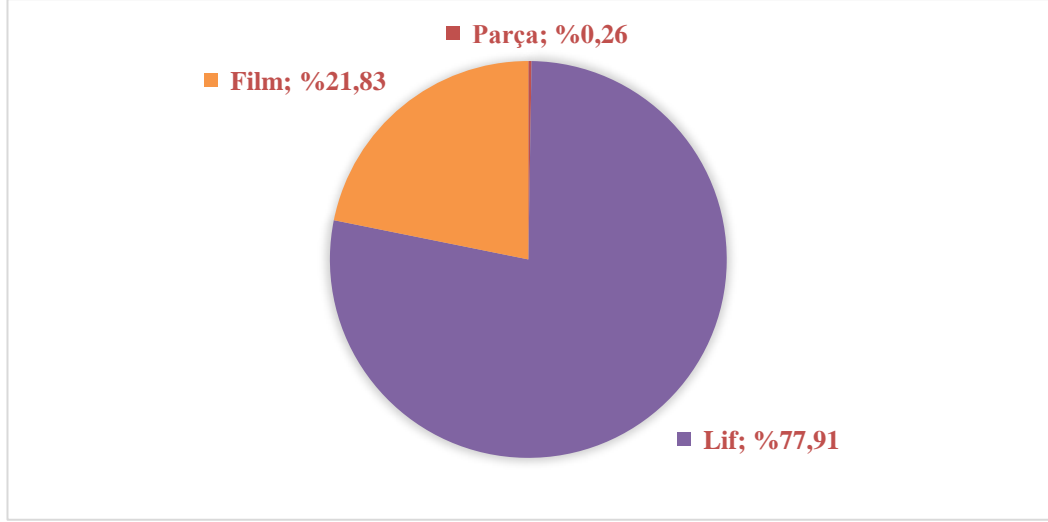
şeklindeki mikroplastiklerin oranı sırasıyla %14,49 ve %0,47 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.10).

Aritılmış su numunesinde lif şeklindeki mikroplastiklerin oranı %90,72 iken film ve parça şeklindeki mikroplastiklerin oranı sırasıyla %8,18 ve %1,10 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.11).

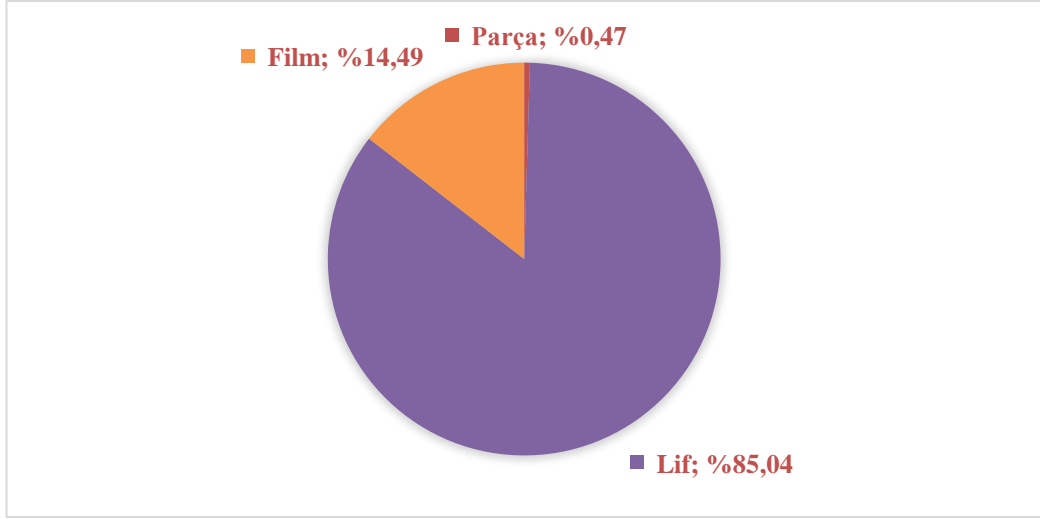
Şekil 5.12’de yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin genel dağılımı verilmiştir. Dağılım, en çok gözlenen mikroplastik türünün film şekli, en az gözlenen mikroplastik türünün parça şekli olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3: Yaz döneminde farklı şekillerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

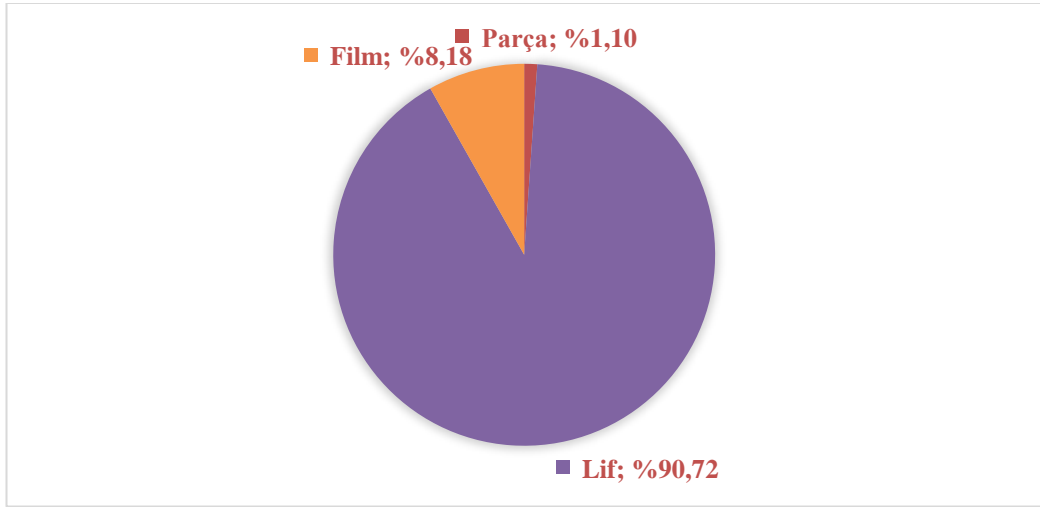
Numune		Şekil Analizi (adet)			Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	Parça	Lif	Film	
Giriş	Haziran	7	1414	365	3572
	Temmuz	0	625	173	1596
	Ağustos	3	916	290	2418
Aritılmış Su	Haziran	1	254	26	281
	Temmuz	1	329	21	351
	Ağustos	7	160	20	187
Sediman	Haziran	6	1004	169	23580
	Temmuz	6	917	157	21600
	Ağustos	7	1541	264	36240



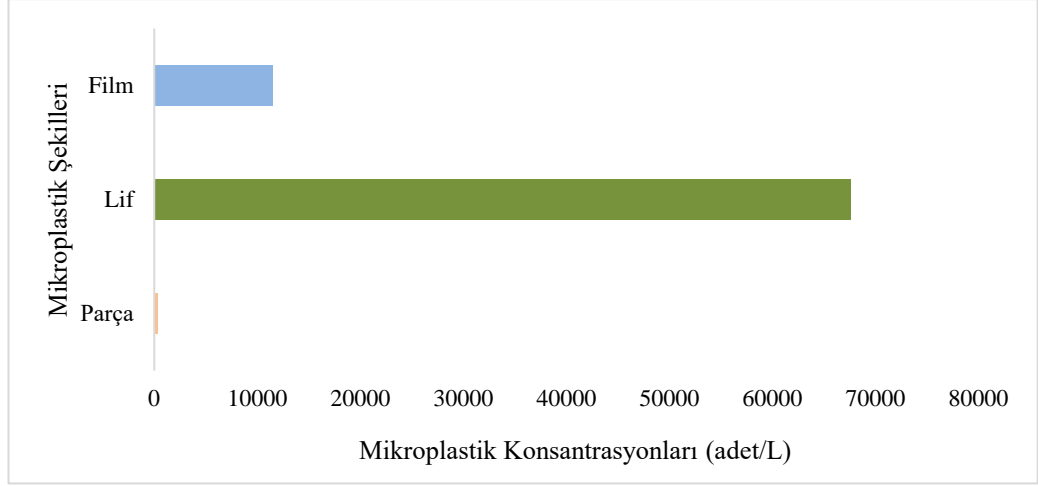
Şekil 5.9: Yaz döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.10: Yaz döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.11: Yaz döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.12: Yaz döneminde toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikropplastiklerin genel dağılımı

5.1.4 Mikropplastik Giderim Verimleri

Üç aylık dönemde, iki haftalık periyotlarla alınan giriş ve çıkış numunelerinin ortalama mikropplastik konsantrasyonları dikkate alınarak MP giderme verimleri hesaplanmıştır; elde edilen sonuçlar Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te özetlenmiştir.

Yaz döneminde mikropplastik giderim verimleri sırasıyla; Haziran ayında %91,65 Temmuz ayında %78,38 ve Ağustos ayında %92,26 olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.4). Yaz döneminde elde edilen toplam mikropplastik giderim verimi ise %87,43 şeklinde rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar yatay yüzeyaltı akışlı sulakalan sisteminin mikropplastik gideriminde etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 5.4: Yaz dönemi mikropplastik konsantrasyonları ve giderim verimleri

Dönem	Mikropplastik Konsantrasyonu, (adet MP/L)		Mikropplastik Giderme Verimi, %
	Giriş	Arıtılmış Su	
Haziran	1786	140,5	91,65
Temmuz	798	175,5	78,38
Ağustos	1209	93,5	92,26

Tablo 5.4 incelendiğinde, Temmuz ayı mikropplastik giderme veriminin Haziran ve Ağustos aylarına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Temmuz ayında alınan numunelerde giriş KOİ, AKM ve mikropplastik konsantrasyonlarının

diğer aylara oranla çok düşük olduğu ve düşük giderme verimlerinin buna bağlı olarak elde edildiği düşünölmektedir.

Tablo 5.5: Yaz döneminde haftalık, aylık ve dönemlik olarak elde edilen mikroplastik giderim verimleri

Mikroplastik Giderim Verimleri (%)			
Tarih	Haftalık	Aylık	Dönemlik
Haziran	93,32	91,65	87,43
	89,97		
Temmuz	80,16	78,38	
	76,6		
Ağustos	92,3	92,26	
	92,22		

5.2 Kış Dönemi Verileri

5.2.1 Mikroplastik Boyutları

Kış döneminde farklı boyut aralıklarında tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonları Tablo 5.6'da özetlenmiştir. Yaz mevsimine benzer şekilde kış mevsiminde de en küçük gözenek boyutunda en fazla, en büyük gözenek boyutunda ise en az konsantrasyonda mikroplastik rapor edilmiştir.

Kış döneminde giriş, sediman ve arıtılmış su örneklerinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı sırasıyla Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de özetlenmiştir. Şekil 5.16'da ise kış döneminde toplamda tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı verilmiştir.

Giriş numunesinde 100–500 μm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %94 iken 500-1000 μm boyut aralığında oran %4 ve 1000 μm 'den büyük mikroplastik oranı %2 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.13).

Sediman numunesinde 100–500 μm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %89 iken 500-1000 μm boyut aralığında oran %7 ve 1000 μm 'den büyük mikroplastik oranı %4 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.14).

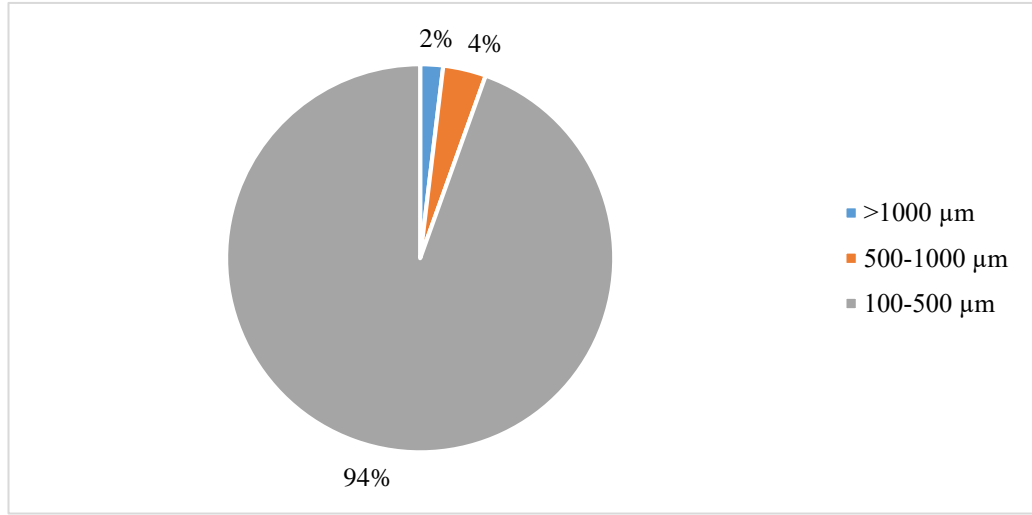
Arıtılmış su numunesinde 100–500 μm boyut aralığındaki mikroplastik oranı %63 iken 500-1000 μm boyut aralığında oran %24 ve 1000 μm 'den büyük mikroplastik oranı %13 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.15).

Yaz ve kış dönemlerinde boyut dağılımı incelendiğinde, her iki mevsimde de atıksu, sediman ve arıtılmış su numuneleri için sonuçların uyum içerisinde olduğu; boyut dağılımının mevsimsel olarak değişiklik göstermediği belirlenmiştir.

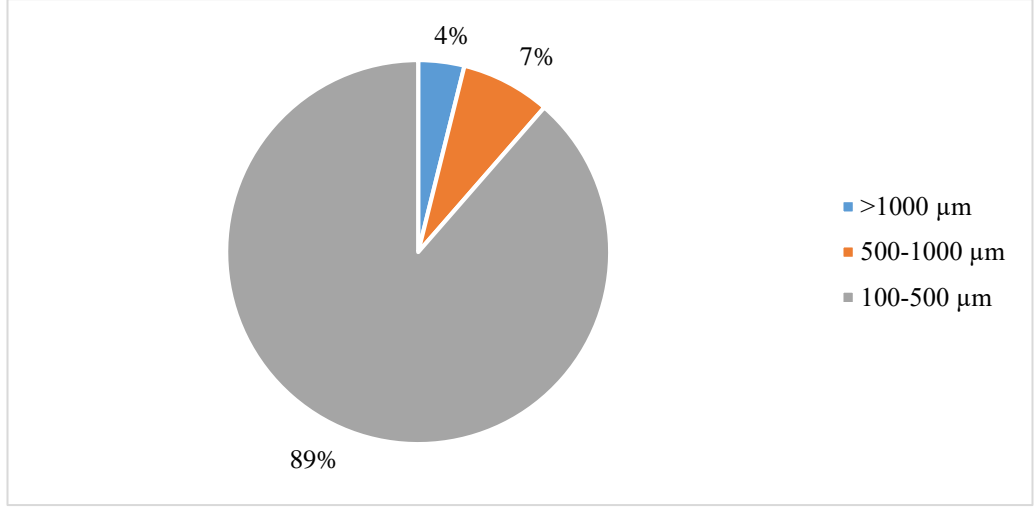
Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı; 100–500 μm boyut aralığı için %92 iken 500-1000 μm boyut aralığı için %5 ve 1000 μm 'den büyük boyut için %3 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.6: Kış döneminde farklı boyut aralıklarında tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

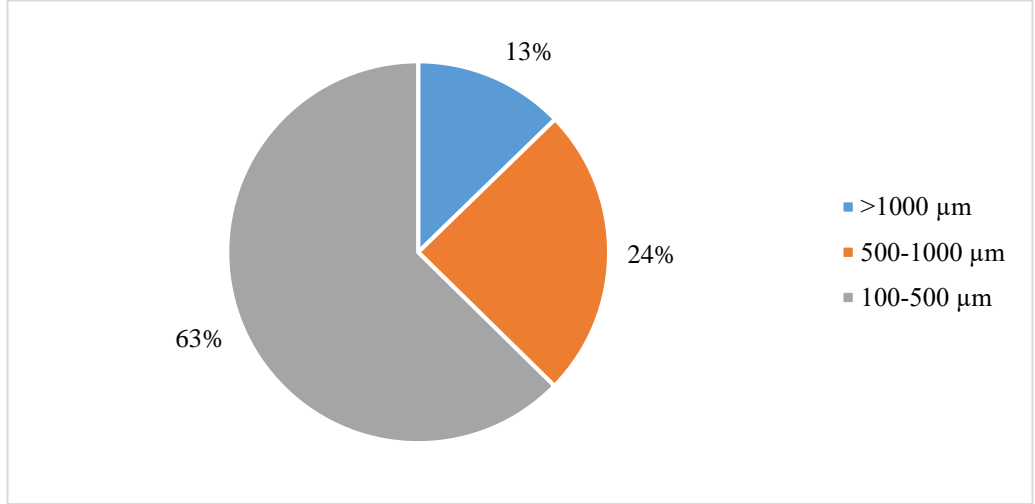
Numune		Boyut Analizi (adet)			Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	>1000 μm	500–1000 μm	100–500 μm	
Giriş	Aralık	248	312	6429	13978
	Ocak	182	482	11887	25102
	Şubat	204	396	13120	27440
Arıtılmış Su	Aralık	91	158	197	446
	Ocak	73	108	576	757
	Şubat	59	165	324	548
Sediman	Aralık	58	122	1537	34340
	Ocak	93	116	1516	34500
	Şubat	54	160	1627	36820



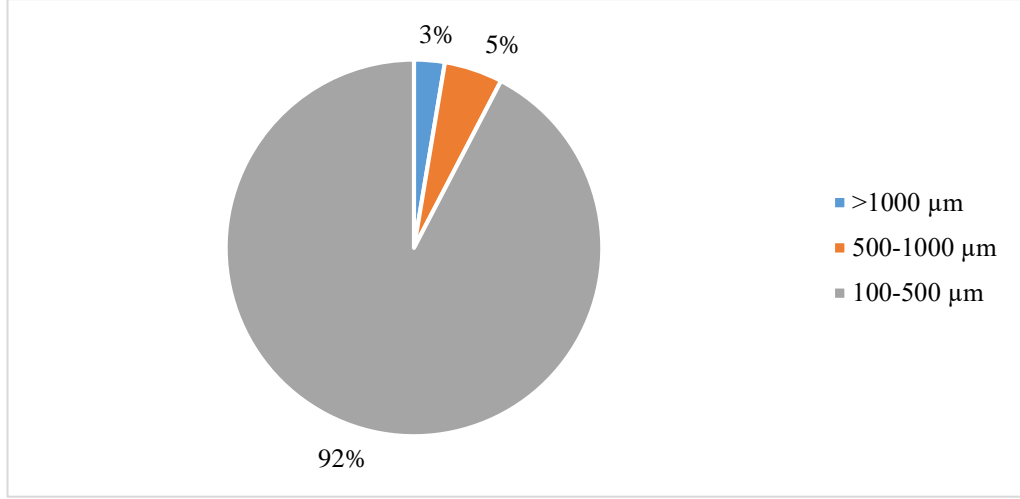
Şekil 5.13: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdeler dağılımı



Şekil 5.14: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.15: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.16: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı boyut aralıklarındaki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı

5.2.2 Mikroplastik Renkleri

Kış döneminde, farklı bölgelerden alınan giriş atıksuyu ve sediman numunelerinde tespit edilen renkler; siyah-kahverengi, şeffaf-beyaz, mavi, pembe ve sarı-yeşil olarak gruplandırılmıştır. Farklı renklerde tespit edilen mikroplastiklerin görselleri Şekil 5.17’de verilmiştir.

Kış döneminde alınan numunelerin tümünde en çok şeffaf-beyaz renkteki mikroplastiklerin varlığı ile karşılaşılmıştır. (Tablo 5.7).

Kış dönemi sürecinde toplamda şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %88 iken, siyah-kahverengi ve mavi renkteki mikroplastiklerin oranı %5, pembe ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı ise %1 olarak belirlenmiştir (Şekil 5.18).

Giriş numunesinde şeffaf-beyaz mikroplastiklerin oranı %90, siyah-kahverengi renkteki mikroplastiklerin oranı %5, mavi renkteki mikroplastiklerin oranı %3, pembe ve sarı-yeşil mikroplastiklerin oranı ise %1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.19).

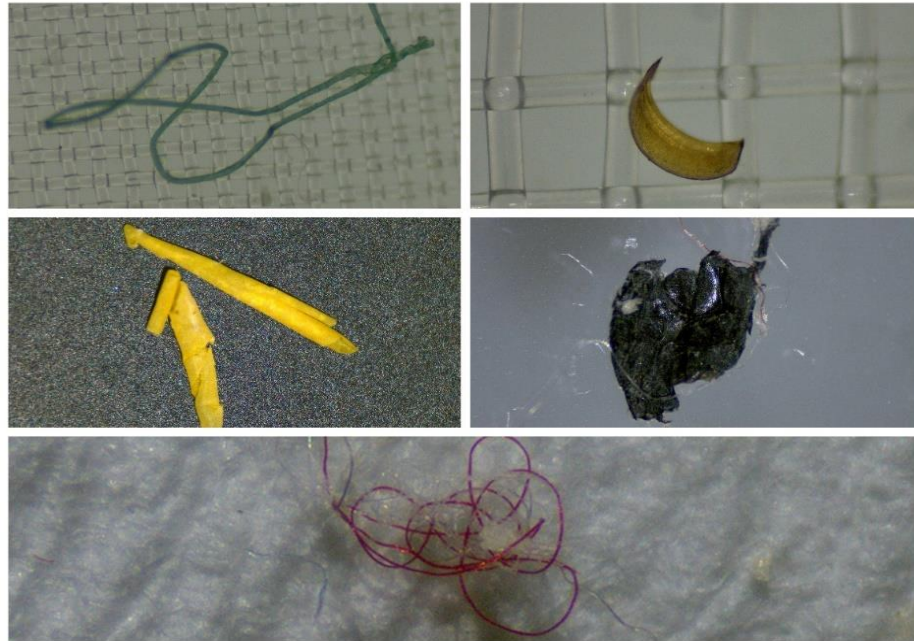
Sediman numunesinde; şeffaf-beyaz (%83) > mavi (%8) > siyah-kahverengi (%6) > pembe (%2) > sarı-yeşil (%1) şeklinde renk dağılımı gerçekleşmiştir (Şekil 5.20).

Arıtılmış su numunesinde ise, şeffaf-beyaz (%62) > mavi (%27) > siyah-kahverengi (%6) > pembe (%3) > sarı-yeşil (%2) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.21).

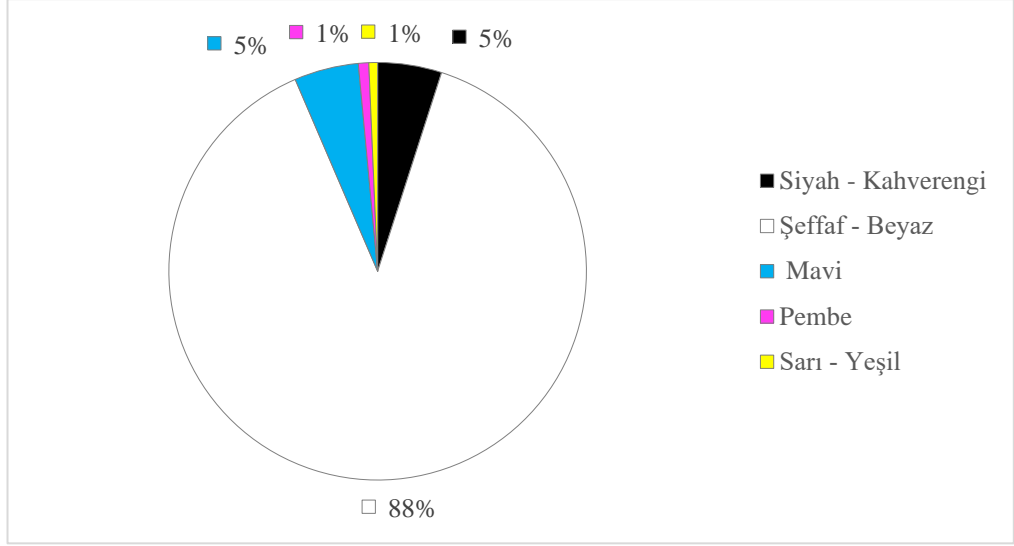
Yaz ve kış döneminde elde edilen renk dağılımları incelendiğinde her iki mevsimde de en çok şeffaf-beyaz renkteki mikroplastiklerin yüksek oranı ile karşılaşılmış, ikinci yüksek oranı yaz döneminde kahverengi-siyah, kış döneminde ise mavi renkteki mikroplastikler oluşturmuştur. Mikroplastik renkleri bu açıdan mevsimsel olarak değişiklik göstermiştir.

Tablo 5.7: Kış döneminde farklı renklerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

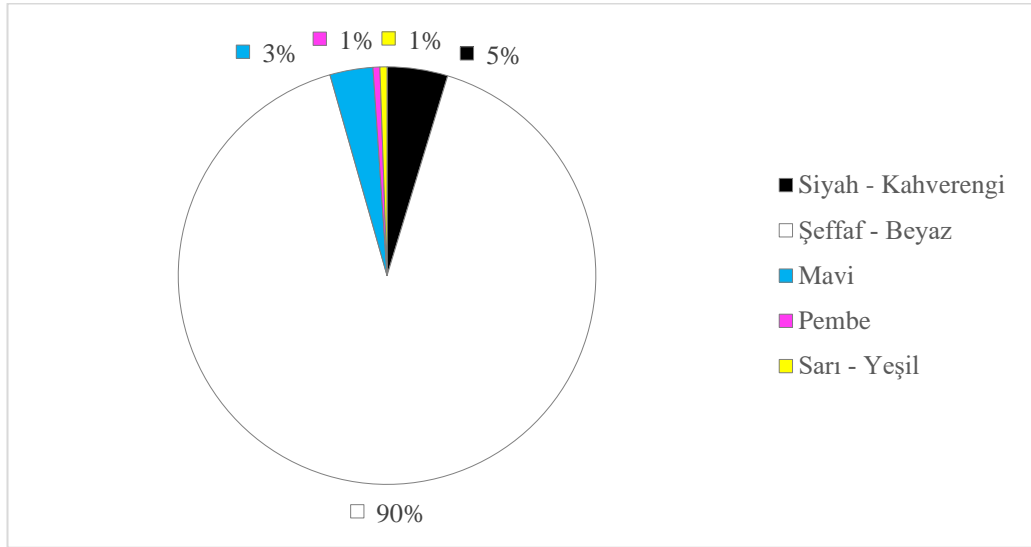
Numune		Renk Analizi (adet)					Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	Siyah - Kahverengi	Şeffaf - Beyaz	Mavi	Pembe	Sarı - Yeşil	
Giriş	Aralık	361	6311	205	45	67	13978
	Ocak	792	11063	559	61	76	25102
	Şubat	408	12858	345	70	39	27440
Arıtılmış Su	Aralık	40	300	79	11	16	446
	Ocak	35	518	176	20	8	757
	Şubat	38	276	209	19	6	548
Sediman	Aralık	189	1346	116	26	40	34340
	Ocak	64	1504	121	23	13	34500
	Şubat	71	1517	197	48	8	36820



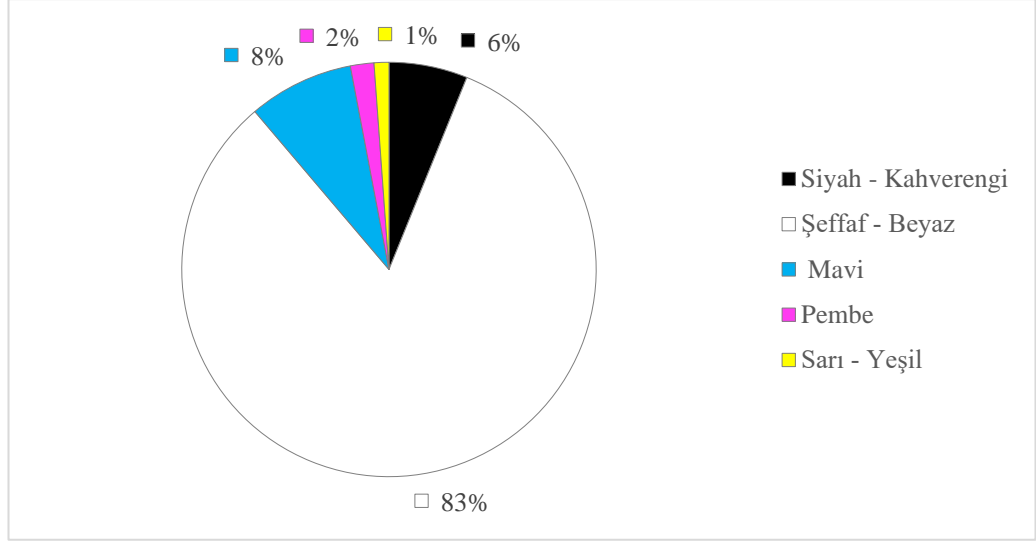
Şekil 5.17: Farklı renklerde tespit edilen mikroplastikler



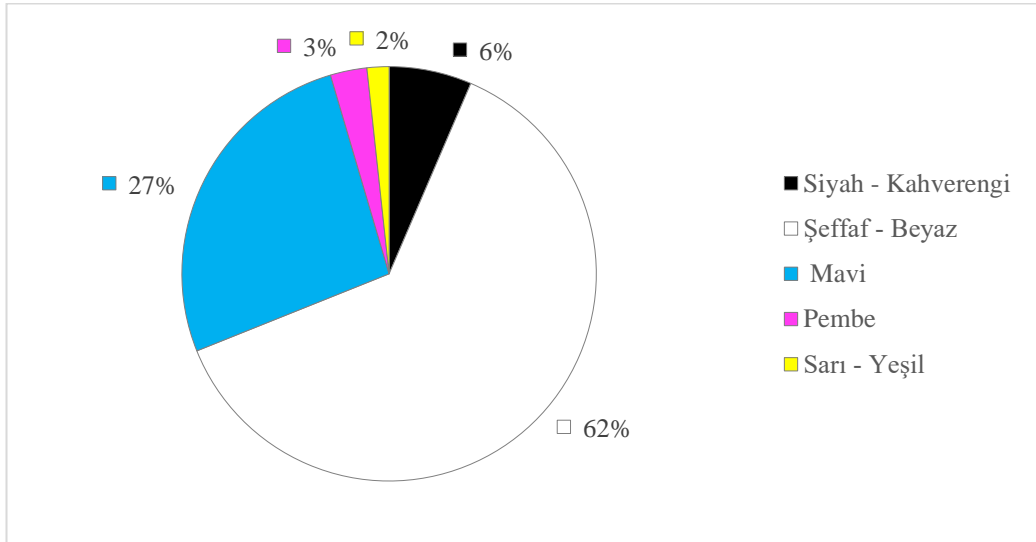
Şekil 5.18: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.19: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.20: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı



Şekil 5.21: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı renlerdeki mikroplastiklerin yüzdelik dağılımı

5.2.3 Mikroplastik Şekilleri

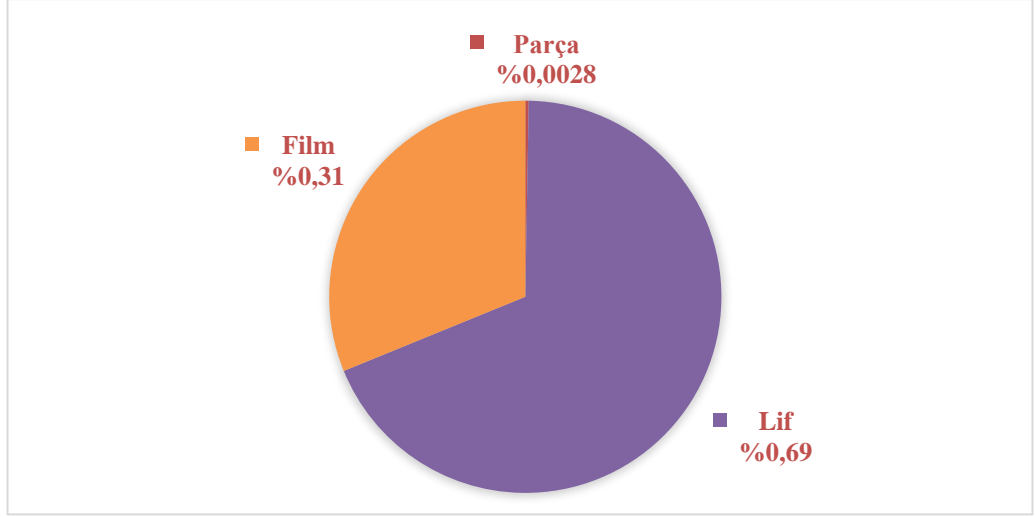
Şekillerine göre mikroplastikler yaz dönemi ile benzer şekilde; film, lif ve parça şeklinde sınıflandırılmışlardır (Tablo 5.8). Bu dönemde de mikroboncuk şekline rastlanmamıştır. Toplamda tespit edilen mikroplastik şekilleri; lif > film > parça şeklinde sıralanmıştır (Şekil 5.25).

Giriş numunesinde parça şeklinin yüzdeler bazda çok az bir konsantrasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Giriş numunesindeki mikroplastik şekilleri; lif (%69) > film (%31) > parça (%0,28) olarak ifade edilmiştir (Şekil 5.22). Sediman numunesi incelendiğinde ise; lif (%61) > film (%37) > parça (%2) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.23). Arıtılmış su numunesi ise; lif (%73) > film (%26) > parça (%1) bir dağılıma sahiptir (Şekil 5.24).

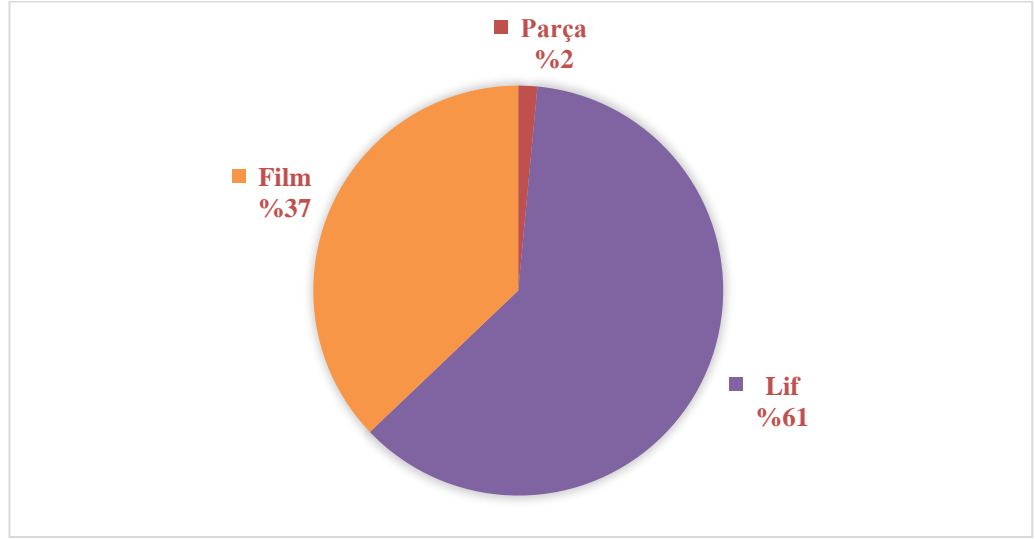
Yaz ve kış dönemi için toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin genel dağılımı incelendiğinde, mevsimsel olarak değişim gözlenmediği belirlenmiştir.

Tablo 5.8: Kış döneminde farklı şekillerde tespit edilen mikroplastiklerin konsantrasyonu

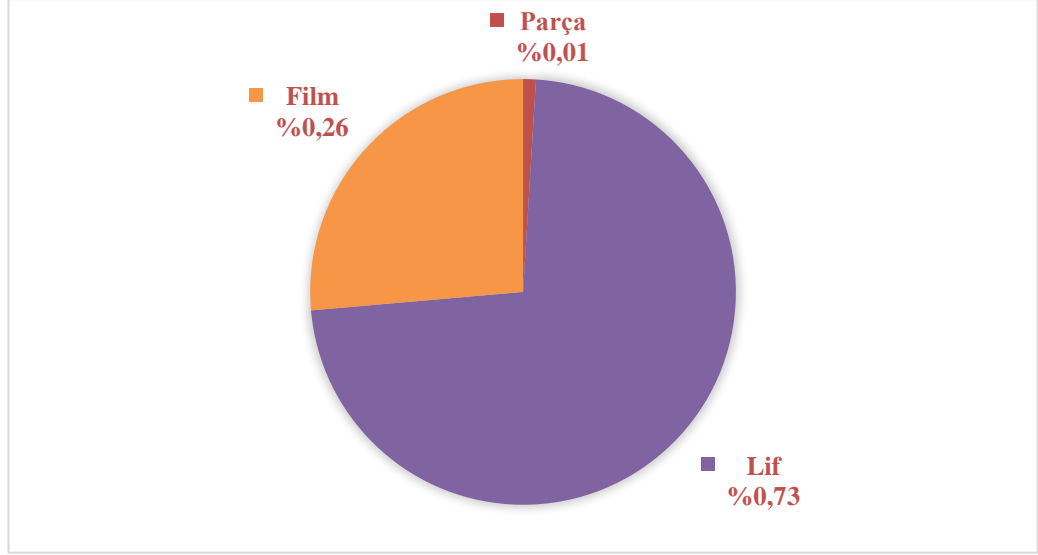
Numune		Şekil Analizi (adet)			Toplam (adet/L)
Adı	Tarihi	Parça	Lif	Film	
Giriş	Aralık	30	2569	4390	13978
	Ocak	38	8931	3582	25102
	Şubat	25	11300	2395	27440
Arıtılmış Su	Aralık	4	277	165	446
	Ocak	7	506	244	757
	Şubat	6	489	53	548
Sediman	Aralık	6	822	889	34340
	Ocak	6	1081	638	34500
	Şubat	67	1340	434	36820



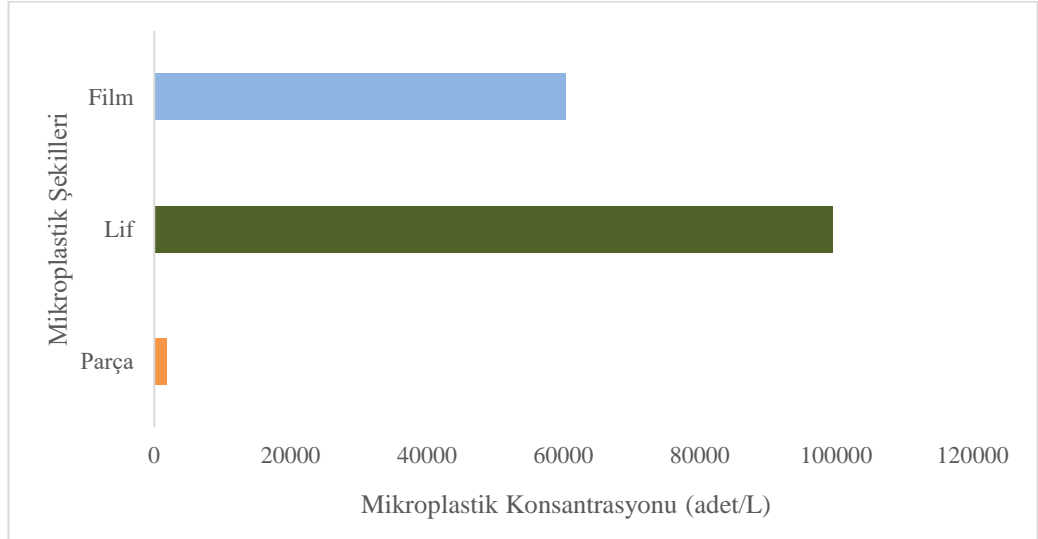
Şekil 5.22: Kış döneminde giriş numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelerik dağılımı



Şekil 5.23: Kış döneminde sediman numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdelerik dağılımı



Şekil 5.24: Kış döneminde arıtılmış su numunesinde tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin yüzdeleri dağılımı



Şekil 5.25: Kış döneminde toplamda tespit edilen farklı şekillerdeki mikroplastiklerin genel dağılımı

5.2.4 Mikroplastik Giderim Verimleri

Kış döneminde mikroplastik giderim verimleri sırasıyla; Aralık ayında %96,72 Ocak ayında %97,02 ve Şubat ayında %98,06 olarak hesaplanmıştır (Tablo 5.9, Tablo 5.10). Kış döneminde elde edilen toplam mikroplastik giderim verimi ise %97,27 şeklinde rapor edilmiştir. Yatay yüzeyaltı akışlı sulakalan sisteminin çok yüksek oranda mikroplastik giderimi sağladığı belirlenmiştir.

Tablo 5.9: Kış dönemi mikroplastik konsantrasyonları ve giderim verimleri

Dönem	Mikroplastik Konsantrasyonu, (adet MP/L)		Mikroplastik Giderme Verimi, %
	Giriş	Arıtılmış Su	
Aralık	6989	223	96,72
Ocak	12551	378,5	97,02
Şubat	13720	274	98,06

Tablo 5.10: Kış döneminde elde edilen mikroplastik giderim verimleri

Mikroplastik Giderim Verimleri (%)			
Tarih	Haftalık	Aylık	Dönemlik
Aralık	96,32	96,72	97,27
	97,13		
Ocak	96,68	97,02	
	97,36		
Şubat	97,84	98,06	
	98,28		

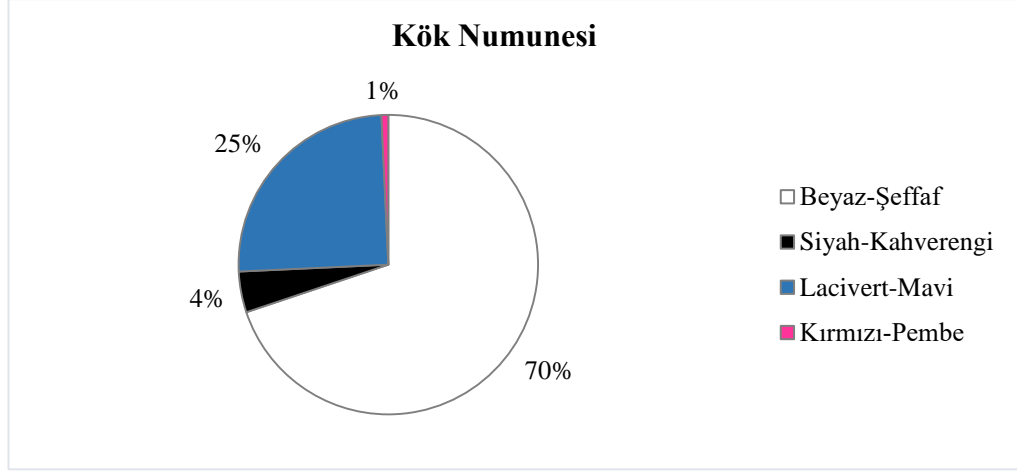
5.3 *Phragmites Australis* Bitkisi Mikroplastik İçeriği

5.3.1 *Phragmites Australis* Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastiklerin Renk Dağılımı

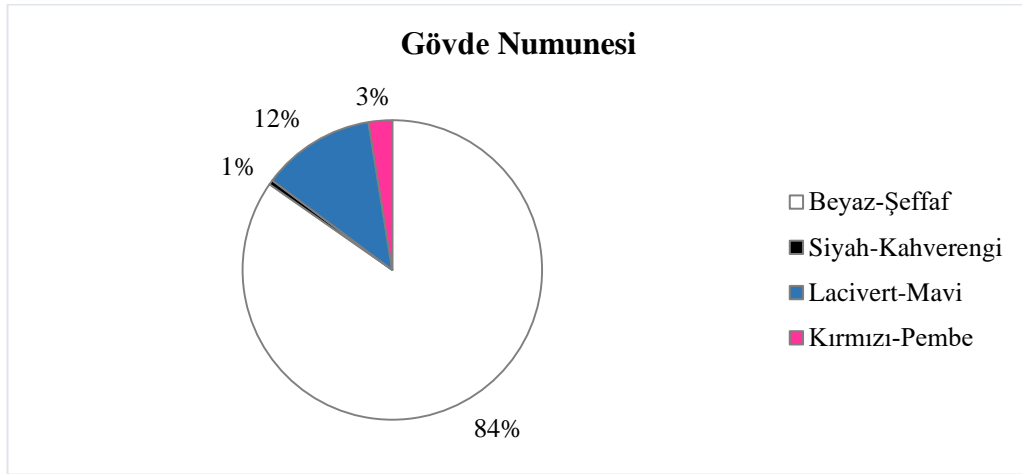
5.3.1.1 YSA Giriş Bölgesinden Alınan *Phragmites Australis* Bünyesinde Mikroplastik Renk Dağılımı

Alikurt YSA sisteminin giriş ve arıtılmış su bölgelerinden alınan *Phragmites australis* bitkisinin kök, gövde ve sürgün ucu bölümleri mikroplastik içeriği açısından incelenmiştir. Giriş numunesinde tespit edilen mikroplastiklerin renk skalası incelendiğinde; beyaz-şeffaf (%78) > lacivert-mavi (%18) > kırmızı-pembe=siyah-kahverengi (%2) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.29). Bitki bölümleri ayrı ayrı incelendiğinde ise kök; beyaz-şeffaf (%70) > lacivert-mavi (%25) > siyah-kahverengi (%4) > kırmızı-pembe (%1), gövde; beyaz-şeffaf (%84) > lacivert-mavi (%12) >

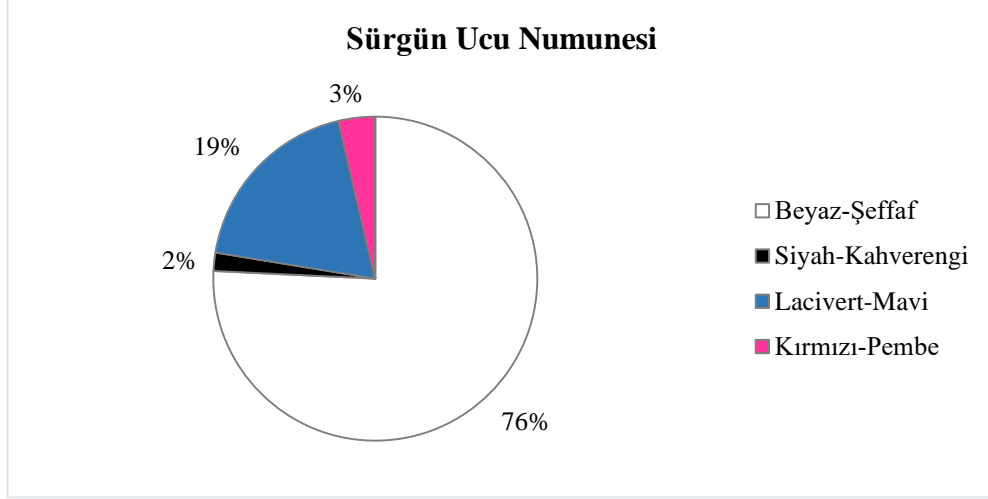
kırmızı-pembe (%3) > siyah-kahverengi (%1), sürgün ucu; beyaz-şeffaf (%76) > lacivert-mavi (%19) > kırmızı-pembe (%3) > siyah-kahverengi (%2) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28).



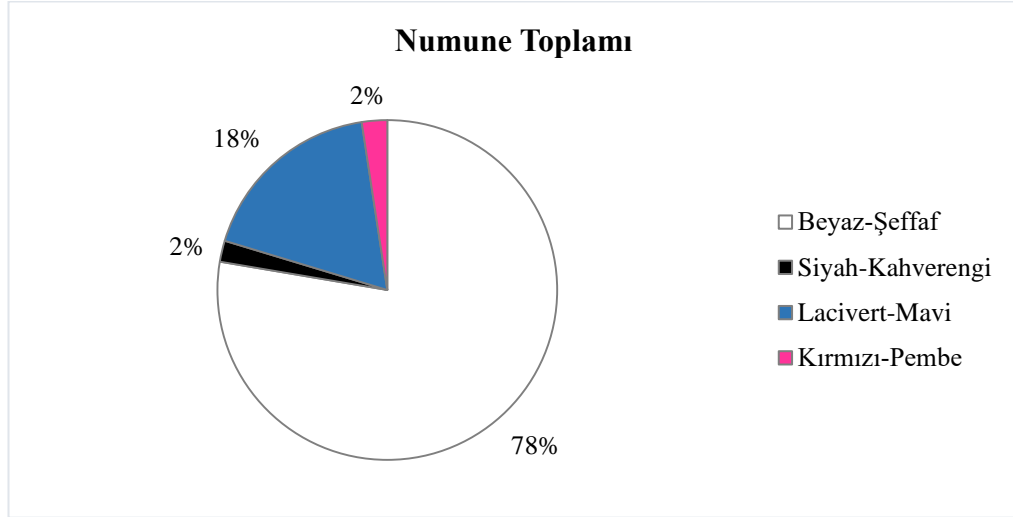
Şekil 5.26: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı



Şekil 5.27: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı



Şekil 5.28: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı

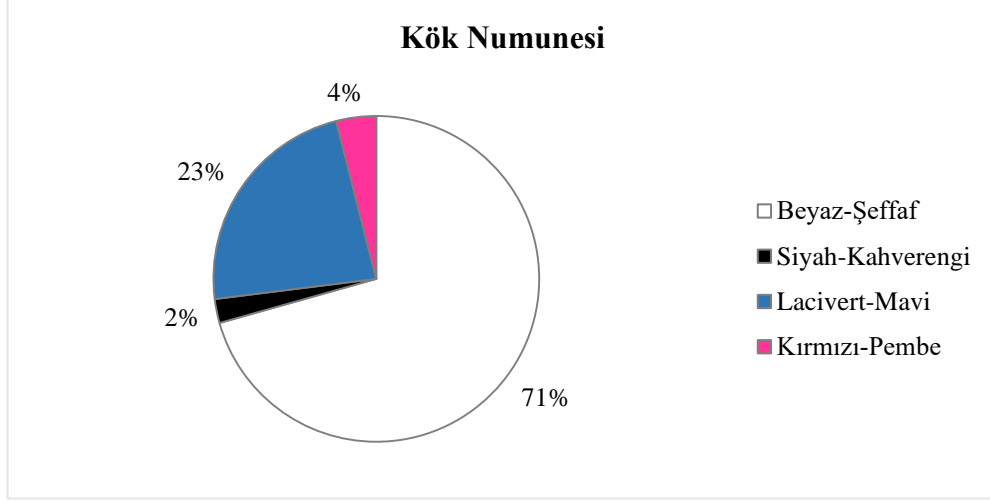


Şekil 5.29: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı

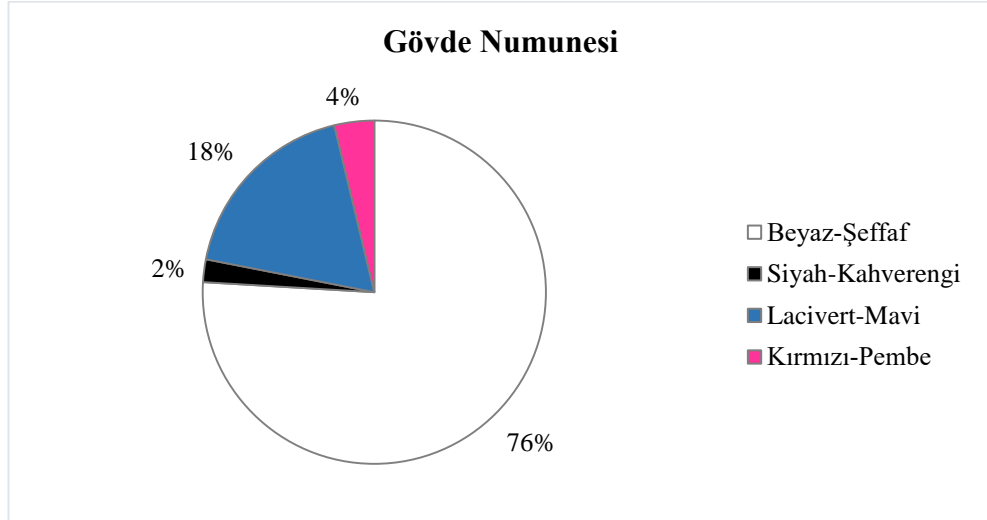
5.3.1.2 YSA Arıtılmış Su Bölgesinden Alınan *Phragmites Australis* Bünyesinde Mikroplastik Renk Dağılımı

Arıtılmış su numunesinde tespit edilen mikroplastiklerin renk skalası incelendiğinde; beyaz-şeffaf (%76) > lacivert-mavi (%20) > kırmızı-pembe (%3) > siyah-kahverengi (%1) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.33). Bitki bölümleri ayrı ayrı incelendiğinde ise kök; beyaz-şeffaf (%71) > lacivert-mavi (%23) > kırmızı-pembe (%4) > siyah-kahverengi (%2), gövde; beyaz-şeffaf (%76) > lacivert-mavi (%18) >

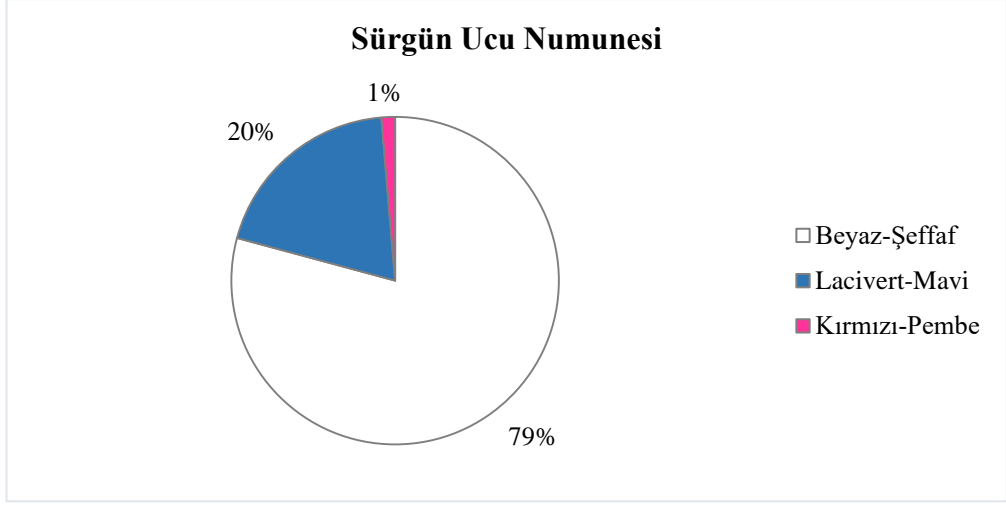
kırmızı-pembe (%4) > siyah-kahverengi (%2), sürgün ucu; beyaz-şeffaf (%79) > lacivert-mavi (%20) > kırmızı-pembe (%1) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32). Sürgün ucu numunesinde siyah renkli mikroplastik varlığına rastlanmamıştır.



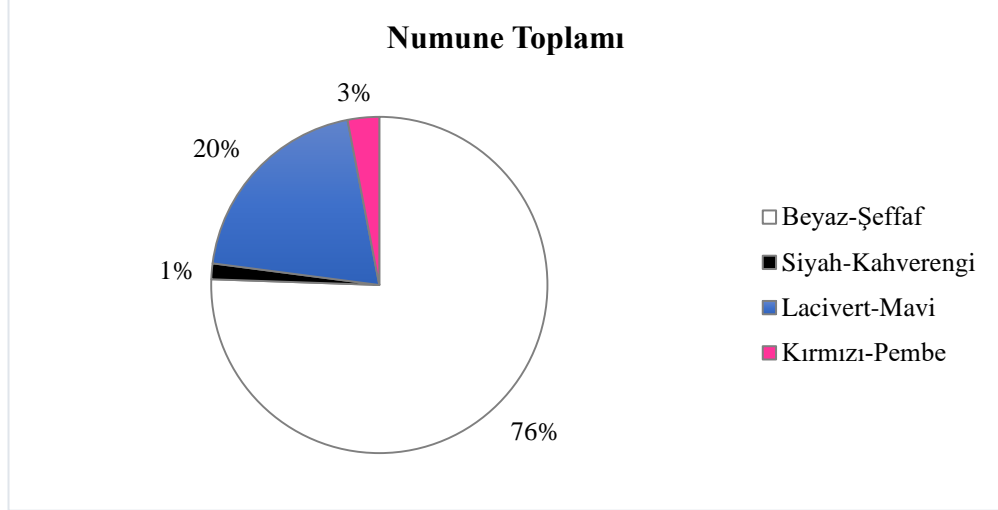
Şekil 5.30: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı



Şekil 5.31: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı



Şekil 5.32: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı



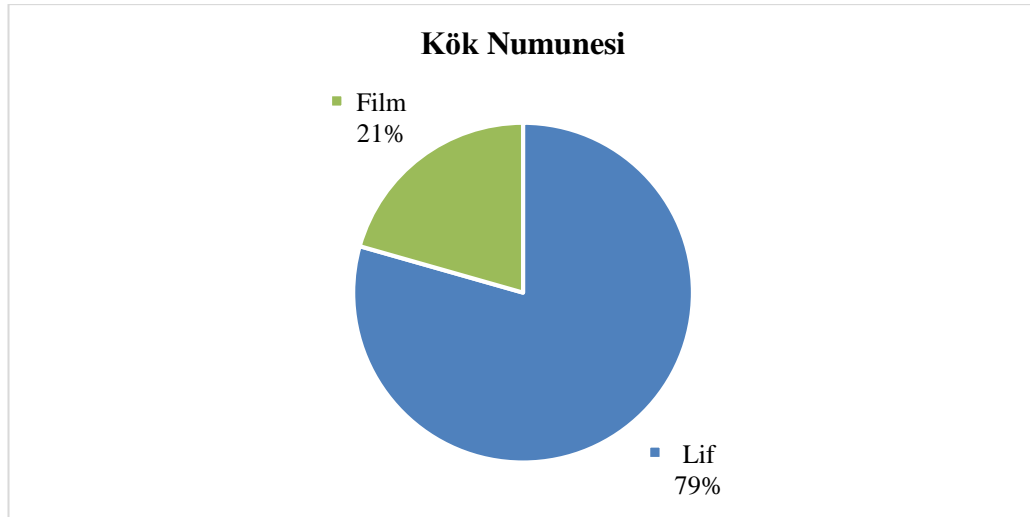
Şekil 5.33: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin renk dağılımı

5.3.2 *Phragmites Australis* Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastiklerin Şekil Dağılımı

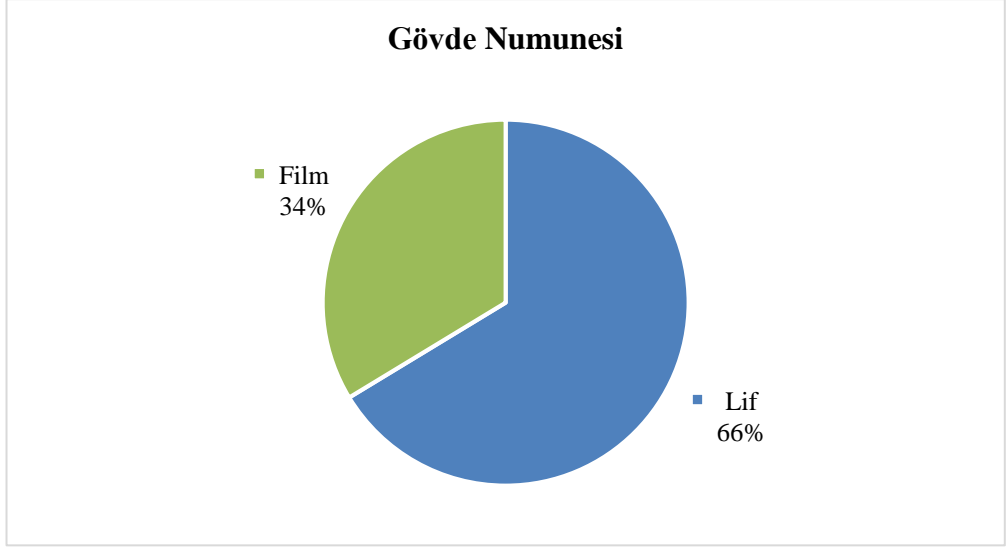
5.3.2.1 YSA Giriş Bölgesinden Alınan *Phragmites Australis* Bünyesinde Mikroplastik Şekil Dağılımı

Görsel analiz esnasında tanımlaması yapılan bir diğer morfolojik özellik de şekildir. Bu sebeple, *Phragmites australis* bitkisinin giriş ve artılmış su bölgelerinden alınan numunelerinde kök, gövde ve sürgün ucu bölümlerinde tespit edilen mikroplastik şekilleri ayrı ayrı sınıflandırılmıştır (Şekil 5.37). Giriş bölgesinden toplanan bitki örneklerinde sadece film ve lif şeklindeki mikroplastikler rapor edilmiştir.

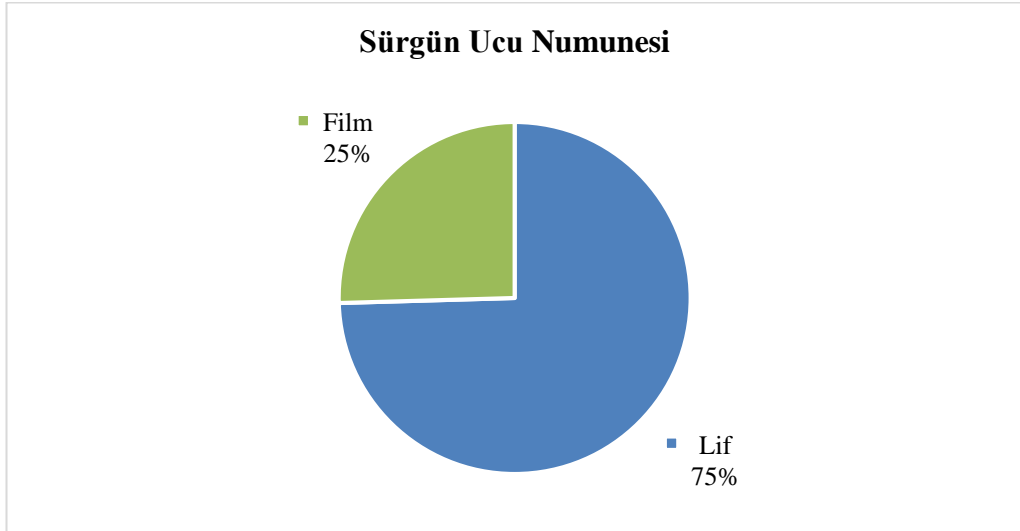
Giriş bölgesinden alınan bitki numunesinde, toplamda tespit edilen mikroplastik şekillerinin bulunma oranları şu şekilde sıralanmaktadır: lif (%73) > film (%27). Kök numunesi incelendiğinde; lif (%79) > film (%21), gövde bölgesinde; lif (%66) > film (%34), sürgün ucu bölgesinde ise lif (%75) > film (%25) şeklinde belirlenmiştir (Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36).



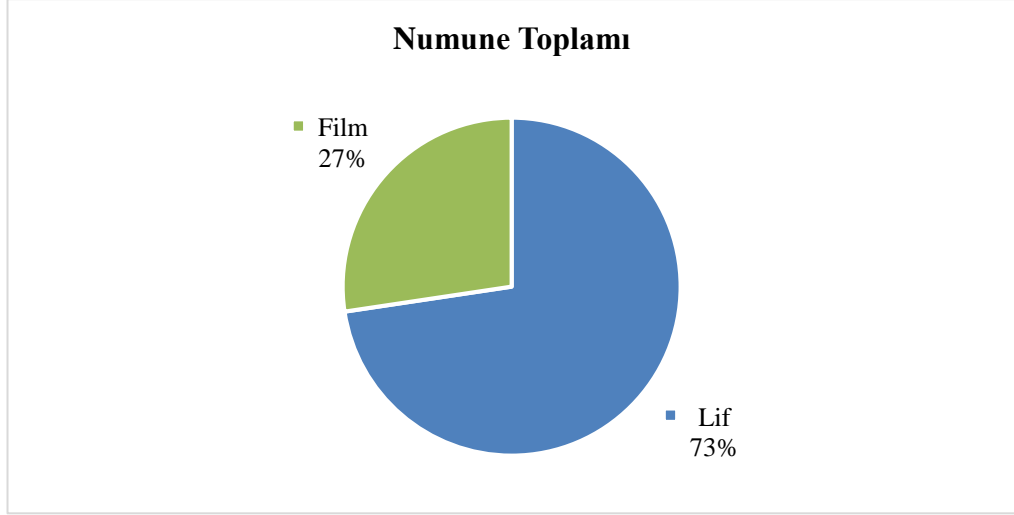
Şekil 5.34: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı



Şekil 5.35: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı



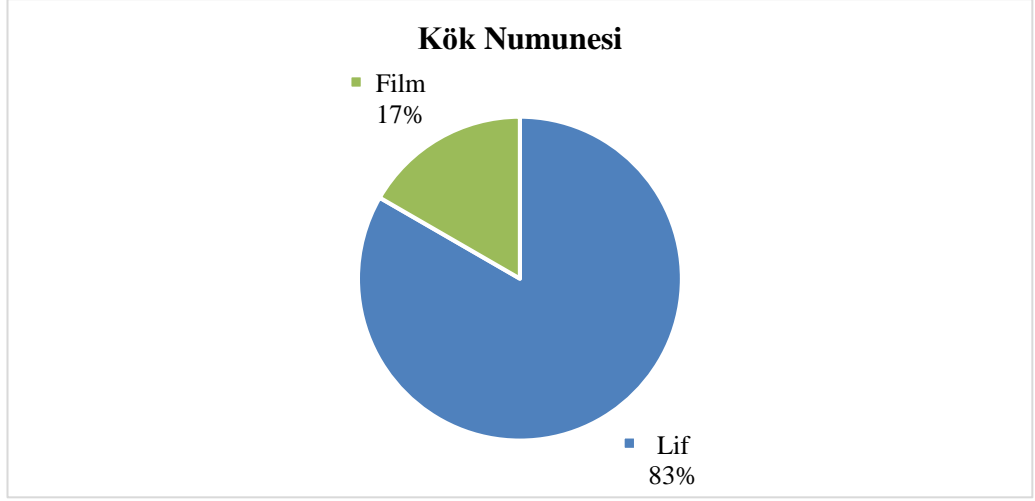
Şekil 5.36: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı



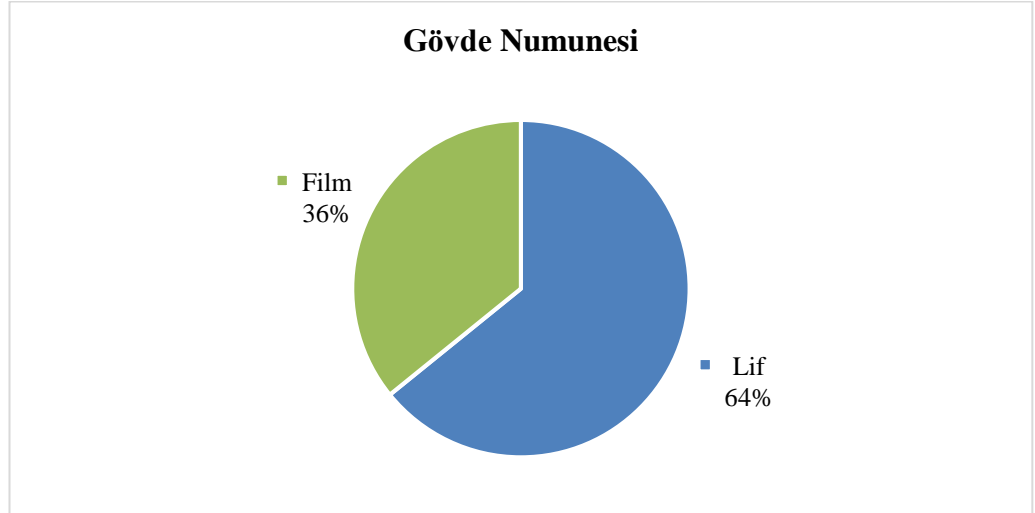
Şekil 5.37: Giriş bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı

5.3.2.2 YSA Arıtılmış Su Bölgesinden Alınan *Phragmites Australis* Bünyesinde Mikroplastik Şekil Dağılımı

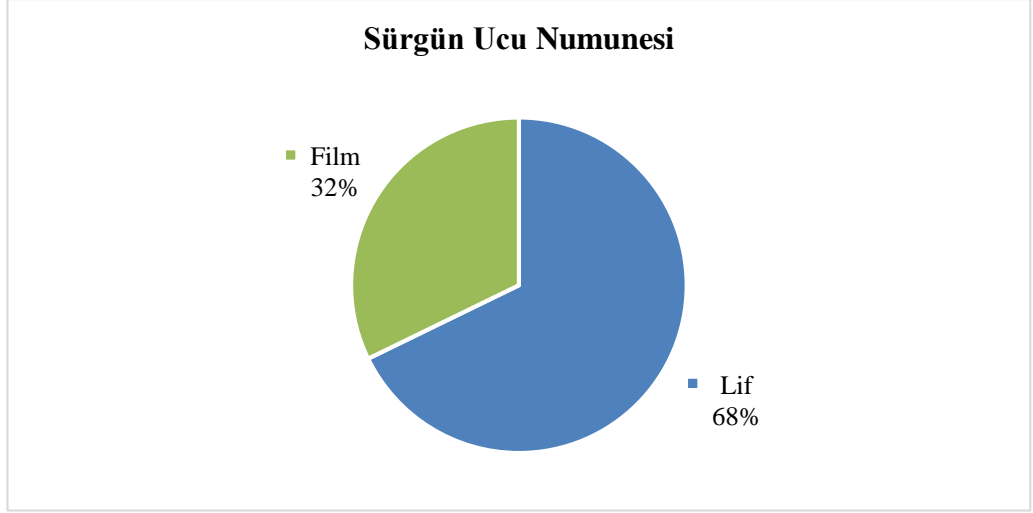
Giriş numunesinde tespit edilen mikroplastik şekillerine benzer şekilde arıtılmış su numunesinde de parça şeklinde mikroplastiklerin varlığına rastlanmamış, sadece lif ve film şeklindeki mikroplastiklerin tespiti gerçekleşmiştir (Şekil 5.41). Bitki bölümlerinde tespit edilen mikroplastik şekilleri sırasıyla, kök; lif (%83) > film (%17), gövde; lif (%64) > film (%36), sürgün ucu; lif (%68) > film (%32) olarak belirlenmiştir (Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40).



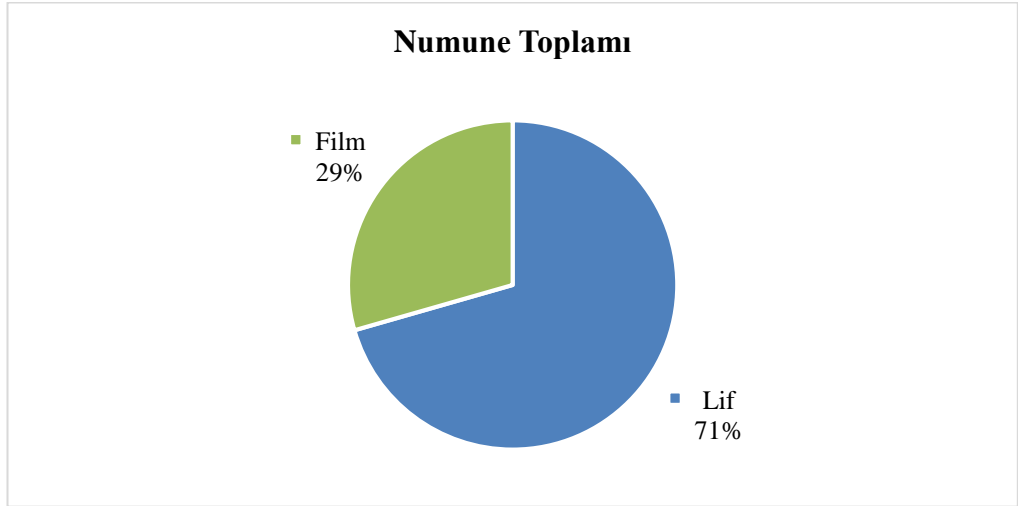
Şekil 5.38: Artırılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin kök bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı



Şekil 5.39: Artırılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin gövde bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı



Şekil 5.40: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinin sürgün ucu bölümünde tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı

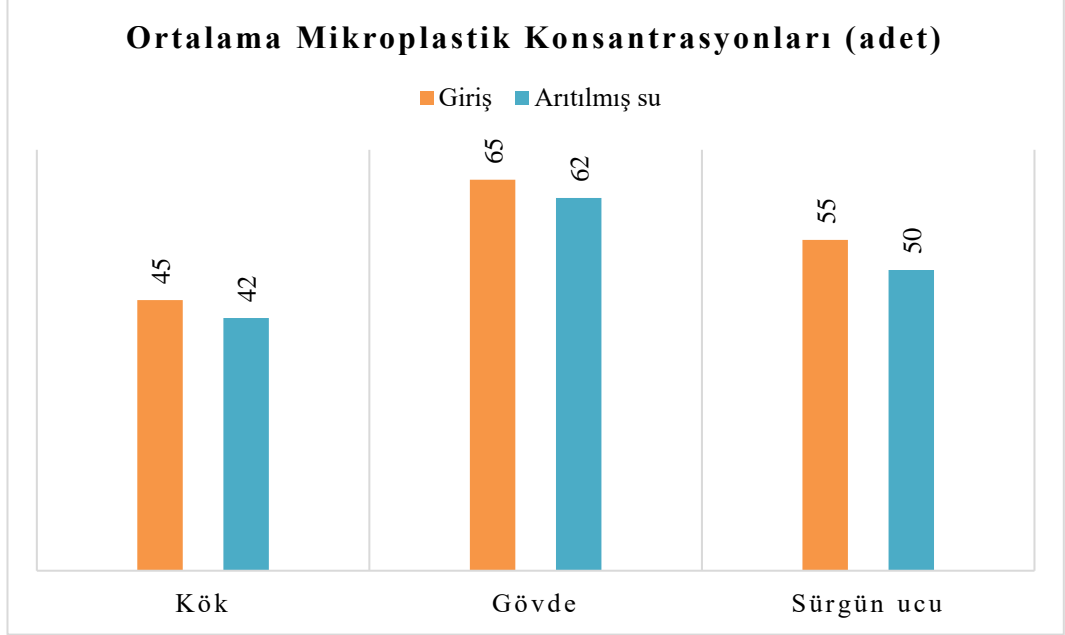


Şekil 5.41: Arıtılmış su bölgesinden alınan bitki örneğinde toplamda tespit edilen mikroplastiklerin şekil dağılımı

5.3.3 *Phragmites Australis* Bünyesinde Tespit Edilen Mikroplastik Konsantrasyonları

YSA sisteminin giriş ve arıtılmış su numunelerinin alındığı bölgelerden toplanan *Phragmites australis* örneklerinin analizi sonrasında Şekil 5.42'deki veriler elde edilmiştir. Her iki numunede de mikroplastik konsantrasyonu en çok gövde bölümünde tespit edilmiştir. Bitki bölümlerine ait mikroplastik konsantrasyonlarının birbirleriyle paralel olduğu belirlenmiştir. Giriş ve arıtılmış su numunelerinde

mikroplastik konsantrasyonları; gövde > sürgün ucu > kök şeklinde sıralanmıştır. Bitki bölümleri kıyaslandığında giriş numunesine ait tüm bölümlerde artırılmış su numunesinden daha fazla mikroplastik konsantrasyonu elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.



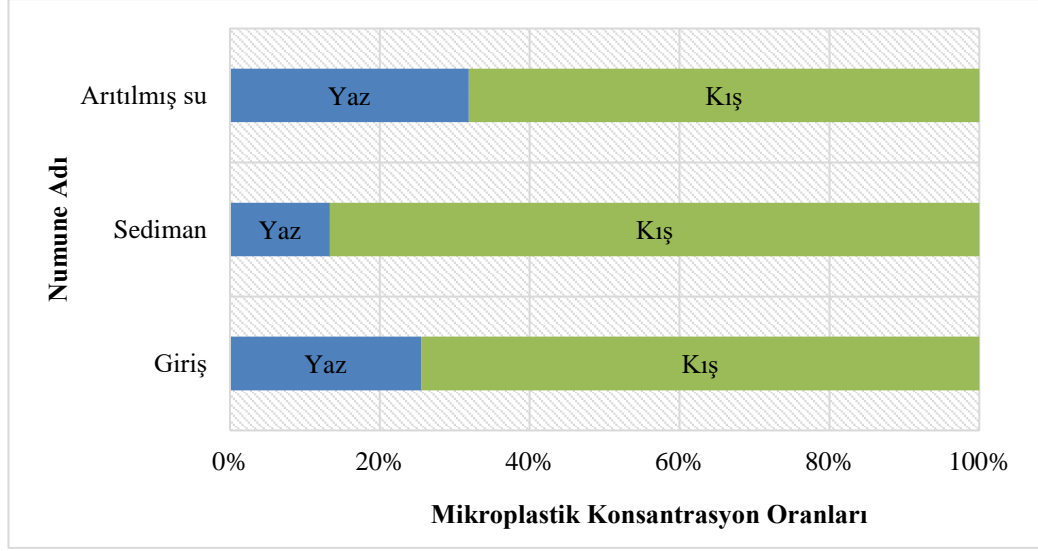
Şekil 5.42: *Phragmites Australis* bünyesinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonu

6. SONUÇLAR

6.1 Y-YAS Sisteminde Mikroplastik Varlığının ve Gideriminin Değerlendirilmesi

Yapay sulakalan sistemlerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarının, deneyin gerçekleştirildiği iki farklı mevsimde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Kış mevsiminde elde edilen konsantrasyonların yaz döneminde tespit edilenden daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mevsimsel değişimlerin kıyaslandığı diğer çalışmalarda da yağışlı mevsim ve günlerde daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik varlığı rapor edilmiştir (Vignola, 2020; Ben-David ve diğ., 2021). Tez kapsamında, yaz ve kış mevsimlerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyon oranları Şekil 6.1’de verilmiştir.

Deney kapsamında evsel nitelikli numunelerin incelenmesinin, kış mevsiminde tespit edilen yüksek konsantrasyon değerleri üzerinde etkili olduğu varsayılmıştır. Browne ve diğ. tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, kış mevsiminde artan çamaşır yıkama faaliyetleri sonucunda bu mevsimde daha yüksek konsantrasyonlarda mikroplastik salınımı gerçekleştiği ifade edilmiştir (Browne ve diğ., 2011). Buna ilaveten, kış aylarında yoğun şekilde meydana gelen yağışlar ile birlikte atmosfer ortamında askıda bekleyen mikroplastiklerin yağış etkisiyle birlikte taşındığı (Klein ve Fischer, 2019; Wright ve diğ., 2020) ve yapay sulakalan sistemine deşarj edildiği düşünülmüştür. Yağış ile birlikte sediman numunelerinde çökelmiş halde bulunan mikroplastiklerin tekrardan askıda bir hale geldiği düşünülmektedir (Zhou ve diğ., 2022). Dolayısıyla, özellikle kış mevsiminde sediman numunelerinde yüksek miktarda mikroplastik tespit edilmesi durumu bu etken ile açıklanabilir.



Şekil 6.1: Yaz ve kış dönemlerinde tespit edilen mikroplastik konsantrasyonlarının toplam mikroplastik konsantrasyonundaki oranı

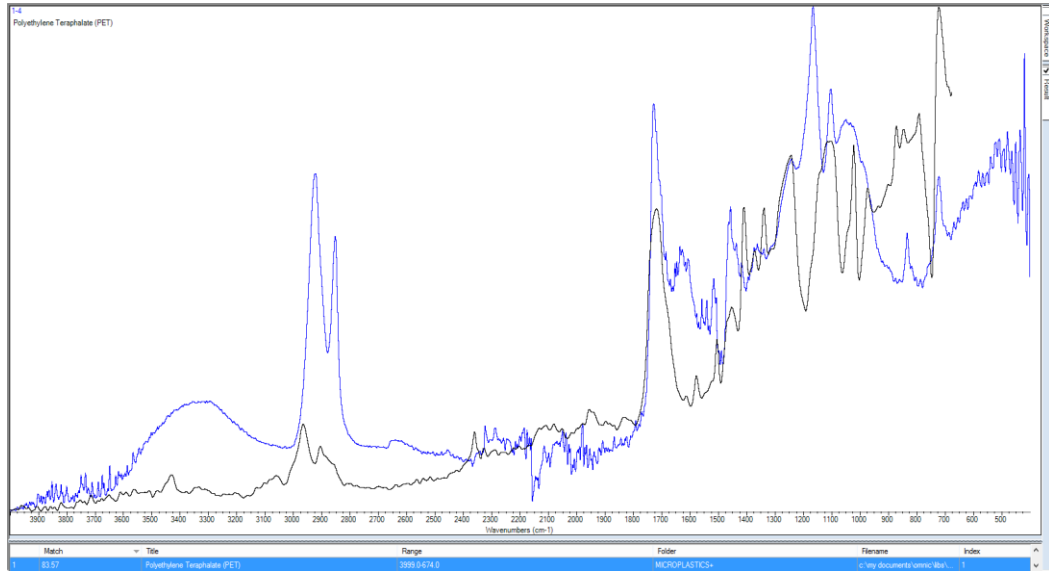
Mikroplastik konsantrasyonlarının farklılık gösterdiği bir diğer kriter, deney sürecinde tercih edilen eleklerin gözenek boyutu olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında seçilen, üç farklı gözenek boyutu kıyaslandığında tüm numunelerde ve her iki mevsimde de mikroplastik konsantrasyonunun en çok 100–500 µm aralığında yoğunlaştığı görülmüştür. Erni-Cassola ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, küçük boyutlarda tespit edilen mikroplastik miktarının daha fazla olduğu bildirilmiştir (Erni-Cassola ve diğ., 2017). Bu çalışmada, eleklerin gözenek boyutunun artmasıyla mikroplastik konsantrasyonunun azaldığı belirlenmiş ve bu sonucun diğer çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Mikroplastiklerin renk analizi gerçekleştirildiğinde, tespit edilen mikroplastiklerin en çok bulunduğu renk kategorisinin şeffaf-beyaz olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, literatür çalışmaları ile uyumludur (Hidalgo-Ruz ve diğ., 2012). Yaz döneminde renk sıralaması; şeffaf-beyaz (%72) > mavi (%19) > siyah (%7) > pembe (%5) > sarı-yeşil (%4) iken kış döneminde; şeffaf-beyaz (%88) > mavi = siyah-kahverengi (%5) > pembe = sarı-yeşil (%1) olarak tespit edilmiştir. Tang ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan bir çalışmada, atıksu arıtma tesislerinde uzun süre bulunan mikroplastiklerin oksitlenerek şeffaf veya siyah bir renk alacağı ifade edilmiştir (Tang ve diğ., 2020). Mikroplastiklerin renklerinden yola çıkarak kökenlerinin tahmin edilebildiği düşünülmektedir (Andrady, 2017). Bu sebeple, çalışma kapsamında en çok tespit edilen renk olan şeffaf-beyaz rengin plastik

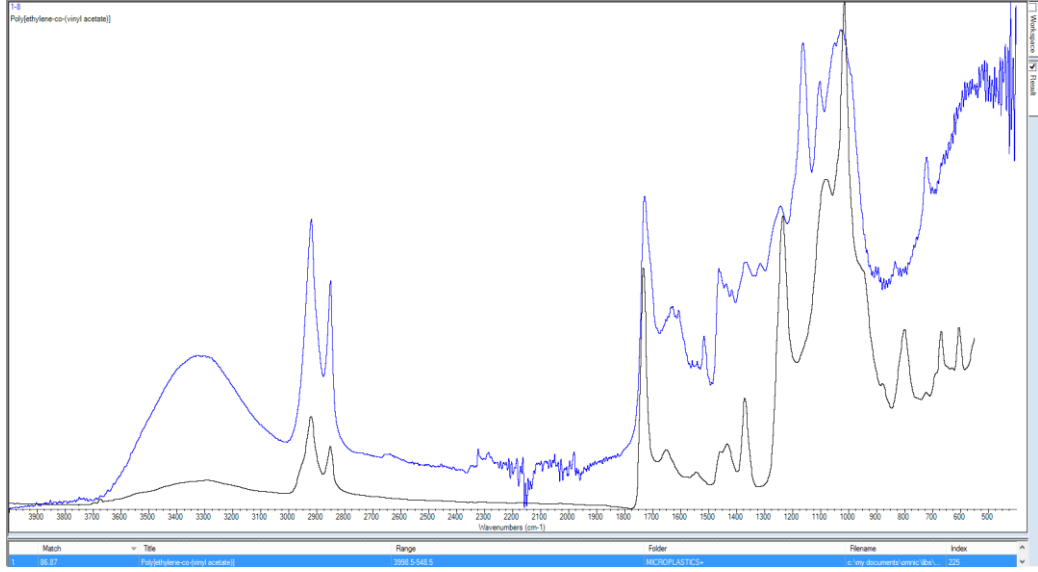
poşetlerden kaynaklanabileceği (Zhang ve diğ., 2021) tahmin edilmiştir. Rocha-Santos tarafından yapılan çalışmada ise, beyaz renkli mikroplastiklerin çoğunlukla PE ve LDPE polimerinden, şeffaf renkli mikroplastiklerin ise PP polimerinden kaynaklandığı ifade edilmiştir (Rocha-Santos ve diğ., 2017). Meng ve diğerleri tarafından 2007 yılında Çin’de yapılan bir çalışmada, çamaşır makinesinde yıkanan çamaşırların renkleriyle bağlantılı olacak şekilde mikroplastik salınımı gerçekleştirdiği bildirilmiştir. En çok mavi ve şeffaf renkte mikroplastik salınımının meydana geldiği ve kırmızı, yeşil ve siyah renklerin tespit edilen diğer renkler olduğu ifade edilmiştir (Meng, 2007). Bu sebeple, evsel atıksu arıtımı gerçekleştirilen yapay sulakalan sisteminde tespit edilen mikroplastiklerin sahip olduğu renklerin yıkama faaliyetleri ile ilgili olduğu tahmin edilmiştir.

Mikroplastik şekilleri değerlendirildiğinde, numunelerde tespit edilen mikroplastik şekilleri; lif > film > parça şeklinde sıralanmıştır. Tüm numunelerde mikroplastik şeklinin benzer dağılımda olması, giriş numunesinden arıtılmış su numunesine kadar bir değişiklik meydana gelmemesi, Wang ve diğerleri tarafından Y-YAS sisteminde yapılan çalışma ile uyumludur (Wang ve diğ., 2020). Hiçbir numunede mikroboncuk tespiti gerçekleşmemiştir. YSA sistemlerinde tespit edilen mikroplastik şekilleri incelendiğinde, birçok çalışmada mikroboncuk şekli ile karşılaşmadığı belirlenmiştir. Bu çalışma ile benzer şekilde, kırsal bölgede bulunan yapay sulakalanda gerçekleştirilen mikroplastik analizi sonucunda %0,03 oranında mikroboncuk konsantrasyonu bildirilmiştir (Long ve diğ., 2022). Mikroboncukların kaynakları genel olarak kişisel bakım ürünleri, temizlik ürünleri ve endüstriyel amaçlarla üretilen peletlerin nakliye işlemi sırasında salınımının bir sonucu olduğu bilinmektedir (Eriksen ve diğ., 2013; Lechner ve diğ., 2014). Çalışma kapsamında, mikroboncukların az miktarda tespit edilmesinin; yerel halkın tüketim alışkanlıklarından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmüştür. Lif şeklindeki mikroplastiklerin, biyofilm tabakası oluşumuna daha yatkın olması sebebiyle yoğunluğunda artış meydana gelmekte ve çökelme eğilimi göstermektedir (Ruan ve diğ., 2019). Sediman numunelerinde yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen liflerin, bu durumdan etkilendiği tahmin edilmiştir.

Tez kapsamında incelenen atıksu ve sediman numunelerinde şüpheli olan parçacıkların analizi için ATR-FT-IR Spektroskopisinden faydalanılmıştır. İşlem sonrasında yapılan kütüphane taramasında, benzerlik oranı %70 ve daha büyük olan spektrumlar geçerli sayılmıştır. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te ATR-FT-IR Spektroskopisi aracılığıyla tanımlanan mikroplastiklerin spektrumlarına yer verilmiştir. Kimyasal analizi yapılan numunelerin PET, PES ve PEVA polimerinden oluştuğu ve en sık karşılaşılan polimer türünün PEVA olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.4). Yapılan çalışmalarda, PET polimeri tekstil sektöründe kullanılan ana polimerlerden biri olarak tanımlanmaktadır (Sait ve diğ., 2021). Bunun yanı sıra, gıdaların ambalajlanmasında, çeşitli içeceklerde ve özellikle su şişelerinde kullanılmaktadır (John Wiley & Sons, 2016). Analiz sonucunda belirlenen bir diğer polimer ise PES polimeridir. Bu polimer, yıkama esnasında diğer kumaş türlerine kıyasla en fazla lif salınımı yapan polimerdir ve bir yıkamada 700,000 adet lif salınımı gerçekleştirebilir (Carney Almroth ve diğ., 2018; Napper ve Thompson, 2016). Bu çalışmaya ait analiz sonuçlarında en çok tespit edilen polimer olan PEVA polimeri ise ıslak mendillerde sıklıkla kullanılmaktadır (Pantoja Munoz ve diğ., 2018). Tespit edilen polimerlerin kullanım alanları göz önüne alındığında evsel faaliyetler sonucu oluşan atıksuların arttığı çalışma alanında bu polimerlerin bulunmasının muhtemel olduğu düşünülmüştür.



Şekil 6.2: PET polimerine ait FT-IR spektrumu (%83,57)



Şekil 6.3: PEVA polimerine ait FT-IR spektrumu (%86,87)



Şekil 6.4: FT-IR analizi yapılan mikroplastikler (a: PES, b: PET, c: PEVA)

Xu ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda, yapay sulakalan sistemlerinde mikroplastik giderim verimi üzerinde etkili olduğu düşünülen faktörlerden bahsedilmiş ve bunlar; iç etkenler ve dış etkenler şeklinde gruplandırılmıştır. Mikroplastığın sahip olduğu boyut, şekil, kimyasal yapı gibi özellikler iç etken olarak adlandırılırken yapay sulakalan sisteminin türü, hidrolik alıkonma süresi, bileşenleri ve ölçeği ise dış etkenler olarak

adlandırılmıştır (Xu ve diğ., 2022). Y-YAS sisteminin mikroplastik giderim verimi değerlendirilirken bu koşullar göze alınmıştır.

Mikroplastik giderim verimleri incelendiğinde, yaz mevsiminde %87,43 ve kış mevsiminde %97,27 oranında mikroplastik giderimi elde edilmiştir. Her iki mevsimde de yüksek oranda mikroplastik giderimi gerçekleşmiştir. Zhou ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, YAS sistemlerinin SYS sistemlerine kıyasla daha yüksek oranda mikroplastik giderim verimi elde ettiği bildirilmiştir (Zhou ve diğ., 2021). Bu durum göz önüne alındığında çalışma alanının Y-YAS sistemine sahip olmasının yüksek giderim verimleri elde edilmesinde etkili bir faktör olduğu düşünülmüştür.

Y-YAS sistemlerinde mikroplastik giderim verimi üzerinde etkili olduğu düşünülen bir diğer faktör, dolgu materyalinin çapıdır (Wang ve diğ., 2020). Dolgu materyalinin çap boyutu azaldıkça adsorpsiyon kapasitesinin arttığı ve buna bağlı olarak, mikroplastik gideriminde artış meydana geldiği yapılan çalışmalar tarafından bildirilmiştir (Wei ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2020). Y-YAS sisteminde dolgu materyali olarak çakılın tercih edildiği bir çalışmada, %88 mikroplastik giderim verimi eldesi bildirilmiştir (Wang ve diğ., 2020). Çalışma kapsamında, Y-YAS sisteminde dolgu materyali olarak çakıl kullanılmış ve ortalama olarak %92,35 oranında mikroplastik giderim verimi elde edilmiştir. Bu sebeple, aynı türde yapay sulakalan sistemlerinin ve benzer dolgu materyallerinin kullanıldığı çalışmalarda yüksek oranda mikroplastik giderim verimi elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Y-YAS sistemlerinde yapılan bir çalışmada, dolgu materyali olarak çakıl kullanımının bir sonucu olarak çakıllar arasında oluşan açıklıklar nedeniyle mikroplastiklerin giriş bölgesinden daha uzak mesafelere taşınabildiği rapor edilmiştir (Chen ve diğ., 2021). Bu çalışma doğrultusunda, çakıl kullanımı sonucunda giriş bölgesinden artılmış su bölgesine kadar mikroplastik tespitinin gerçekleşmesinin bu etken ile bağlantılı olabileceği düşünülmüştür.

YSA sistemlerinde mikroplastik giderimini etkileyen bir diğer faktör ise hidrolik alıkonma süresi (HRT)'dir. Hidrolik alıkonma süresindeki artış ile birlikte mikroplastik giderim verimi de artmaktadır (Long ve diğ., 2022). Bu çalışmada, hidrolik alıkonma süresi değeri 5,88 gündür. Yüksek mikroplastik giderim verimi eldesinde önemli bir rol üstlendiği varsayılmıştır. Buna ek olarak, gelişmiş kök

yapısına sahip bitkilerin seçilmesinin de giderim verimini etkilediği öngörülmektedir (Long ve diğ., 2022).

6.2 *Phragmites Australis* Numunelerinin Değerlendirilmesi

Literatür kapsamında, mikroplastiklerin bitki bünyesine alındığı kanıtlayan az sayıda çalışma bulunmakta ve mikroplastiklerin bitki bünyesinde nasıl bir taşınım mekanizmasına sahip olduğu tam anlamıyla bilinmemektedir. Bu çalışma, *Phragmites australis* bünyesinde mikroplastik tespitinin gerçekleştirildiği ilk çalışmadır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: *Phragmites australis* bitkisinde tespit edilen mikroplastik örnekleri

Çalışma kapsamında, YSA bünyesinde bulunan bir makrofit olan *Phragmites australis* bitkisinin bünyesine alabileceği mikroplastik potansiyelini belirlemek amacıyla yapılan bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, *Phragmites australis*'in kök, gövde ve sürgün ucu bölümlerinde mikroplastik varlığı tespit edilmiştir. Giriş ve arıtılmış su bölgelerinden alınan numunelerin her ikisinde de en fazla mikroplastik konsantrasyonuna gövde bölgesinde rastlanmıştır. Mikroplastik konsantrasyonlarına göre; gövde > sürgün ucu > kök şeklinde sıralanmıştır. Mikroplastik konsantrasyonu en fazla; giriş bölgesinden alınan gövde örneğinde, en az arıtılmış su bölgesinden alınan kök örneğinde rapor edilmiştir. Her iki numune

bölgesinden elde edilen verilerin birbiriyle uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır (Tablo 6.1). Bitki bölümlerinin her birinde sadece film ve lif şeklindeki mikroplastikler tespit edilmiş ve en fazla lif şeklindeki mikroplastiklere rastlanmıştır. Mikroplastik şekillerine benzer şekilde, renk kategorisi de beyaz-şeffaf, lacivert-mavi, kırmızı-pembe ve siyah-kahverengi şeklindedir. Arıtılmış su bölgesinden alınan sürgün ucu numunesi haricinde, tüm numunelerde aynı renk skalasına rastlanmıştır.

Tablo 6.1: *Phragmites australis* bitkisinin farklı bölgelerden alınan örneklerinin mikroplastik konsantrasyonlarına ait istatistiksel veriler

Bitki Bölümü	Numune	Korelasyon	Aritmetik Ortalama	Standart Sapma
Kök	Giriş-1	0,97668	45,33333	12,4231
	Giriş-2			
	Giriş-3			
	Arıtılmış su-1		42	9,848858
	Arıtılmış su-2			
	Arıtılmış su-3			
Gövde	Giriş-1	0,957503	65,33333	13,27906
	Giriş-2			
	Giriş-3			
	Arıtılmış su-1		62,33333	13,86843
	Arıtılmış su-2			
	Arıtılmış su-3			
Sürgün Ucu	Giriş-1	0,996961	55	10,53565
	Giriş-2			
	Giriş-3			
	Arıtılmış su-1		49,66667	12,66228
	Arıtılmış su-2			
	Arıtılmış su-3			

Yapılan çalışmalarda, bitki bünyesine alınan farklı boyuttaki mikroplastiklerden bahsedilmiştir (Bandmann ve diğ., 2012; Oliveri Conti ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2019). Jiang ve diğerleri tarafından 2019 yılında *Vicia faba* bitkisinde yapılan çalışmada, 5 µm'dan daha büyük boyuta sahip mikroplastiklerin bitki bünyesine alınmasının zor olacağından bahsedilmiştir (Jiang ve diğ., 2019). Başka bir çalışmada ise, mikroplastiklerin bitki bünyesine alınamayacak büyüklüğe sahip olduğu ifade edilmiştir (Ng ve diğ., 2018). Bu çalışmada, mikroplastiklerin ekstraksiyonu gerçekleştirilmeden önce bitki parçaları 500 µm gözenek boyutuna sahip elekten elenmiş ve 500 µm'den küçük boyuta sahip parçalar ekstrakte edilmiştir. Dolayısıyla,

sadece görsel analiz yapılarak tespit edilen mikroplastiklerin boyutu hakkında net bir bilgi elde edilmemiştir.

Phragmites australis bitkisinin ekstraksiyonu ile birlikte, YSA sistemlerinden mikroplastiklerin filtrelenmesini sağlamasına (Yin ve diğ., 2020) ilaveten; mikroplastikleri bünyesine alarak da giderdiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda, *Phragmites australis* bitkisinin sucul ekosistemlere mikroplastik salınımını azaltan bir yapı haline geldiği düşünülmüştür.

Hasat işleminden sonra yapay sulakalan bitkileri, sıklıkla hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Bitki bünyesinde mikroplastik tespit edildiği için bu bitkilerin hayvan yemi olarak kullanılması durumunda önce hayvanlara, ardından hayvansal ürünlerin tüketilmesi sonucunda insan bünyesine mikroplastik taşınımı gerçekleşeceği tahmin edilmiştir. Bu sebeple, yapay sulakalan bitkilerinin hayvan yemi olarak kullanılmasının ciddi problemlere yol açabileceği düşünülmüştür.

7. ÖNERİLER

- Mikroplastik giderim veriminin artırılması amacıyla YSA sistemlerinde çeşitli yapısal değişiklikler yapılabilir; daha küçük çaplı dolgu materyalleri kullanılabilir ve hidrolik alıkonma süresi arttırılabilir.
- Evsel atıksuların arıtılmasında kullanılan YSA sistemlerinde mikroplastik giderim veriminin azaltılması amacıyla, içerisinde birincil mikroplastikleri barındıran deterjanların ve kişisel bakım ürünlerinin tercih edilmemesi sağlanabilir.
- Yıkama faaliyetlerinden kaynaklanan mikroplastik salınımını azaltmak amacıyla, çamaşır makinelerine mikroplastik filtresi takılabilir.
- Sentetik materyaller yerine %100 pamuktan oluşan kıyafetler tercih edilebilir.
- Gelecek çalışmalarda, *Phragmites australis*'in bünyesine mikroplastik alma potansiyeli belirlenirken, tespit edilen mikroplastiklerin boyutunun belirlenmesi ile bitkinin bünyesine alabileceği mikroplastik boyutları hakkında kesin bilgiler elde edilebilir.
- Çalışma alanında mikroboncuk tespit edilmediği için bitki, laboratuvar ölçekli bir çalışma ile mikroboncuk kontaminasyonuna maruz bırakılarak bu şekil hakkında da veri elde edilebilir.
- Bahar döneminde örneklenen bitkinin, özellikle yağışlı mevsimlerde mikroplastik alma potansiyeli tespit edilebilir. Atıksu numunelerinde yağışlı mevsimlerde artan mikroplastik konsantrasyonuna benzer şekilde, bitki bünyesine girecek olan mikroplastik konsantrasyonunda herhangi bir değişiklik olup olmayacağı belirlenebilir.
- Hidrolik alıkonma süresinin artmasıyla mikroplastik giderim veriminde artış gözleendiği için farklı hidrolik alıkonma sürelerinde ve farklı yapay sulakalan türlerinde mikroplastik giderim verimi tespit edilerek her bir yapay sulakalan türü için optimum alıkonma süresi tespit edilebilir.
- Çalışma kapsamında, *Phragmites australis* bünyesinde mikroplastik tespiti gerçekleştirildiğinden, diğer yapay sulakalan bitkilerinde de benzer çalışma yürütülerek bitkilerin mikroplastik alma potansiyellerinin belirlenmesi sağlanabilir.

8. KAYNAKLAR

- Abbasi, S., Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., ve Hassanaghaei, M., "Microplastics in Different Tissues of Fish and Prawn From the Musa Estuary, Persian Gulf", *Chemosphere*, (205), 80–87, (2018).
- Alimi, O. S., Farner Budarz, J., Hernandez, L. M., ve Tufenkji, N., "Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport", *Environ. Sci. Technol.*, (52), 1704–1724, (2018).
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., ve Galop, D., "Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment", *Nat. Geosci.* 2019 125, (12), 339–344, (2019).
- Alvarez-Zeferino, J. C., Cruz-Salas, A. A., Vázquez-Morillas, A., ve Ojeda-Benitez, S., "Method for quantifying and characterization of microplastics in sand beaches", *Rev. Int. Contam. Ambient.*, (36), 151–164, (2020).
- Andrady, A. L., "The plastic in microplastics: A review", *Mar. Pollut. Bull.*, 119 (1), (2017).
- Andreo-Martínez, P., García-Martínez, N., Quesada-Medina, J., ve Almela, L., "Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland: A case study in the southeast of Spain", *Bioresour. Technol.*, (233), 236–246, (2017).
- APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22nd Edition", *Am. Public Heal. Assoc. Am. Water Work. Assoc. Water Environ. Fed.*, (2012).
- Arthur, C., Baker, J.E., & Bamford, H.A., "Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris", September 9-11, 2008, University of Washington Tacoma, Tacoma, WA, USA., (2009).
- ASHRAE, Guideline 10P, "Interactions affecting the achievement of acceptable indoor environments", *Second Public Review*, 24 pp., (2010).
- Baekeland, L. H., "Method of making insoluble products of phenol and formaldehyde", *United States Pat. Off.*, 3, (1909).

- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T., ve Homann, U., "Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis", *FEBS Lett.*, (586), 3626–3632, (2012).
- Ben-David, E. A., Habibi, M., Haddad, E., Hasanin, M., Angel, D. L., Booth, A. M., ve 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).
- Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M. B., Trachsel, J., ve Gerdt, G., "White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic", *Sci. Adv.*, (5), (2019).
- Boucher, J. ve Friot, D., "International Union for Conservation of Nature A Global Evaluation of Sources Primary Microplastics in the Oceans", 43 pp., (2017).
- Brix, H., "Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives", *Water Sci. Technol.*, (30), 209–223, (1994).
- Brix, H., "Plants used in constructed wetlands and their functions", *1 St. Int. Semin. Use Aquat. Macrophites Wastewater Treat. Constr. Wetl.*, 30, (2003).
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., ve Thompson, R., "Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks", *Environ. Sci. Technol.*, (45), 9175–9179, (2011).
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., ve Uricchio, V. F., "A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health", *Int. J. Environ. Res. Public Heal.*, Vol. 17, Page 1212, (17), 1212, (2020).
- Cardina, J. A., "Particle Size Determination of Tire-Tread Rubber in Atmospheric Dusts", *Rubber Chem. Technol.*, (47), 1005–1010, (1974).
- Carney Almroth, B. M., Åström, L., Roslund, S., Petersson, H., Johansson, M., ve Persson, N. K., "Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (25), 1191–1199, (2018).
- Carpenter, E. J. ve Smith, K. L., "Plastics on the Sargasso sea surface", *Science*, (175),

1240–1241, (1972).

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

Catarino, A. I., Macchia, V., Sanderson, W. G., Thompson, R. C., ve Henry, T. B., "Low levels of microplastics (MP) in wild mussels indicate that MP ingestion by humans is minimal compared to exposure via household fibres fallout during a meal", *Environ. Pollut.*, (237), 675–684, (2018).

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

Chen, Y., Li, T., Hu, H., Ao, H., Xiong, X., Shi, H., ve Wu, C., "Transport and fate of microplastics in constructed wetlands: A microcosm study", *J. Hazard. Mater.*, (415), 125615, (2021).

Christian Ebere, E., Wirnkor, V. A., ve Ngozi, V. E., "Uptake of Microplastics by Plant: a Reason to Worry or to be Happy?", *World Sci. News An Int. Sci. J.*, (131), 256–257, (2019).

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

Courtene-Jones, W., Quinn, B., Gary, S. F., Mogg, A. O. M., ve Narayanaswamy, B. E., "Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates in the Rockall Trough, North Atlantic Ocean", *Environ. Pollut.*, (231), 271–280, (2017).

Crawford, C. B. ve Quinn, B., "Microplastic Pollutants", *Microplastic Pollut.*, 1–315, (2016).

Cutroneo, L., Reboa, A., Besio, G., Borgogno, F., Canesi, L., Canuto, S., Dara, M., Enrile, F., Forioso, I., Greco, G., Lenoble, V., Malatesta, A., Mounier, S., Petrillo, M., Rovetta, R., Stocchino, A., Tesan, J., Vagge, G., ve Capello, M., "Microplastics In Seawater: Sampling Strategies, Laboratory Methodologies, And Identification Techniques Applied To Port Environment", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (27), 8938–8952, (2020).

Dehaut, A., Cassone, A. L., Frère, L., Hermabessiere, L., Himber, C., Rinnert, E.,

- Rivière, G., Lambert, C., Soudant, P., Huvet, A., Duflos, G., ve Paul-Pont, I., "Microplastics in seafood: Benchmark protocol for their extraction and characterization", *Environ. Pollut.*, (215), 223–233, (2016).
- Desforges, J. P. W., Galbraith, M., Dangerfield, N., ve Ross, P. S., "Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean", *Mar. Pollut. Bull.*, (79), 94–99, (2014).
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., ve Tassin, B., "Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris", *Environ. Chem.*, (12), 592–599, (2015).
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., ve Tassin, B., "Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment?", *Mar. Pollut. Bull.*, (104), 290–293, (2016).
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., ve Tassin, B., "A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments", *Environ. Pollut.*, (221), 453–458, (2017).
- Duan, J., Han, J., Zhou, H., Lau, Y. L., An, W., Wei, P., Cheung, S. G., Yang, Y., ve Tam, N. F. yee, "Development of a digestion method for determining microplastic pollution in vegetal-rich clayey mangrove sediments", *Sci. Total Environ.*, (707), 136030, (2020).
- Dümichen, E., Barthel, A. K., Braun, U., Bannick, C. G., Brand, K., Jekel, M., ve Senz, R., "Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method", *Water Res.*, (85), 451–457, (2015).
- Ebere, E. C., Wirnkor, V. A., Ngozi, V. E., ve Chukwuemeka, I. S., "Macrodebris and microplastics pollution in Nigeria: First report on abundance, distribution and composition", *Environ. Health Toxicol.*, (34), (2019).
- Egessa, R., Nankabirwa, A., Basooma, R., ve Nabwire, R., "Occurrence, distribution and size relationships of plastic debris along shores and sediment of northern Lake Victoria", *Environ. Pollut.*, (257), 113442, (2020).
- Elkhatib, D. ve Oyanedel-Craver, V., "A Critical Review of Extraction and Identification Methods of Microplastics in Wastewater and Drinking Water", *Environ. Sci. Technol.*, (54), 7037–7049, (2020).

- Enfrin, M., Dumée, L. F., ve Lee, J., "Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions", *Water Res.*, (161), 621–638, (2019).
- Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., ve Amato, S., "Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes", *Mar. Pollut. Bull.*, (77), 177–182, (2013).
- Erni-Cassola, G., Gibson, M. I., Thompson, R. C., ve Christie-Oleza, J. A., "Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 μ m) in Environmental Samples", *Environ. Sci. Technol.*, (51), 13641–13648, (2017).
- Estahbanati, S. ve Fahrenfeld, N. L., "Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water", *Chemosphere*, (162), 277–284, (2016).
- Everaert, G., Van Cauwenberghe, L., De Rijcke, M., Koelmans, A. A., Mees, J., Vandegheuchte, M., ve Janssen, C. R., "Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions", *Environ. Pollut.*, (242), 1930–1938, (2018).
- Franco, A. A., Arellano, J. M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Zahedi, S., Quiroga, J. M., ve Coello, M. D., "Mapping microplastics in Cadiz (Spain): Occurrence of microplastics in municipal and industrial wastewaters", *J. Water Process Eng.*, (38), 101596, (2020).
- Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., ve Remy, D., "Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy", *Environ. Sci. Process. Impacts*, (15), 1949–1956, (2013).
- Gao, F., Li, J., Hu, J., Li, X., ve Sun, C., "Occurrence of microplastics carried on *Ulva prolifera* from the Yellow Sea, China", *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, (2), (2020).
- Gil-Delgado, J. A., Guijarro, D., Gosálvez, R. U., López-Iborra, G. M., Ponz, A., ve Velasco, A., "Presence of plastic particles in waterbirds faeces collected in Spanish lakes", *Environ. Pollut.*, (220), 732–736, (2017).
- Göçmez, S., Güngör, M., Akyürek, A., Şenyurt, M., Öztürk, A., Karabuğa, M. Ç.,

"Revision of the constructed wetlands in Denizli city: the case study of Bozkurt-Alikurt constructed wetland", *Conference: International Symposium on Urban Water and Wastewater Management*, (2018).

Gorgoglione, A. ve Torretta, V., "Sustainable Management and Successful Application of Constructed Wetlands: A Critical Review", *Sustain.* (2018), Vol. 10, Page 3910, (10), 3910, (2018).

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

Hamilton, H., Nix, P. G., ve Sobolewski, A., "An Overview of Constructed Wetlands as Alternatives to Conventional Waste Treatment Systems", *Water Qual. Res. J.*, (28), 529–548, (1993).

Hammer, J., Kraak, M. H. S., ve Parsons, J. R., "*Plastics in the marine environment: The dark side of a modern gift*", *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, (220), 1–44, (2012).

Han, X., Lu, X., ve Vogt, R. D., "An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples", *Environ. Pollut.*, (254), (2019).

Hann, S., Kershaw, P., Sherrington, C., Bapasola, A., Jamieson, O., Cole, G., ve Hickman, M., "Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products", *Rep. DG Env EC.*, (62), 335, (2018).

Harrison, J. P., Ojeda, J. J., ve Romero-González, M. E., "The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments", *Sci. Total Environ.*, (416), 455–463, (2012).

Hasan Anik, A., Hossain, S., Alam, M., Binte Sultan, M., Hasnine, M. T., ve Rahman, M. M., "Microplastics pollution: A comprehensive review on the sources, fates, effects, and potential remediation", *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, (16), 100530, (2021).

He, B., Smith, M., Egodawatta, P., Ayoko, G. A., Rintoul, L., ve Goonetilleke, A., "Dispersal and transport of microplastics in river sediments", *Environ. Pollut.*, (279), 116884, (2021).

Herbort, A. F., Sturm, M. T., Fiedler, S., Abkai, G., ve Schuhen, K., "Alkoxy-silyl Induced Agglomeration: A New Approach for the Sustainable Removal of Microplastic from Aquatic Systems", *J. Polym. Environ.*, (26), 4258–4270, (2018).

Hernández-Crespo, C., Gargallo, S., Benedito-Durá, V., Náchter-Rodríguez, B., Rodrigo-Alacreu, M. A., ve Martín, M., "Performance of surface and subsurface flow constructed wetlands treating eutrophic waters", *Sci. Total Environ.*, (595), 584–593, (2017).

Hernandez, E., Nowack, B., ve Mitrano, D. M., "Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release during Washing", *Environ. Sci. Technol.*, (51), 7036–7046, (2017).

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

Hidayaturrehman, H. ve 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. ve Dixon, S. J., "Microplastics: An introduction to environmental transport processes", *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, (5), e1268, (2018).

Horton, A. A., Svendsen, C., Williams, R. J., Spurgeon, D. J., ve Lahive, E., "Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK – Abundance, sources and methods for effective quantification", *Mar. Pollut. Bull.*, (114), 218–226, (2017).

Hu, Y., Gong, M., Wang, J., ve Bassi, A., "Current research trends on microplastic pollution from wastewater systems: a critical review", *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, 182, (18), 207–230, (2019).

Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., ve Wang, J., "Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment", *Environ. Pollut.*, (260), 114096, (2020).

Huang, Z., Weng, Y., Shen, Q., Zhao, Y., ve Jin, Y., "Microplastic: A potential threat to human and animal health by interfering with the intestinal barrier function and changing the intestinal microenvironment", *Sci. Total Environ.*, (785), 147365, (2021).

- Jan Kole, P., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., ve Ragas, A. M. J., "Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment", *Int. J. Environ. Res. Public Heal.*, Vol. 14, Page 1265, (14), 1265, (2017).
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., ve Sadofsky, L. R., "Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy", *Sci. Total Environ.*, (831), 154907, (2022).
- Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., ve Klobučar, G., "Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*", *Environ. Pollut.*, (250), 831–838, (2019).
- Jiang, Y., Yang, F., Hassan Kazmi, S. S. U., Zhao, Y., Chen, M., ve Wang, J., "A review of microplastic pollution in seawater, sediments and organisms of the Chinese coastal and marginal seas", *Chemosphere*, (286), 131677, (2022).
- John Wiley & Sons, "Ullmann's polymers and plastics: products and processes", 1588–1611 pp., (2016).
- K, M. B., Natesan, U., R, V., R, P. K., R, R., ve S, S., "Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater", *Chemosphere*, (277), 130263, (2021).
- Kacprzak, S. ve Tijing, L. D., "Microplastics in indoor environment: Sources, mitigation and fate", *J. Environ. Chem. Eng.*, (10), 107359, (2022).
- Kadlec, R. H. ve Wallace, S., *Treatment Wetlands*, (2008).
- Kang, P., Ji, B., Zhao, Y., ve Wei, T., "How can we trace microplastics in wastewater treatment plants: A review of the current knowledge on their analysis approaches", *Sci. Total Environ.*, (745), 140943, (2020).
- Karami, A., Golieskardi, A., Keong Choo, C., Larat, V., Galloway, T. S., ve Salamatinia, B., "The presence of microplastics in commercial salts from different countries", *Sci. Rep.*, (7), (2017).
- Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T. R., ve Cole, M., "Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (25), 36046–36063, (2018).
- Luo, K., "Are you breathing plastic air at home? Here's how microplastics are polluting our lungs", (erişim: 18 Mayıs 2022),

<https://www.weforum.org/agenda/2018/06/microplastic-pollution-in-air-pollutes-our-lungs/>, (2018).

Khalid, N., Aqeel, M., ve 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., Hashem, M., Mostafa, Y. S., Alhaithloul, H. A. S., ve Alghanem, S. M., "Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments", *Chemosphere*, (264), 128541, (2021).

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

Kosuth, M., Mason, S. A., ve Wattenberg, E. V., "Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt", *PLoS One*, (13), (2018).

Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., ve Shruti, V. C., "Branded milks – Are they immune from microplastics contamination?", *Sci. Total Environ.*, (714), 136823, (2020).

Lares, M., Ncibi, M. C., Sillanpää, M., ve 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).

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

Lastovina, T. A. ve Budnyk, A. P., "A review of methods for extraction, removal, and stimulated degradation of microplastics", *J. Water Process Eng.*, (43), 102209, (2021).

Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Glas, M., ve Schludermann, E., "The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river", *Environ. Pollut.*, (188), 177–181, (2014).

Li, L., Zhou, Q., Yin, N., Tu, C., ve Luo, Y., "Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant", *Sci. Bull.*, (64), 928–934, (2019).

Li, R., Yu, L., Chai, M., Wu, H., ve Zhu, X., "The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China", *Sci. Total*

Environ., (708), 135025, (2020).

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

Liebezeit, G. ve Liebezeit, E., "Non-pollen particulates in honey and sugar", *Food Addit. Contam. Part A. Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.*, (30), 2136–2140, (2013).

Liebezeit, G. ve Liebezeit, E., "Synthetic particles as contaminants in German beers", *Food Addit. Contam. Part A. Chem. Anal. Control. Expo. Risk Assess.*, (31), 1574–1578, (2014).

Liebezeit, G. ve Liebezeit, E., "Origin of Synthetic Particles in Honeys", *Polish J. Food Nutr. Sci.*, (65), 143–147, (2015).

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

Liu, Q., Hu, H., Xiong, X., Zhao, E., Wang, K., ve Wu, C., "Urban natural wetland as a sink for microplastics: A case from Lulu Wetland in Tibet, China", *Sci. Total Environ.*, (828), 154399, (2022).

Löder, M. G. J. ve Gerdt, G., "Methodology used for the detection and identification of microplastics—a critical appraisal", *Mar. Anthropog. Litter*, 201–227, (2015).

Long, Y., Zhou, Z., Yin, L., Wen, X., Xiao, R., Du, L., Zhu, L., Liu, R., Xu, Q., Li, H., Nan, R., ve Yan, S., "Microplastics removal and characteristics of constructed wetlands WWTPs in rural area of Changsha, China: A different situation from urban WWTPs", *Sci. Total Environ.*, (811), 152352, (2022).

Mahat, S., " Separation and quantification of microplastics from beach and sediment samples using the Bauta microplastic-sediment separator ", (2017).

Markic, A., Niemand, C., Bridson, J. H., Mazouni-Gaertner, N., Gaertner, J. C., Eriksen, M., ve Bowen, M., "Double trouble in the South Pacific subtropical gyre: Increased plastic ingestion by fish in the oceanic accumulation zone", *Mar. Pollut. Bull.*, (136), 547–564, (2018).

Mason, S. A., Welch, V. G., ve Neratko, J., "Synthetic Polymer Contamination in

Bottled Water", *Front. Chem.*, (6), 407, (2018).

Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C., ve Herring, C. E., "Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments", *Environ. Sci.*, (2015).

Materials, A., "Measuring Particle Pollution" <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14511>, (erişim: 15 Haziran 2022).

Meng, Y., "The color orientation of Chinese urban residents", https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85088525840&origin=inward&txGid=7c7cfb225c3513681178fbbe002355d0&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1, (erişim: 8 Temmuz 2022).

Michielssen, M. R., Michielssen, E. R., Ni, J., ve 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), 1064–1073, (2016).

Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., Primpke, S., ve 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).

Munno, K., Helm, P. A., Jackson, D. A., Rochman, C., ve Sims, A., "Impacts of temperature and selected chemical digestion methods on microplastic particles", *Environ. Toxicol. Chem.*, (37), 91–98, (2018).

Naji, A., Nuri, M., Amiri, P., ve Niyogi, S., "Small microplastic particles (S-MPPs) in sediments of mangrove ecosystem on the northern coast of the Persian Gulf", *Mar. Pollut. Bull.*, (146), 305–311, (2019).

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

Naqash, N., Prakash, S., Kapoor, D., ve Singh, R., "Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review", *Environ. Chem. Lett.*, (18), 1813–1824, (2020).

- Ng, E. L., Huerta Lwanga, E., Eldridge, S. M., Johnston, P., Hu, H. W., Geissen, V., ve Chen, D., "An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems", *Sci. Total Environ.*, (627), 1377–1388, (2018).
- Nizzetto, L., Futter, M., ve Langaas, S., "Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?", *Environ. Sci. Technol.*, (50), 10777–10779, (2016).
- Nuelle, M. T., Dekiff, J. H., Remy, D., ve Fries, E., "A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments", *Environ. Pollut.*, (184), 161–169, (2014).
- Ó Briain, O., Marques Mendes, A. R., McCarron, S., Healy, M. G., ve Morrison, L., "The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment", *Water Res.*, (182), 116021, (2020).
- Okoffo, E. D., O'Brien, S., O'Brien, J. W., Tschärke, B. J., ve 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), 1908–1931, (2019).
- Okoffo, E. D., Tschärke, B. J., O'Brien, J. W., O'Brien, S., Ribeiro, F., Burrows, S. D., Choi, P. M., Wang, X., Mueller, J. F., ve Thomas, K. V., "Release of Plastics to Australian Land from Biosolids End-Use", *Environ. Sci. Technol.*, (54), 15132–15141, (2020).
- Oliveira, M., Ribeiro, A., Hylland, K., ve Guilhermino, L., "Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae)", *Ecol. Indic.*, (34), 641–647, (2013).
- Oliveri Conti, G., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., Fiore, M., ve 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., ve Dicke, W., "Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water", *Water Res.*, (141), 307–316, (2018).
- Palatinus, A., Viršek, M. K., ve Kaberi, E., "Protocol for Microplastics Sampling on the Sea Surface and Sample Analysis", *JoVE*, (2015).

- Pantoja Munoz, L., Gonzalez Baez, A., McKinney, D., ve Garelick, H., "Characterisation of “flushable” and “non-flushable” commercial wet wipes using microRaman, FTIR spectroscopy and fluorescence microscopy: to flush or not to flush", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, (25), 20268–20279, (2018).
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., ve Kumar, R., "A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater", *Environ. Technol. Innov.*, (21), 101261, (2021).
- Pedescoll, A., Sidrach-Cardona, R., Sánchez, J. C., ve Bécares, E., "Evapotranspiration affecting redox conditions in horizontal constructed wetlands under Mediterranean climate: Influence of plant species", *Ecol. Eng.*, (2013).
- Pierson, W. R. ve Brachaczek, W. W., "Airborne Particulate Debris from Rubber Tires", *Rubber Chem. Technol.*, (47), 1275–1299, (1974).
- Pignatello, J. J., Oliveros, E., ve MacKay, A., "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, (36), 1–84, (2006).
- PlasticsEurope, "Plastics – the Facts 2010", *Plast. – Facts 2010*, (2010).
- Prata, J. C., "Airborne microplastics: Consequences to human health?", *Environ. Pollut.*, (234), 115–126, (2018).
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Girão, A. V., Lopes, I., Duarte, A. C., ve Rocha-Santos, T., "Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples", *Sci. Total Environ.*, (686), 131–139, (2019).
- Prinz, N. ve Korez, Š., "Understanding How Microplastics Affect Marine Biota on the Cellular Level Is Important for Assessing Ecosystem Function: A Review", *Ocean. Our Res. Our Futur.*, 101–120, (2020).
- 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., ve 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., ve Palanisami, T., "Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant", *Water Res.*,

(173), (2020).

Rasmussen, L. A., Iordachescu, L., Tumlin, S., ve Vollertsen, J., "A complete mass balance for plastics in a wastewater treatment plant - Macroplastics contributes more than microplastics", *Water Res.*, (201), 117307, (2021).

Ribeiro, F., O'Brien, J. W., Galloway, T., ve Thomas, K. V., "Accumulation and fate of nano- and micro-plastics and associated contaminants in organisms", *Trends Anal. Chem.*, (111), 139–147, (2019).

Rillig, M. C., "Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?", *Environ. Sci. Technol.*, (46), 6453–6454, (2012).

Rist, S., Carney Almroth, B., Hartmann, N. B., ve Karlsson, T. M., "A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics", *Sci. Total Environ.*, (626), 720–726, (2018).

Rocha-Santos, T., Duarte, A., "Characterization and Analysis of Microplastics, Volume 75 - 1st Edition", (2017).

Rodrigues, M. O., Abrantes, N., Gonçalves, F. J. M., Nogueira, H., Marques, J. C., ve Gonçalves, A. M. M., "Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal)", *Sci. Total Environ.*, (633), 1549–1559, (2018).

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

Ryan, P. G., Cole, G., Spiby, K., Nel, R., Osborne, A., ve Perold, V., "Impacts of plastic ingestion on post-hatchling loggerhead turtles off South Africa", *Mar. Pollut. Bull.*, 107(1), 155-160, (2016).

Saeed, T. ve Sun, G., "A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media", *J. Environ. Manage.*, 112, 429–448, (2012).

Sait, S. T. L., Sørensen, L., Kubowicz, S., Vike-Jonas, K., Gonzalez, S. V., Asimakopoulos, A. G., ve Booth, A. M., "Microplastic fibres from synthetic textiles: Environmental degradation and additive chemical content", *Environ. Pollut.*, (268),

115745, (2021).

Sayed, A. E. D. H., Hamed, M., Badrey, A. E. A., Ismail, R. F., Osman, Y. A. A., Osman, A. G. M., ve Soliman, H. A. M., "Microplastic distribution, abundance, and composition in the sediments, water, and fishes of the Red and Mediterranean seas, Egypt", *Mar. Pollut. Bull.*, (173), 112966, (2021).

Van Sebille, E., England, M. H., ve Froyland, G., "Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters", *Environ. Res. Lett.*, (7), (2012).

Seidel, K., "Über die Selbstreinigung natürlicher Gewässer", *Naturwissenschaften*, (1976).

Seo, S. ve Park, Y. G., "Destination of floating plastic debris released from ten major rivers around the Korean Peninsula", *Environ. Int.*, (2020).

Sethulekshmi, S. ve Chakraborty, S., "Textile wastewater treatment using horizontal flow constructed wetland and effect of length of flow in operation efficiency", *J. Environ. Chem. Eng.*, (9), 106379, (2021).

Silva, A. L. P., Prata, J. C., Duarte, A. C., Soares, A. M. V. M., Barceló, D., ve Rocha-Santos, T., "Microplastics in landfill leachates: The need for reconnaissance studies and remediation technologies", *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, (3), 100072, (2021).

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

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

de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., ve Rillig, M. C., "Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems", *Glob. Chang. Biol.*, (24), 1405–1416, (2018).

Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., ve Seibert, B., "Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent", *Ecol. Eng.*, (2002).

Stock, F., Kochleus, C., Bänsch-Baltruschat, B., Brennholt, N., ve Reifferscheid, G., "Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment – A review", *TrAC Trends Anal. Chem.*, (113), 84–92, (2019).

- Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C. M., ve Ni, B. J., "Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal", *Water Res.*, (152), 21–37, (2019).
- Sun, X. D., Yuan, X. Z., Jia, Y., Feng, L. J., Zhu, F. P., Dong, S. S., Liu, J., Kong, X., Tian, H., Duan, J. L., Ding, Z., Wang, S. G., ve Xing, B., "Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*", *Nat. Nanotechnol.*, 159, (15), 755–760, (2020).
- Sundaravadivel, M. ve Vigneswaran, S., "Constructed Wetlands for Wastewater Treatment", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, (31), 351–409, (2001).
- Tagg, A. S., Sapp, M., Harrison, J. P., ve Ojeda, J. J., "Identification and Quantification of Microplastics in Wastewater Using Focal Plane Array-Based Reflectance Micro-FT-IR Imaging", *Anal. Chem.*, (87), 6032–6040, (2015).
- Tagg, A. S., Harrison, J. P., Ju-Nam, Y., Sapp, M., Bradley, E. L., Sinclair, C. J., ve Ojeda, J. J., "Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater", *Chem. Commun.*, (53), 372–375, (2016).
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., ve Setälä, O., "Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies", *Water Res.*, (123), 401–407, (2017).
- Tang, N., Liu, X., ve Xing, W., "Microplastics in wastewater treatment plants of Wuhan, Central China: Abundance, removal, and potential source in household wastewater", *Sci. Total Environ.*, (745), 141026, (2020).
- Thompson, R. C., Olson, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., ve Russell, A. E., "Lost at Sea: Where Is All the Plastic?", *Science*, (2004).
- Tilak, A. S., Wani, S. P., Patil, M. D., ve Datta, A., "Evaluating wastewater treatment efficiency of two field scale subsurface flow constructed wetlands", *Curr. Sci.*, (110), 1764–1772, (2016).
- Tirkey, A. ve Upadhyay, L. S. B., "Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics", *Mar. Pollut. Bull.*, (170), 112604, (2021).
- Tousignant, E., Fankhauser, O., ve Hurd, S., "Guidance Manual for the Design,

Construction and Operations of Constructed Wetlands for Rural For Rural Applications in Ontario", *AAC*, 1–164, (1999).

Toussaint, B., Raffael, B., Angers-Loustau, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio-Echevarria, I. M., ve Van den Eede, G., "Review of micro- and nanoplastic contamination in the food chain", *Food Addit. Contam.: Part:A*, (36), 639–673, (2019).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=DENIZLI>, (erişim: 26 Mayıs 2022).

UNEP, "Global lessons and research to inspire action and guide policy change", 1–187, (2016).

USEPA, "A handbook of constructed wetlands", (2013).

Vermeiren, P., Muñoz, C., ve Ikejima, K., "Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol", *Environ. Pollut.*, (262), 114298, (2020).

Verschoor, A. J., Milieutafel, D., ve Roex, E., "Quick scan and prioritization of microplastic sources and emissions", *RIVM Letter report*, (2014).

Vianello, A., Jensen, R. L., Liu, L., ve Vollertsen, J., "Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin", *Sci. Rep.*, (9), (2019).

Vignola, A., "Seasonal Variations in Microplastic Abundance in Treated Municipal Wastewater from Meriden and North Haven Wastewater Treatment Plants", (2020).

Vymazal, J., "Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience", *Environ. Sci. Technol.*, (2011).

Vymazal, J., "Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review", *Ecol. Eng.*, (61), 582–592, (2013).

Waldschläger, K., Lechthaler, S., Stauch, G., ve Schüttrumpf, H., "The way of microplastic through the environment – Application of the source-pathway-receptor model (review)", *Sci. Total Environ.*, (713), 136584, (2020).

Wang, Q., Hernández-Crespo, C., Santoni, M., Van Hulle, S., ve Rousseau, D. P. L., "Horizontal subsurface flow constructed wetlands as tertiary treatment: Can they be an efficient barrier for microplastics pollution?", *Sci. Total Environ.*, (721), 137785,

(2020).

Wang, Q., Hernández-Crespo, C., Du, B., Van Hulle, S. W. H., ve Rousseau, D. P. L., "Fate and removal of microplastics in unplanted lab-scale vertical flow constructed wetlands", *Sci. Total Environ.*, (778), 146152, (2021).

Wang, Q., Huang, K., Li, Y., Zhang, Y., Yan, L., Xu, K., Huang, S., Junaid, M., ve Wang, J., "Microplastics abundance, distribution, and composition in freshwater and sediments from the largest Xijin Wetland Park, Nanning, South China", *Gondwana Res.*, (108), 13–21, (2022).

Wang, Z. M., Wagner, J., Ghosal, S., Bedi, G., ve Wall, S., "SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts", *Sci. Total Environ.*, (603–604), 616–626, (2017).

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

Willis, K. A., Eriksen, R., Wilcox, C., ve Hardesty, B. D., "Microplastic distribution at different sediment depths in an urban estuary", *Front. Mar. Sci.*, (4), (2017).

Wright, S. L. ve Kelly, F. J., "Plastic and Human Health: A Micro Issue?", *Environ. Sci. Technol.*, (51), 6634–6647, (2017).

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

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., ve Liu, H., "A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation", *Bioresour. Technol.*, (175), 594–601, (2015).

Xi, B., Wang, B., Chen, M., Lee, X., Zhang, X., Wang, S., Yu, Z., ve Wu, P., "Environmental behaviors and degradation methods of microplastics in different environmental media", *Chemosphere*, (299), 134354, (2022).

Xia, F., Liu, H., Zhang, J., ve Wang, D., "Migration characteristics of microplastics based on source-sink investigation in a typical urban wetland", *Water Res.*, (213), 118154, (2022).

Xu, D., Yin, X., Zhou, S., Jiang, Y., Xi, X., Sun, H., ve Wang, J., "A review on the

remediation of microplastics using constructed wetlands: Bibliometric, co-occurrence, current trends, and future directions", *Chemosphere*, (303), 134990, (2022).

Xu, G., Liu, Y., ve Yu, Y., "Effects of polystyrene microplastics on uptake and toxicity of phenanthrene in soybean", *Sci. Total Environ.*, (783), 147016, (2021).

Xu, S., Ma, J., Ji, R., Pan, K., ve Miao, A. J., "Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects", *Sci. Total Environ.*, (703), 134699, (2020).

Yao, W., Di, D., Wang, Z., Liao, Z., Huang, H., Mei, K., Dahlgren, R. A., Zhang, M., ve Shang, X., "Micro- and macroplastic accumulation in a newly formed *Spartina alterniflora* colonized estuarine saltmarsh in southeast China", *Mar. Pollut. Bull.*, (149), 110636, (2019).

Yin, L., Wen, X., Du, C., Jiang, J., Wu, L., Zhang, Y., Hu, Z., Hu, S., Feng, Z., Zhou, Z., Long, Y., ve Gu, Q., "Comparison of the abundance of microplastics between rural and urban areas: A case study from East Dongting Lake", *Chemosphere*, (244), 125486, (2020).

Yu, Q., Hu, X., Yang, B., Zhang, G., Wang, J., ve Ling, W., "Distribution, abundance and risks of microplastics in the environment", *Chemosphere*, (249), 126059, (2020).

Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., ve Gao, P., "An Overlooked Entry Pathway of Microplastics into Agricultural Soils from Application of Sludge-Based Fertilizers", *Environ. Sci. Technol.*, (54), 4248–4255, (2020).

Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., ve 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, Q., Zhao, Y., Du, F., Cai, H., Wang, G., ve Shi, H., "Microplastic Fallout in Different Indoor Environments", *Environ. Sci. Technol.*, (54), 6530–6539, (2020).

Zhang, Z. ve Chen, Y., "Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal: A review", *Chem. Eng. J.*, (382), (2020).

Zhao, S., Danley, M., Ward, J. E., Li, D., ve Mincer, T. J., "An approach for extraction, characterization and quantitation of microplastic in natural marine snow using Raman microscopy", *Anal. Methods*, (9), 1470–1478, (2017).

Zhou, M., Wang, R., Cheng, S., Xu, Y., Luo, S., Zhang, Y., ve Kong, L.,

"Bibliometrics and visualization analysis regarding research on the development of microplastics", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 8953–8967, (2021).

Zhou, X., Zhao, Y., Pang, G., Jia, X., Song, Y., Guo, A., Wang, A., Zhang, S., ve Ji, M., "Microplastic abundance, characteristics and removal in large-scale multi-stage constructed wetlands for effluent polishing in northern China", *Chem. Eng. J.*, (430), 132752, (2022).

Ziajahromi, S., Neale, P. A., Rintoul, L., ve 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., Drapper, D., Hornbuckle, A., Rintoul, L., ve Leusch, F. D. L., "Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: Detection of tyre particles in sediment", *Sci. Total Environ.*, (713), 136356, (2020).

Zurier, H. S. ve Goddard, J. M., "Biodegradation of microplastics in food and agriculture", *Curr. Opin. Food Sci.*, (37), 37-44, (2020).