

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK KULLANIMLIK PLASTİK BARDAKLARDAN SIVI
GIDALARA MİKROPLASTİK ve NANOPLASTİK
GEÇİŞİNİN TESPİTİ

Selen AKBULUT

DOKTORA TEZİ

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Gıda Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK

Eş Danışman

Prof. Dr. Hasan YETİM

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEK KULLANIMLIK PLASTİK BARDAKLARDAN SIVI
GIDALARA MİKROPLASTİK VE NANOPLASTİK
GEÇİŞİNİN TESPİTİ**

Selen AKBULUT tarafından hazırlanan tez çalışması 01.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Gıda Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Hasan YETİM
İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Salih KARASU, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Mustafa YAMAN, Üye

İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi

Prof.Dr. Murat ÖZDEMİR, Üye

Gebze Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “ Tek Kullanımlık Plastik Bardaklardan Sıvı Gıdalara Mikroplastik ve Nanoplastik Geçişinin Tespiti” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selen AKBULUT

İmza

Canım annem, babam

ve

Biricik eşime



TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışması olarak sunduğum bu çalışmanın danışmanlığını üstlenen tecrübe ve bilgi birikimi ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK'e ve eş danışmanım Prof. Dr. Hasan YETİM'e bu süreçteki tüm sabırları, ilgileri ve katkıları için sonsuz teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca gerçekleştirdiğim analizlerde laboratuvar alt yapısını kullanmamı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği bölümü ve Üsküdar Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu'na çok teşekkür ederim. Çalışmam boyunca yapıcı eleştirileri ile çalışmama katkı sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Doç.Dr. Salih KARASU ve Sayın Doç.Dr. Mustafa YAMAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca değerli katkılarından dolayı doktora tez jüri üyelerim Prof.Dr. Murat ÖZDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT hocalarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında gerçekleştirdiğim analizlerde ve tüm bu süreçte özverili bir şekilde bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Perihan Kübra AKMAN'a, ne zaman yardıma ihtiyacım olsa her zaman yanımda olan İstanbul Gıda Kontrol Laboratuvar Müdürlüğü'nde görev alan Doç.Dr. İsra TOPTANCI hocama, SEM analizlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarından ötürü Öğr. Gör. Fatih Serdar SAYIN'a, bu süreçte anlayışları ile bana çok yardımcı olan Üsküdar Üniversitesi SHMYO yönetimine ve çalışma arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim. Tüm bu süreçte bana manevi desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında beni yalnız bırakmayan, karşılaştığım her sıkıntıda yanımda olduklarını bildiğim haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, annem Hatice AKÇAY ve babam Süleyman AKÇAY'a sonsuz teşekkür ederim. Beni her zaman manevi olarak destekleyen canım ablam Sedef YEŞİL'e çok teşekkür ederim. Doktora eğitimime başladığım ilk günden beri bana inanan, tüm bu süreçte gösterdiği sabır ve özveri ile beni her zaman destekleyen yol arkadaşım çok sevdiğim canım eşim Ufuk Çağlar AKBULUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Selen AKBULUT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
1.3 Hipotez.....	3
2 GENEL BİLGİLER	4
2.1 Literatür Özeti.....	4
2.1.1 Plastik Endüstrisi.....	4
2.2 Mikroplastik ve Nanoplastik Kavramı.....	8
2.2.1. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Çevreye Dağılımı ve Etkileri	11
2.2.2. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri	14
2.2.3. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Gıdalarda Bulunuşu	18
2.1.6 Gıda Ambalajlarından Gıdalara Mikroplastik ve Nanoplastik Geçişİ.....	25
2.3 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlanması	29
2.3.1 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlanmasında Optik Teknikler.....	29
2.3.2 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlama ve Nicel Analiz Metotları	32

3 MATERYAL-YÖNTEM	36
3.1 Materyal ve Sarf Malzeme Temini	36
3.2 Deney Dizaynı ve Mikroplastik İzolasyonunun Gerçekleştirilmesi	38
3.3 Mikroplastiklerin Tanımlanması.....	41
3.3.1 Diseksiyon Mikroskobu ile Mikroplastiklerin Sayımı.....	41
3.4 SEM Analizi	41
3.5 ATR-FTIR Analizi.....	42
3.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizinin Gerçekleştirilmesi ...	42
3.7 Ağır Metal Analizi	42
3.8 DLS Yöntemi ile Parçaçık Boyutu Ölçümü	43
3.9 Tüketici Maruziyet Durumunun Hesaplanması	43
3.10 İstatistiksel Analizler	44
4 SONUÇLAR ve TARTIŞMA	46
4.1 Tek Kullanımlık Plastik Bardaklardan Sıvı Gıdalara Geçen Mikroplastik Varlığının Tespiti	46
4.1.1 Mikroplastiklerin Renk-Şekil Özellikleri ve Boyut Dağılımının Belirlenmesi.....	54
4.2 ATR-FTIR Analizi.....	57
4.3 SEM Analizi	62
4.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi	65
4.5 Ağır Metal Analizi	71
4.6 DLS Yöntemi ile Parçaçık Boyutu Ölçümü Analizi.....	73
4.7 Tüketici Maruziyet Durumunun Belirlenmesi	75
5 SONUÇ	77
KAYNAKÇA	80
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	94

SİMGELİSTESİ

Al	Alüminyum
Cd	Kadmiyum
cm	Santimetre
Cr	Krom
dk	Dakika
g	Gram
Hg	Cıva
kg	Kilogram
L	Litre
m	Metre
mg	Miligram
mL	Mililitre
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
ng	nanogram
nm	Nanometre
Pb	Kurşun
Sb	Antimon
sn	Saniye
Zn	Çinko

KISALTMA LİSTESİ

BPA	Bis Fenol A
DLS	Dinamik Işık Saçılımı Spektrometresi
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
EPS	Ekstrüde Polistiren
EVA	Etilen vinil asetat
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
ICP-MS	İndüktif Olarak Eşleştirilmiş Plazma – Kütle Spektrometresi
KB	Kağıt Bardak
KV	Kilovolt
LLDPE	Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen
LLPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
mA	Miliamper
MP	Mikroplastik
NP	Nanoplastik
PBDE	Polibromlu difenil eter
PE	Polietilen
PET	Polietilen tere ftalat
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PVC	Polivinil klorür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TGK	Türk Gıda Kodeksi
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UV	Ultraviyole
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Bazı önemli endüstri dallarının yıllık plastik tüketimi.....	6
Şekil 3.1 Kullanılan plastik bardaklar	37
Şekil 3.2 Çalışmanın gerçekleştirilmesinde izlenen deney prosedürü	40
Şekil 4.1 Bardak türüne göre mikroplastik dağılımı.....	50
Şekil 4.2 Bardak türüne göre mikroplastik dağılımı (plastik kaşık kullanılan).....	51
Şekil 4.3 Mikroplastiklerin şekil dağılımı	54
Şekil 4.4 Mikroplastiklerin renk dağılımı.....	55
Şekil 4.5 Mikroplastiklerin boyut dağılımı.....	56
Şekil 4.6 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PP bardağa ait ATR-FTIR spektrumları	57
Şekil 4.7 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PS bardağa ait ATR-FTIR spektrumları	58
Şekil 4.8 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış EPS bardağa ait ATR-FTIR spektrumları	59
Şekil 4.9 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PE kaplı kağıt bardağa ait ATR-FTIR spektrumları	60
Şekil 4.10 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PET kaplı kağıt bardağa ait ATR-FTIR spektrumları	61
Şekil 4.11 Farklı sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardak iç yüzeylerinin SEM görüntüleri (1000× -3000×)	64
Şekil 4.12 Farklı su sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardaklara ait DSC grafikleri	68
Şekil 4.12 (devamı) Farklı su sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardaklara ait DSC grafikleri	69
Şekil 4.13 Nanopartiküllerin boyut dağılımı	74

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Plastiklerin sınıflandırılması	5
Tablo 2.2 Plastik atıkların boyut dağılımı	8
Tablo 2.2 (devamı) Plastik atıkların boyut dağılımı	9
Tablo 2.3 Mikroplastiklerin şekillerine göre sınıflandırılması	9
Tablo 2.4 Nanoplastiklerin belirlenmesinde ana özellikler.....	11
Tablo 2.5 Mikroplastik ve nanoplastik partikül boyutunun memeli canlılarda absorpsiyon durumu (Lusher vd., 2017)	15
Tablo 2.6 Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar	20
Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar.....	21
Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar.....	22
Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar.....	23
Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar.....	24
Tablo 2.7 Gıda ambalajlarından mikroplastik ve nanoplastik geçişinin incelendiği çalışmalar	27
Tablo 2.7 (devamı) Gıda ambalajlarından mikroplastik ve nanoplastik geçişinin incelendiği çalışmalar	28
Tablo 2.8 Mikroplastik identifikasyonunda kullanılan teknikler ile avantaj ve dezavantajları (Kwon vd., 2020).....	30
Tablo 2.8 (devamı) Mikroplastik identifikasyonunda kullanılan teknikler ile avantaj ve dezavantajları (Kwon vd., 2020)	31
Tablo 2.9 Mikro ve nanoplastiklerin analiz metotları (Adhikari vd., 2021)	32
Tablo 3.1 Bardak temin yerleri	38
Tablo 4.1 EPS bardağa ait sayım sonuçları (p/L)	46
Tablo 4.2 PS bardağa ait sayım sonuçları (p/L).....	47
Tablo 4.3 PET bardağa ait sayım sonuçları (p/L)	48
Tablo 4.4 PP bardağa ait sayım sonuçları (p/L).....	48
Tablo 4.5 PE bardağa ait sayım sonuçları (p/L).....	49
Tablo 4.6 Kullanım öncesi yıkama ve filtratta bulunan mikroplastik varlığı	53
Tablo 4.7 Farklı su sıcaklıklarına 20 dk. maruz bırakılmış plastik bardakların DSC değerleri	65
Tablo 4.7 (devamı) Farklı su sıcaklıklarına 20 dk. maruz bırakılmış plastik bardakların DSC değerleri	66

Tablo 4.8 Ağır metal migrasyon limitleri	71
Tablo 4.9 Plastik bardaklardan suya geçen ağır metal analizi sonuçları (ng/mL)	72
Tablo 4.10 Yıllık mikroplastik maruziyeti (MP/yıl)	76



Tek Kullanımlık Plastik Bardaklardan Sıvı Gıdalara Geçen Mikroplastik ve Nanoplastik Geçişinin Tespiti

Selen AKBULUT

Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fatih TÖRNÜK

Eş-Danışman: Prof. Dr. Hasan YETİM

Mikroplastikler çağımızın en dikkat çeken kirleticilerinden biridir. Mikroplastikler çevresel bir kirlilik etmeni olmasının yanında aynı zamanda gıdalar için de bir kontaminasyon kaynağıdır. Tek kullanımlık plastik bardaklar, özellikle sıcak ve soğuk içeceklerin tüketiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum ambalaj malzemeleri ile her içecek tüketiminde ne kadar mikroplastığa maruz kaldığımız sorusunu akıllara getirmiştir. Bu çalışmada, tüketiciler tarafından yaygın bir şekilde kullanılan beş farklı polimerik malzemeden üretilmiş [polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen (PE) kaplı kağıt bardak, polietilen tereftalat (PET) ve expanded polistiren (EPS)] bardaklardan sulara geçen mikroplastiklerin sayısı tespit edilmiştir. Ayrıca, tek kullanımlık bardaklardan suya mikroplastik transferi üzerinde bekleme süresi (0, 5, 10 ve 20 dk.) ve su sıcaklığının (4 °C, 50 °C ve 80 °C) etkisi de araştırılmıştır. Yine, araştırmada sıcak içecek tüketiminde plastik kaşık kullanımının etkisi de (50 °C ve 80 °C) belirlenmiştir. Çalışma sonucunda plastik kaşık kullanılmayan tüm deneylerde elde edilen ortalama mikroplastik geçişi, $574,33 \pm 374,12$ p/L olarak bulunurken, plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen sularda ortalama geçiş $901,00 \pm 650,04$ p/L olarak belirlenmiştir. En düşük geçiş

PE kaplı kağıt bardakta 4 °C ve 0. dk'da $126 \pm 75,72$ p/L düzeyinde iken, en yüksek mikroplastik geçişi, plastik kaşık kullanılan PS bardaklardan 80 °C ve 5. dk'da $2006,67 \pm 542,71$ p/L olarak bulunmuştur. Çalışmada PS ve EPS bardaklardan transfer olan mikroplastik sayıları istatistiksel olarak diğer bardak türlerinden daha yüksek bulunmuştur ve bu fark, istatistiksel açıdan da önemlidir ($p < 0,05$). Sürenin örneklerdeki partikül geçişi üzere istatistiksel bir etkisi tespit edilmemiştir ($p > 0,05$). Kullanımdan hemen önce bardakların su ile yıkanması ise mikroplastik geçişini %51 - 66 oranında azaltmıştır ve yıkamanın etkisi de istatistiksel açıdan önemli ($p < 0,05$) bulunmuştur. Çalışmada mikroplastiklerin transfer mekanizmasını açıklamak amacıyla, uygulanan farklı su sıcaklık derecelerinin bardak iç yüzeyinde meydana getirdiği kimyasal, morfolojik ve termal değişimler de ATR-FTIR, SEM ve DSC analizleri ile belirlenmiştir. Bardaklardaki sıvıya geçen olası nanoplastik boyut dağılımını belirlemek için DLS tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, en fazla mikroplastik sayımının gerçekleştirildiği örneklerde sıvıya geçen ağır metallerin tespiti de ICP-MS ile gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri, sıcak suya maruz kalmanın bir sonucu olarak tek kullanımlık bardakların yüzeyindeki aşınmayı kanıtlamıştır. Bazı dalga boylarındaki FTIR absorban seviyelerinin yoğunlukları da yüzey aşınmasının bir kanıtı olabilecek şekilde azalmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, sıcak ve soğuk içecek tüketiminin yaygın olduğu Türkiye'de yıllık 18.720 - 161.200 civarında mikroplastik/yıl parçacığına maruz kalındığını ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, insanların mikroplastik maruziyetinin seviyesi ve mikroplastiklerin potansiyel toksisitesi henüz tam olarak bilinmemesine rağmen gerektiğinde, bu çalışma ile tek kullanımlık bardaklardan soğuk ve sıcak içeceklere aktarılan mikroplastik miktarının belirlenmesi mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler: mikroplastik, tek kullanımlık plastik bardaklar, gıda güvenliği, tüketici maruziyeti.

Detection of Microplastic and Nanoplastic Transfer from Disposable Plastic Cups to Liquid Foods

Selen AKBULUT

Department of Food Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fatih TORNUK

Co-supervisor: Prof. Dr. Hasan YETIM

Microplastics are one of the most conspicuous pollutants of our time. Microplastics are not only an environmental pollutant but also a source of contamination of foods. Currently disposable plastic cups are widely used, especially for the consumption of hot and cold beverages. This situation has raised questions about the extent of microplastic exposure with every beverage consumption due to packaging materials. In this study, microplastic migration from five different polymer materials commonly used by consumers [polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyethylene-coated paper cup, polyethylene terephthalate (PET), and expanded polystyrene (EPS)] cups has been determined. The exposure time (0, 5, 10, and 20 minutes) and temperature (4 °C, 50 °C, and 80 °C) effects on the release of microplastics from single-use cups into water were also investigated. Additionally, the impact of using plastic spoons during hot beverage consumption (at 50 °C and 80 °C) was determined. The average microplastic migration obtained from all experiments where plastic spoons were not used was 574.33 ± 374.12 p/L, whereas in samples conducted with plastic spoons, it was 901.00 ± 650.04 p/L. The lowest migration was observed in the PE-coated paper cup at 4 °C for 0 minutes, with a

value of 126 ± 75.72 particles per liter (p/L), while the highest microplastic migration was in the PS cup with a plastic spoon at 80 °C for 5 minutes, measuring 2006.67 ± 542.71 p/L. The results of the PS and EPS cups were statistically significant ($p < 0.05$). The exposure time did not have a statistically significant ($p > 0.05$) effect on particle release in the samples. Pre-rinsing the cups with water just before use reduced the microplastic migration by 51 - 66%, and the effect of rinsing was statistically significant ($p < 0.05$). In order to elucidate the mechanism of microplastic release, the chemical, morphological, and thermal changes induced by different temperature levels on the inner surface of the cups were also determined by using ATR-FTIR, SEM, and DSC analyses. Size measurements of nanoparticle distribution released into the liquid in the cups were conducted using the DLS technique too. Additionally, the detection of heavy metals transferred to the liquid in samples with the highest microplastic count was performed using ICP-MS. SEM images demonstrated the surface abrasion of single-use cups as a result of exposure to the hot water. The intensities of FTIR absorbance levels at certain wavelengths decreased, possibly indicating evidence of surface abrasion. This study reveals that in Türkiye, where consumption of both hot and cold beverages is common, individuals are exposed to an annual range of 18.720 - 161.200 microplastic particles/year. In conclusion, given the incomplete understanding of human exposure levels to microplastics and the potential toxicity of microplastics, this study sheds light on the number of microplastics transferred from single-use cups to both hot and cold beverages.

Keywords: microplastic, disposable cups, food safety, human exposure.

1.1 Literatür Özeti

Plastikler çok fazla sayıda doğal ya da sentetik atomların oluşturduğu yüksek molekül ağırlığına sahip polimerlerdir. Bu polimerler kovalent bağ ile birbirine bağlanmış kimyasal birimlerin birbirini tekrar niteliğinde ve polimerizasyon tepkimeleri sonucunda oluşmuştur (Piringer ve Baner, 2008). Kontrolsüzce çevreye bırakılan plastikler fiziksel etkiler sonucunda veya bilinçli olarak endüstriyel amaçlarda kullanılmak üzere mikroplastik ve nanoplastik boyutuna indirgenmektedir. <5 mm'den küçük boyuta sahip olan plastik partiküllere '*mikroplastik*', <1 µm altında boyutlara sahip olan plastik partiküllere ise '*nanoplastik*' denmektedir (Yurtsever, 2019; Vitali vd., 2023).

İnsanlar sürekli etkileşim halinde olduğu ekosistemler aracılığı ile mikroplastik ve nanoplastiklere maruz kalmaktadırlar. Mikroplastiklerin vücuda girişindeki oral alım, inhalasyon ve cilt teması başlıca vücuda giriş yollarını oluşturmaktadır. İnsan derisinin mikroplastikleri boyutlarından dolayı geçirme ihtimali yoktur. Ancak mikroplastiklerden daha küçük boyutlarda bulunan nanoplastikler ve plastik madde ve malzemelerin üretiminde kullanılan katkı maddelerinin insan vücuduna geçişi yapılan bilimsel çalışmalarla kanıtlanmıştır (Prata, 2018; De-LaTorre,2020; Yee vd., 2021; Ebrahimi vd., 2022).

Mikroplastikler boyutlarından dolayı gıda zinciri ile pek çok tür tarafından biyoerişilebilir olarak kabul edilmektedir. Biyoerişilebilirlik durumu sadece mikroplastikler için değil aynı zamanda mikroplastiklerin içerdiği plastikleştiriciler, organik kirleticiler, patojen mikroorganizmalar içinde geçerlidir (Osman vd., 2023).

Gıdaların ve içeceklerin işlenmesi, dağıtımı, tüketimden önceki son işleme basamakları yiyecek ve içecekleri mikroplastikler ile kontamine etme yollarıdır (Hassan vd., 2023). Yapılan pek çok çalışma gıdalarda mikroplastik varlığını

kanıtlamıştır. İçerisinde mikroplastik olduğu tespit edilen bir çok gıda maddesinin (bira, bal, softa tuzu, meşrubatlar, soğuk çay, şeker, yumurta, içme suyu, mineralli sular, çeşme suyu, süt, konserve balık vb.) tüketimiyle mikroplastiklerin bir gıda kontaminantı olduğu belirlenmiştir (Liebezeit ve Liebezeit, 2013, 2014; Gündoğdu, 2018; Schymanski vd., 2018; Hernandez vd.,2019; Zhang vd.,2019; Baalkhuyur vd.,2019; Altunışık, 2023). Sadece gıdalarda değil gıdaların hazırlanmasında kullanılan araç gereçler ve gıda ambalajları da mikroplastik geçişine sebep olmaktadır (Du vd., 2020; Liu vd., 2021 Vitali vd., 2023).

Bu çalışmada, sıvı gıdaların tüketiminde yaygın olarak kullanılan polipropilen (PP), polistiren (PS), polietilen tereftalat (PET), polietilen (PE) kaplı kâğıt bardak ve expanded polistiren (EPS) malzemeden yapılmış tek kullanımlık bardaklardan farklı su sıcaklıklarında (4 °C, 50 °C ve 80 °C) ve farklı sürelerde (0,5,10 ve 20 dk.) mikroplastik geçişi araştırılmıştır. Ayrıca bardaklara kullanımından önce yıkama yapılmasının bu kontaminasyona etkisi belirlenmiştir. Ambalajdan sıvı gıdaya geçen plastiklerin günlük kullanımda tüketicileri ne kadar mikroplastığe maruz bıraktığı tespit edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, tek kullanımlık plastik bardaklardan sıvı içeceklere geçiş yapan mikroplastik türleri, varlığı ve karakterizasyonu, olası mikroplastik içeriğinin farklı sıcaklıklarda su kullanımıyla artış gösterip göstermeyeceği, günlük hayatta sıklıkla içecek tüketiminde kullanılan plastik bardakların mikroplastik geçişindeki rolünün belirlenmesidir.

1.2 Tezin Amacı

Karasal ve sucul ekosistemlerin plastikler ve bu plastiklerin parçalanma ürünleri ile kirlenmesi, ekolojik bir problem olmasının yanı sıra gıda güvenliği ve bunun sonucu olarak insan sağlığı için de risk teşkil etmektedir. Gıda maddelerinin ve içeceklerin ne derece mikro- ve nanoplastik kirlenmesine uğradığı ve insanların bunları tüketmesi ile hangi oranda nano-/mikroplastik maruziyetine uğradığı ise henüz net olarak bilinmemektedir. Bu konularda yapılmış çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu araştırmada ulaşmak istediğimiz temel hedefimiz, günlük hayatta sıvı içeceklerin tüketiminde en çok kullanılan tek kullanımlık bazı plastik bardakların mikro- ve nanoplastik taşıyıcısı olup olmadıklarının ortaya konulmasıdır. Ayrıca, tek kullanımlık plastikler ile sıvı gıdaların tüketimi sırasında “herhangi bir mikroplastik geçişi var mı?”, “Varsa ne ölçüdedir?”, “mikroplastik geçişi üzerine sıcaklık ve sürenin bir etkisi var mı, kaşık kullanımının durumu nedir” gibi bilinmeyenlerin açıklığa kavuşturulması, gıda ve içecek endüstrisi açısından büyük bir önem taşımaktadır. Böylelikle, tek kullanımlık bardak kullanarak içecek tüketen insanların ne düzeyde plastik partikül maruziyetine uğrayacakları belirlenebilecektir.

1.3 Hipotez

Gıdalarda ve çevresel örneklere mikroplastik varlığının belirlenmesi ve karakterize edilmesi son yıllarda en popüler araştırma başlıklarından birisidir. Farklı gıda rneklelerinde mikroplastik varlığı belirlense de hala gıda ambalaj malzemelerinden gıdalara geçiş yapan mikroplastik varlığının belirlenmesine dair çalışmalar çok kısıtlıdır. Ülkemizde özellikle gıda ambalajlarından gıda ve içeceklere mikroplastik geçişinin araştırıldığı çalışmalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Ayrıca mikroplastiklerin gıdalar aracılığı ile alınmasının insan vücuduna etkisi tam olarak hala bilinmezliğini korumaktadır.

Bu araştırmada, Türkiye’de tüketicilerin kolaylıkla temin edebilecekleri ve en çok kullanılan plastik bardak türlerinden farklı sıcaklıklarda içecek tüketimiyle ne kadar mikroplastiğe maruz kaldıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma başarı ile gerçekleştirilirse ülkemizde ilk kez günlük hayatta en çok kullanılan plastik bardaklardan tüketicilerin maruz kaldığı mikroplastik düzeyleri belirlenmiş olacaktır.

2

GENEL BİLGİLER

2.1 Literatür Özeti

2.1.1 Plastik Endüstrisi

Plastikler, normal sıcaklıkta katı halde bulunan ancak ısı ve basınç gibi fiziksel kuvvetlerin etkisiyle veya kimyasal yollar kullanılarak kalıplama veya haddeleme gibi yöntemler kullanılarak şekillendirilen organik polimer malzemelerdir. Bir organik bileşiğin veya farklı iki bileşiğin uygun reaksiyon koşullarında birbirine bağlanması ile oluşan bu karmaşık malzemeler binlerce molekülün bir araya gelerek oluşturduğu üç boyutlu polimerlerdir (Üçüncü, 2011).

Tüm plastik malzemelerde görülen ortak özellik polimerlerden oluşan omurgalarıdır. Bu polimerler çok fazla sayıda doğal ya da sentetik atomların oluşturduğu yüksek molekül ağırlığına sahip makro moleküllerdir. Bu polimerler kovalent bağ ile bağlanmış basit kimyasal birimlerin tekrarı niteliğindedir ve polimerizasyon tepkimeleri ile elde edilirler (Piringer ve Baner, 2008).

1920’li yıllara kadar plastik malzemeler yerine cam, metal, fildişi gibi malzemeler yaygın olarak kullanılırken, 1920’li yıllardan sonra plastiğin keşfi ile bu malzeme hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline almıştır. Bilinen ilk plastik selülozun kafur ile reaksiyona sokulmasıyla elde edilen seluloittir. Daha sonra polimerizasyon tepkilerinin anlaşılması ve bu alandaki gelişme ile daha fazla plastik malzeme üretilmiştir. II. Dünya Savaşı ile özellikle savaş alanlarında kullanımın yaygınlaşmasıyla plastikler neredeyse her alanda kullanılır hale geldi. Temel olarak petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtların kullanımıyla üretilen plastik malzemelerin her biri kendilerine özgü özelliklere sahiptir. Bu değişkenlik gösteren özellikleri ile pek çok plastik malzeme tüketicilerin kullanımına sunulmaktadır. Günümüzde 1’den 6’ya kadar reçine tanımlama numaralarına sahip en yaygın plastikler, 1936 ile 1984 yılları arasında piyasaya sürülmüştür. 1944 yılında PET, 1936 yılında polivinil klorür (PVC), 1955 yılında polipropilen (PP), 1957 yılında

PP ve 1937 yılında PS plastik endüstrisinde yerini almıştır (Janssens, 2022; Waring vd., 2018; Olatunji, 2022).

Polimerlerin farklı kimyasal yapılarından dolayı plastikler farklı fiziksel özelliklere sahiptir. Isı karşısında gösterdikleri davranış ve işlenme özelliklerinden dolayı sınıflandırılırlar. Tablo 2.1’de plastiklerin özelliklerine göre sınıflandırılmaları verilmiştir (Ahmed, 2023).

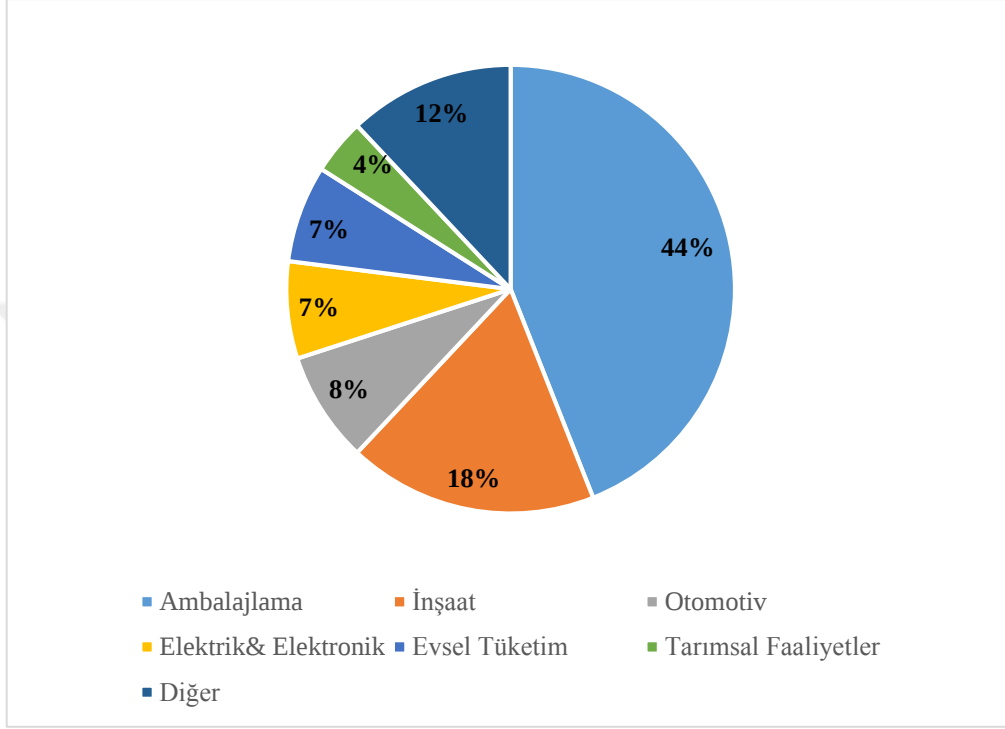
Tablo 2.1 Plastiklerin sınıflandırılması

Termoplastikler	Termosetler	Elastomerler
Polietilen	Alkidler	Vulkanize Kauçuk
Polipropilen	Melamin	
Polistiren	Epoksi Reçine	
Poliester	Fenolikler	
Polikarbonat	Polyester	
Polivinilasetat	Poliüretan	
Poliamidler		
Polietilentereflatat		

Tablo 2.1’de görüldüğü gibi, ısı ve basınç altında eriyen ve soğutulduğunda sertleşen sıklıkla kullanılabilen; ‘*termoplastikler*’, ısı ve basınç altında kimyasal olarak değişen, tekrar kullanılamayan; ‘*termosetler*’, kauçuk sınıfında değerlendirilen plastik maddeler; ‘*elastomerler*’ olmak üzere üç sınıfta değerlendirilir (Üçüncü, 2011).

Günümüzde neredeyse kullandığımız her malzemede plastikten yapılmış bir madde bulunmaktadır. Kimya ve malzeme bilimi başta olmak üzere pek çok endüstri dalında ve gıda zincirinde plastiklere rastlanmaktadır (Fonseca vd., 2017). 2022 yılında yayınlanan rapora göre, 2021 yılında dünyada 390,7 milyon ton plastik kullanmıştır. Bu plastiklerin sadece 32,5 milyon tonu geri dönüştürülmüş plastiklerden elde edilirken, 5,9 milyon tonu ise bio-plastiklerden oluşmaktadır (Janssens, 2022)

70 yılı aşkın zamandır sentetik polimerler, sanayi ve pek çok sektörde geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Artan üretim ile, halihazırda işlenmeye hazır 8300 milyon ton plastiğin bulunduğu ifade edilmektedir (Yates vd., 2019). 2021 yılında plastik tüketimini gerçekleştiren endüstri dalları Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Janssens, 2022).



Şekil 2.1 Bazı önemli endüstri dallarının yıllık plastik tüketimi

Şekil 2.1 incelendiğinde görüldüğü gibi, en fazla tüketim gerçekleşen sektör ambalajlama sektörüdür. Bu denli bir tüketimin olmasının bazı tercih sebepleri bulunmaktadır. Bunlar, plastiklerin sahip oldukları düşük üretim maliyetleri, hafiflik, kolay taşınabilirlik, çok yönlülük, bariyer özellikleri, yüksek mukavemet gibi özellikleridir. Özellikle gıda ve tarım sektörü polimerik ambalaj malzemelerinin sayılan avantajlarını çok fazla kullanmaktadır. Sadece endüstride değil gıda servis aracı olarak da tek kullanımlık plastik çatal-bıçak setleri ve bardaklar, gıda servisinde tercih edilen polimer ambalaj malzemelerinin kullanımı oldukça yaygındır (Jadhav vd., 2021; Zurier ve Goddard, 2021).

20. yy. da artan plastik tüketimi ile pek çok sektörde plastikten elde edilmiş ürünler çok daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bu sektörlerden birisi de gıda ambalaj sektörüdür. 1957 yılında ilk kez sandviçler plastik ambalajlara koyulmaya başlanırken, daha sonraki yıllarda içeceklerin PET ambalajlara koyulmaya başlanmasıyla plastik ambalajlar günlük hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline almıştır. Özellikle saklama ve taşıma kolaylığı sağlaması, ucuz ve hijyenik olması ve tüketicinin mutfakta harcadığı zamanı azaltması gibi özellikleri ile sıklıkla kullanılmaktadır (Kayan ve Küçük, 2020).

Tüketiciler son yıllarda küresel iklim değişikliği ve plastik kirliliğine dair artan oranda endişeler taşımaktadırlar. Günlük yaşamda plastikleri çevre sorunu olarak görmelerine rağmen, ürün tercihi ve tüketim kararı verirken plastik atık veya mikro-nanoplastik riskine odaklanmamaktadırlar. Daha çok odaklanılan durum, plastik ambalaj malzemesinin tekrar kullanılabilmesi, hafifliği, şeffaflığı ve ürünlerin fiyat-fayda ilişkisi olmaktadır (Heidbreder vd., 2021).

Ülkemizde de 2023 yılında üretilen 2,7 milyon ton toplam plastik üretiminin 1,5 milyon tonu en yüksek pay ile plastik ambalaj sektörüne aittir (Eroğlu, 2024). Her geçen gün artarak devam eden plastik üretimi ve tüketimi geri dönüşü olmayan çevresel problemlerin başlıca sebeplerinden birisidir (Fonseca vd., 2017). Gallego-Schmid ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, tek kullanımlık gıda ambalajlarının çevresel etkileri araştırılmıştır. Alüminyum, PP ve EPS malzemeden yapılmış gıda kaplarından karasal ekosisteme en fazla zarar verenin EPS olduğu tespit edilmiş, tekrar kullanılabilirlik oranı daha yüksek olan PP'nin ise daha iyi bir seçenek olduğu belirtilmiştir.

Plastik atık sorununun artmasına önemli ölçüde katkıda bulunan nedenlerden biri ise, çoğu plastiğin ambalaj gibi kısa süreli veya tek kullanımlık uygulamalar için kullanılması, yaklaşık dörtte birinin ise uzun süreli uygulamalar için kullanılmasıdır. Küresel ölçekte, plastik ambalajların %14'ü geri dönüştürülürken, %40'ı çöplüklerde birikmekte ve %14'ü yakma fırınlarında yakılmaktadır. Kalan %32'lik kısım sahalara, su kütlelerine veya havaya karışarak tüm ekosistemde büyük bir krize neden olmaktadır (Ahmed; 2023). Çevrede bulunan bu plastik

atıklar, zamanla fiziksel, kimyasal ve biyolojik yollarla mikro ve nano büyüklükteki parçacıklara ayrılmaktadır (Koyuncuoğlu, 2021).

2.2 Mikroplastik ve Nanoplastik Kavramı

Plastik atık oranının sürekli arttığı dünyamızda, çevreye bırakılan plastikler; güneş ışığı, rüzgar, akışlar, canlılar ve dalga etkisi gibi fiziksel etkiler sonucunda oldukça küçük boyutlu partiküllere dönüşmektedir. Bunun dışında çeşitli endüstriler tarafından tüketiciye sunulan ürünlerde de mikro ve nano boyutta plastik parçacıklar kullanılmaktadır. Boyutu <5 mm'den küçük olan plastik partiküllere '*mikroplastik*' denmektedir. (Fonseca vd., 2017; Welle ve Franz, 2018).

Nanoplastikler, mikroplastiklerin alt fraksiyonları olarak adlandırılmaktadır. <1 µm ve altında boyutlara sahip olan plastik partiküllere ise '*nanoplastik*' denmektedir. Yüksek termal ve elektrik yalıtım özelliklerine sahip, ucuz, hafif, güçlü, dayanıklı ve korozyona dayanıklı malzemelerdir. Kompakt boyutlarından dolayı inşaat, otomobil endüstrisi ve elektronik ve medikal endüstrilerinde geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Ramasamy ve Palanisamy, 2021). Nanoplastikler genellikle ya belirli bir amaç için üretilir ya da toprakta ve suda bozunma süreçleri sonucunda oluşur. Nanoplastikler, atık su arıtma tesisi atık sularından, biyosolidlerden ve çamur uygulamasından, malçlama örtülerinden, yüzey sularına, toprağa, deniz ortamına, atmosfere kolaylıkla yayılım göstermektedirler (Atugoda vd., 2023). Tablo 2.2'de plastik atıkların boyut dağılımlarına göre gruplandırılması ifade edilmiştir (Gesamp, 2015).

Tablo 2.2 Plastik atıkların boyut dağılımı

Sınıf	Boyut dağılımı	Görülebilirlik	Teknik
Makroplastik	100- 2,5 cm	Çıplak gözle	Görsel sayım
Mezoplastik	2,5- 0,1 cm (1000 µm)	Çıplak gözle veya optik mikroskopla	Neuston ağları ve elekler

Tablo 2.2 (devamı)Plastik atıkların boyut dağılımı

Mikroplastik	0,1 cm – 1 µm	Optik mikroskopla	<1 µm ayırabilen mikrofiltreler
Nanoplastik	<1 µm	Elektron mikroskopuyla	Nanofiltreler

Tablo 2.2’de görüldüğü gibi, plastikler çıplak gözle görülebilir boyuttan farklı etkiler nedeniyle elektron mikroskopunda incelenebilecek boyutlara kadar indirgenmektedir. Bu durum özellikle mikroplastik ve nanoplastik boyutuna indirgenen moleküllerin daha ileri düzey analiz metotlarıyla belirlenmesi zorunluluğunu da ortaya koymaktadır (Zada vd., 2018).

Mikro/nanoplastikler genellikle, PE, PP, PET, PS, PVC, polyester, poliakrilatlar ve naylon gibi polimer türlerinden oluşmaktadır. Mikroplastikler genellikle boncuk, küre, lif, granül gibi şekillerde bulunabilirken, nanoplastiklerin şekillerini tespit edecek yöntemler bulunmadığından henüz tam bir netlik kazanmamıştır (Cole vd., 2011; Koelmans vd, 2019). Mikroplastiklerin şekillerine göre sınıflandırılmasında beş sınıf üzerinden bir değerlendirme yapılmaktadır. Tablo 2.3’te mikroplastiklerin şekillerine göre sınıflandırılması ile ilgili tablo verilmiştir (Lusher vd., 2017)

Tablo 2.3 Mikroplastiklerin şekillerine göre sınıflandırılması

Şekil	Kullanılan Diğer İfadeler
Parça	Düzensiz şekilli parçacıklar, kristaller, tüyler, toz, granüller, talaşlar, pullar
Lif	Filamentler, mikro lifler, teller, iplikler
Boncuk	Taneler, küresel mikroboncuklar, mikroküreler
Köpük	Polistiren, Expanded Polistiren
Pellet	Reçine pelletleri

Mikroplastikler düşük yoğunluğa sahiptir ve kararlı kimyasal özellikler taşırlar. Taşıdıkları bu özelliklerden dolayı birincil (primer) ve ikincil (sekonder) olmak üzere iki sınıfta değerlendirilirler (Cole vd., 2011; Auta vd., 2017; Talukdar, 2023). Boyutları mikroskopik olan, endüstriyel ve evsel amaçlı üretilen ürünlerde bulunan plastik parçacıklar 'primer mikroplastikler' olarak adlandırılmaktadır. Büyük plastik parçacıkların parçalanması sonucu oluşan plastik parçacıklar ise 'sekonder mikroplastikler' olarak isimlendirilmektedir (Cole vd., 2011; Auta vd., 2017).

Primer mikroplastikler, genellikle kozmetik sanayi başta olmak üzere pek çok ürün içinde bulunmaktadır. Yüz temizleyiciler, peelingler, duş jelleri, diş macunları, parfümler, makyaj ürünleri (göz farı, fondöten, rimel vb.), güneş koruyucu gibi kişisel bakım ürünlerinin üretimde mikroplastikler kullanılmaktadır (Cole vd., 2011). Primer mikroplastikler üründen ürüne değişmekle birlikte genellikle mikroboncuk veya mikro-pul şekline sahiptirler ve ürüne göre boyut ve şekil değişimi göstermektedir. ABD'de tüketicilerin günlük kullanımda ~2,5 mg düzeyinde mikroboncuk tükettiği belirtilmektedir (Andrady vd., 2017; Auta vd., 2017).

Çevreye dağılmış halde ve okyanuslarda en fazla bulunan mikroplastik sınıfı sekonder mikroplastiklerdir. Bu mikroplastik sınıfı büyük plastiklerin farklı etmenler tarafından parçalanması ile oluşur (Andrady vd., 2017). Oluşum mekanizması ise, ultraviyole radyasyon veya mekanik aşınma sonucu meydana gelen yıkımlanmadır. Kanalizasyon çamuru veya kompostların temel kirleticileri sekonder mikroplastiklerdir (Auta vd., 2017; Verschoor vd., 2014). Sekonder mikroplastikler fiziksel, kimyasal ve plastiklerin biyolojik bozunması ile oluşan parçacıklardır. Yüzey akışları, su ürünleri yetiştiriciliği ve balıkçılık faaliyetleri ile ortaya çıkan atıksular, evsel ve endüstriyel tüketim sonucu açığa çıkan atıkların çevreye kontrolsüz dağılımı ile mikroplastikler okyanuslar başta olmak üzere ekosisteme dahil olurlar (Mao vd., 2022).

Primer ve sekonder sınıflandırma nanoplastikler içinde kullanılmaktadır. Primer (birincil) nanoplastiklerin boyutu 1000 nm'den düşüktür. Endüstriyel ve kişisel tüketim ürünlerinde kullanılmak üzere sentezlenmektedir. Sekonder (ikincil) nanoplastikler ise daha büyük polimer parçacıklarının 1000 nm'den daha küçük bir

boyuta kadar indirgenmesi ile oluşur (Atugoda vd., 2023). Nanoplastiklerin belirlenmesinde kullanılan ana özellikler Tablo 2.4'te verilmiştir (Gigault vd., 2018).

Tablo 2.4 Nanoplastiklerin belirlenmesinde ana özellikler

Kompozisyon	Çeşitli Faktörlerle İndirgenmiş Polimer Karışımları
Oluşum	Kendiliğinden (istemsiz)
Boyut	1 nm- 1mm
Boyut Dağılımı	Polidispers
Şekil	Asimetrik şekiller; heterejon
Yüzey Yüku	Organik ve inorganik materyallerden heterejon bir dağılım
Stabilite	Doğal ve/veya antropojenik kolloidlerle heteroagregasyon (Hem nanoplastiklere hem de çevresindeki ortamın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağılı olarak)
Kütle (Agregat)	Parçalanmış kümeler (oluşum sürecine bağılı olarak)

Tablo 2.4 incelendiğinde, nanoplastiklerin tanımlanmasında kullanılan ana fiziksel ve kimyasal parametrelere yer verilmiştir. Plastik çağını yaşadığımız bu yüzyılda mikroplastik ve nanoplastikler ekosistemleri istila etmişlerdir. Denizler, toprak, hava, yer altı suları ve gıdalar ciddi mikroplastik kirliliğinin gözlemlendiği ekosistemlerdir (Lee vd., 2022).

2.2.1. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Çevreye Dağılımı ve Etkileri

Plastik üretimi her yıl artan üretim eğilimi ile küresel bir endüstri dalıdır. Artan tüketim ve bu tüketim sonucu açığa çıkan plastik atıkların uygun bertarafının sağlanamaması ile sucul ekosistemlere karışan plastik atık miktarının 8 milyon tona yakın olduğu düşünülmektedir (Smith vd., 2018). Meydana gelen bu plastik kirliliği farklı ekosistemler için ciddi bir toksikolojik risk faktörüdür (Alimba ve Faggio, 2019). En çok plastik kirliliğine sucul ekosistemlerde rastlanmakla beraber

denizlerdeki atıkların %60-80 civarını plastikler oluşturmaktadır. Bu oran bazı alanlarda %90-95'e kadar yükselmektedir (Arı ve Ögüt, 2021).

Plastik kirliliğinin temel nedeni, plastik atıkların insanlar tarafından kontrolsüz bir şekilde doğaya bırakılması olarak nitelendirilse de aslında önemli bir diğer etmende, plastik endüstrisinin kar elde etme arzusudur. Ambalaj, inşaat, sağlık hizmetleri, paketlenme gibi endüstri dallarının vazgeçilmez malzemesi olan plastiklerin üretim kısmında 600 milyon dolar gelir elde edilmektedir. Doğada bozunma sürelerinin uzun olmasından dolayı plastikler kolaylıkla taşınım göstererek kirlilik oluşturabilmektedir. Büyük Pasifik Okyanusu yüzeyi bilinen en büyük çöp alanı olmasının yanında aynı zamanda orada yaşayan deniz canlılarından 180 kat daha fazla çeşide sahiptir (Yates vd., 2019; Kayan ve Küçük, 2020).

Sucul ekosistemlerin plastik atıklar yönünden artan kirliliğinin sebebi, antropojenik baskılardan kaynaklanmaktadır. Farklı boyutlardaki plastik atıklar Güney Kutbundan tropikal deniz diplerine kadar her yere yayılmıştır. Özellikle bu ekosistemde yaşayan canlıların gastrointestinal sistemlerinde plastiklere rastlanmaktadır (Selamoğlu Çağlayan ve Aytan, 2020).

Özellikle sucul ekosistemlerde yaygın olan mikro ve nanoplastikler başta zooplanktonlar olmak üzere, midye, çift kabuklular, balık, deniz memelileri ve deniz kuşları gibi pek çok canlının vücudunda tespit edilmiştir (Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014; Carbery vd., 2018). Mikroplastikler kum taneleri ve planktonlarla aynı boyutta oldukları için bu parçacıkları besin olarak canlılar vücutlarına almaktadırlar. Yutma yolu ile canlı vücuduna giren mikroplastik varlığı ise değişiklik göstermektedir (Cole vd., 2011).

Plastiklerin okyanuslarında yığılma göstermesiyle kirlilik durumu çok daha fazla görünür hale gelmiştir. Mavi yengeçler üzerine yapılan bir çalışmada, yengeçlerin yuttukları plastik partiküllerin solunum sistemi ve bağışıklık sistemi üzerine olumsuz etkileri gözlemlenmiştir. Balıklar üzerine gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, mikroplastiklerin tüketimi ile balıklardakaraciğer iltihaplanması meydana geldiği belirlenmiştir (Johnson vd., 2011; Huerta Lwanga vd., 2017).

Deniz canlıları ile beslenen 186 deniz kuşu türünde ise mikroplastik kaynaklı bağırsak tıkanıklığı ve toksin geçişi gözlemlenmiştir (Wilcox vd., 2015).

2014 yılında yapılan çalışmada, Avrupa’da insanların kabuklu deniz hayvanlarının tüketiminden yılda 11.000 plastik parçaya maruz kaldıklarını belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada denizlerdeki mikroplastik kirliliğinin insan sağlığında yol açacağı potansiyel risklerin henüz belirlenmediğini belirtilmektedir (Van Cauwenberghe ve Janssen, 2014).

Karasal hayvanlar üzerinde yapılan araştırmada, Meksika yerel bölgesinde halk tarafından tüketilen tavuk örnekleri ve topraktan tavuklara mikroplastik geçişi ile incelenen örneklerin mikroplastik içeriği araştırılmıştır. Çalışmada tavuk örnekleri ve 100 farklı toprak örneği (50 g) incelenmiştir. Her evin bahçesinden iki örnek olmak üzere 10 g tavuk dışkısı örneği çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada tavuk dışkısı, yemler ve tavuk taşlıklarında tespit edilen mikroplastik içeriği toprağa göre daha fazla oranda bulunmuştur. Yemlerde ise mikroplastik bulunamamıştır. Bu çalışmada, elde edilen veriler mikro ve makroplastiklerin karasal gıda zincirine de girebileceğini göstermektedir (Huerta Lwanga vd., 2017).

Plastik kirliliği denildiğinde ilk akla gelen sucul ekosistemler olsa da yapılan çalışmalar, hava ve toprakta da ciddi bir mikro ve nanoplastik kirliliği olduğunu ortaya koymuştur. Havada bulunan mevcut kirliliğin temel sebebi, yoğun kullanılan sentetik tekstil ürünlerinden kaynaklanan mikroplastik liflerdir (Dris vd., 2016; Yurtsever, 2019). Yapılan çalışmalar toprakta da mikro ve nanoplastik kirliliğini ortaya koymuştur. Plastik kontaminasyonunun aslında en büyük kaynağını karasal alanlar oluşturmaktadır. Üstü açık şekilde depolanan plastik atıklar, arıtılmamış kanalizasyon kaynakları, molozlarda bulunan plastiklerin rüzgar ile taşınımı karasal plastik kirliliği kaynaklarıdır (Waring vd., 2018).

Plastik atıkların farklı etkiler aracılığı ile mikroplastik boyutuna indirgenmesiyle toprak çok ciddi bir mikroplastik rezervuarı haline almıştır. Tarımsal araziler, endüstriyel ve kentsel alanlar dışında kutup bölgelerinde, uzak dağlık alanlarda da mikroplastik kirliliği tespit edilmiştir (Zhang vd., 2022). Dünyada artan plastik talebi doğrudan plastik atık oranını arttıracığı için gelecek yıllarda plastik atıkların

topraktaki oranının %32 olacağı tahmin edilmektedir. Plastik birikimi ile toprak, organik materyaller ve mineraller plastiklerle kararlı ve karmaşık bir yapı halini alacaktır (Bläsing ve Amelung, 2018; Kumar vd., 2020).

Tarımsal faaliyetlerde yaygın bir şekilde kullanılan plastik malzemeler büyük miktarda plastik atığın oluşumundan da sorumludur. Özellikle seracılıkta ve malçlama da en fazla kullanılan plastik türü düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)'dir. Tarımda kullanılan diğer plastik türleri arasında polivinil klorür (PVC), etilen vinil asetat (EVA) ve lineer LDPE (LLDPE) bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar, farklı tarımsal üretim modellerinin kullanıldığı tarım topraklarında 210-2000 partikül/ kg mikroplastik varlığını tespit etmiştir. Bu kirliliğin başta yüzey ve yer altı su kaynaklarını daha sonrasında ise gıda güvenliğini ve insan sağlığı olumsuz yönde etkileyeceği düşünülmektedir (Sa'adu ve Farsang, 2023).

2.2.2. Mikroplastik ve Nanoplastiklerin İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

Mikroplastiklerin varlığının tespit edildiği ortamlar incelendiğinde, sucul ekosistemler (deniz canlıları, içme suyu kaynakları), hava, toprak gibi sistemler ile karşılaşmaktadır. Ayrıca bu sistemlerle ilişkili her türlü canlının da mikroplastik kirliliğinden etkilendiği açık bir gerçektir (Chaunhry ve Sachdeva 2021). Mikroplastik boyutuna indirgenmiş olan plastiklerin memeli canlıların vücuduna etki mekanizması, maruz kalınan mikroplastik konsantrasyonuna ve partikül büyüklüğüne, polimer tipine ve canlı morfolojisine göre değişim göstermektedir (Lusher vd., 2017; Koyuncuoğlu, 2021).

İnsanlar sürekli etkileşim halinde olduğu ekosistemler aracılığı ile mikroplastik ve nanoplastiklere farklı yollarla maruz kalmaktadırlar. Maruziyet durumunun birinci yolu oral alımdır. Tüketilen gıdalar ve içme suyu kaynaklarından tüketiciler mikro/nanoplastiklere maruz kalmaktadırlar. Mikro/nanoplastiklere maruz kalmanın ikinci yolunu inhalasyon oluşturmaktadır. Mikro ve nanoplastiklerin havaya karışması ve buradan da su ortamlarına dahil olması ile kişisel temizlik sırasında kullanılan suyun solunması ile maruziyet oluşmaktadır. Bir diğer maruziyet ise cilt teması ile gerçekleşmektedir. İnsan derisinin mikroplastikleri boyutlarından dolayı geçirme ihtimali yoktur. Ancak nanoplastiklerin ve

plastiklerin üretiminde kullanılan toksik katkı maddelerinin açık yaralar, ter bezleri, saç folikülleri gibi bölgelerden vücuda geçişi gerçekleşebilir (Prata, 2018; De-La Torre, 2020; Yee vd., 2021; Ebrahimi vd., 2022). Tablo 2.5’te mikroplastik ve nano plastiklerin memeli canlılarda iç organ ve dokulara erişim durumu gösterilmiştir.

Tablo 2.5 Mikroplastik ve nanoplastik partikül boyutunun memeli canlılarda absorpsiyon durumu (Lusher vd., 2017)

Mikroplastik (0,1 -5000 µm)	Nanoplastik (1-100 nm)
>150 µm- Absorpsiyon bulunmamaktadır.	
<150 µm- ≤ %0,3 oranında lenf dokuda emilim	
= 110 µm-Portal damarda emilim	
≤ 20 µm Organlara erişim (≤20000 nm)	
	≤ 100 nm –Tüm organlara erişim bulunması ile kan-beyin hücrelerine translokasyon ve plasental bariyerden geçiş
	Absorpsiyon oranı %7’nin üzerinde

Tablo 2.5 incelendiğinde, partikül boyutu 150 µm ve daha küçük olan plastik partiküllerin mukozal bariyerden geçebileceğini gözlemlenirken, 1,5 µm’nin altındaki partikül boyutları daha derin dokulara ulaşabilmektedir (Lusher vd., 2017)

Nanoplastik ve mikroplastiklerin insan sağlığı üzerine etkilerini belirleyen en önemli parametrelerin başında maruz kalınan parçaçığın şekli, büyüklüğü ve yüzey kimyasının özellikleri gelmektedir. Nanoplastiklere, maruziyet durumundan ötürü gastrointestinal sistemde, akciğerlerde ve epitel dokularda rastlamak mümkündür. Her ne kadar mikroplastik ve nanoplastiklerin insan vücudundaki etki mekanizmasına ilişkin çalışmalar yeteri kadar olmasa da bu küçük parçacıkların patojen mikroorganizma, inorganik kirleticiler, ağır metaller gibi maddelerin taşıyıcısı oldukları da bilinmektedir. Gıdalar vasıtasıyla vücuda alınan bu parçacıklar hücre ve dokulara ulaşarak kronik etkiler ortaya çıkartabilir (Carbery vd., 2018; Yurtsever., 2019).

Oral yol ile maruz kalınan mikro ve nano plastiklerin boyutlarına göre farelerde biyolojik dağılım ve toksisitelerinin incelendiği bir çalışmada, farelere 28 gün boyunca (2,5–500 mg/kg vücut ağırlığı) oral yol ile verilen polistiren parçaçıkların bağırsak bozulmasına sebebiyet verdiği ve hücre geçirgenliğinin arttığı raporlanmıştır. Ayrıca sadece bağırsaklarda değil dalak, akciğer, böbrek, beyin ve üreme sistemi gibi uzak organlarda da birikim tespit edilmiştir (Liang vd., 2021; Stapleton vd., 2021).

Plastik üretiminde polimerik bileşikler ve bakır iyonları gibi kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Plastik üretimindeki katkı maddeleri kasıtlı olarak plastiğin renk, dayanıklılık ve yanma direnci gibi fiziksel özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Sadece mikro ve nanoplastiklerin kendileri değil aynı zamanda plastik malzemelerin üretiminde kullanılan ftalatlar, bisfenol A (BPA) ve polibromlu difenil eterler (PBDE) gibi yeni ortaya çıkan kimyasallarda plastik maddelerin aşınması ile çevreye salınmaktadır. Ortaya çıkan bu plastik ürünlerin ve kimyasalların flora, fauna ve insanlar için zararlı olduğu yapılan pek çok çalışma ile ortaya konmuştur Bu katkı maddeleri arasında ftalatlar ve BPA sadece endokrin bozucular olarak değil aynı zamanda kanserojenler olarak da tanımlanmıştır (Bang vd., 2012; Rai vd., 2021; Kasmuri vd., 2022).

Biyoerişilebilirlik durumu nanoplastikler içinde geçerlidir. Özellikle mikroplastiklerin daha da degradasyona uğramış hali olan nanoplastikler boyutlarından dolayı gıdalar aracılığı ile solunum yoluyla veya epitel yüzeylerden kolaylıkla geçebilmektedir. Nanoparçacık boyutlarından dolayı bağırsak-kan ve kan-beyin bariyeri gibi biyolojik engelleri kolayca geçerek doku ve organlarda birikime yol açabilmektedirler. Bu durumun daha da ileri boyutlarda hücre morfolojisini ve genlerin ifadelerini bile değiştirebileceği düşünülmektedir (Sana vd., 2020; Ramasamy ve Palanisamy, 2021).

Mohamed Nor vd., (2021) tarafından yapılan modelleme çalışmasında, çocuklar ve yetişkinler için mikroplastiğe maruz kalma dozu belirlenmiştir. Bu çalışmaya göre sekiz gıda maddesi ve solunum ile vücuda alınması muhtemel mikroplastik seviyesi farmakokinetik modelleme sonucunda bulunmuştur. Çalışmaya göre çocukların

553 partikül/kişi/gün, yetişkinlerin 883 partikül/ kişi/ gün mikroplastığe maruz kaldıkları tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, insanların derisinde, saçlarında ve tükürüklerinde mikroplastik parçacıklara rastlanmıştır (Abbasi ve Turner, 2021). Cox vd., (2019) yapılan bir başka çalışmada, yaş ve cinsiyete göre değişkenlik göstermekle birlikte ortalama 39.000 ile 52.000 partikül gıdalar aracılığı ile vücuda alındığı belirtilmiştir. Bu veriye inhalasyon ile vücuda alınan mikro (nano) plastikler dahil edildiğinde partikül sayısı 74.000-121.000 'e ulaşmıştır. Cilt teması plastiklere maruz kalmanın ilk yolu olarak kabul edilmese de maruz kalınan plastik boyutu 100 nm'den küçük plastik parçacıkların dermal bariyeri geçebildiği keşfedilmiştir (Ebrahimi vd., 2022).

Mikroplastik ve nanoplastiklerin canlılar üzerinde oluşturabilecekleri olumsuz etkiler tam olarak belirlenmemiş olsa da ilk kez 2021 yılında insan plasentasında mikroplastik tespit edilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında, altı adet insan plasentasının dört tanesinde 5-10 µm boyutunda toplam 12 adet mikroplastik bulunmuştur. Bulunan mikroplastiklerin kimyasal kompozisyonları Raman spektroskopisi ile tespit edilmiş ve üç tanesi PE olarak karakterize edilmiştir. Geri kalan 9 adet mikroplastik ise günlük yaşamda kullanılan plastik ürünlerin yapısında bulunan pigmentler olarak raporlanmıştır. Çalışmada fetüsün gelişimini destekleyen en önemli yapı plasenta da mikroplastik tespitinin hamilelik süreci ve fetüs gelişimi üzerine etkilerinin ciddi bir endişe kaynağı olduğu da vurgulanmıştır (Ragusa vd., 2021).

Schwabl vd., (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, insan dışkısında mikroplastik tespit edilmiştir. 33-65 yaş aralığında 8 sağlıklı gönüllünün katıldığı araştırmada, sekiz dışkı örneğinde de mikroplastik sonucu pozitif olarak bulunmuştur. 50-500 µm boyutunda ortalama 20 adet (10 g dışkı numunesinde) mikroplastığın belirlendiği örneklerde en çok plastik türü olarak PE ve PET tespit edilmiştir.

Solunum yolu ile insan vücuduna mikro ve nanoplastiklerin girişinin tespiti niteliğindeki bir çalışmada, Amato-Lourenço vd., (2021) tarafından otopsi ile elde edilen yirmi akciğer dokusu incelenmiştir. Bu örneklerden on üç tanesinde

polimerik parçacıklar tespit edilmiştir. Tespit edilen polimerik parçacıklar partikül şeklinde bulunanlar 5,5 µm'den küçükken, lif formunda olanların boyutları 8,12-16,8 µm olarak ölçölmüştür. Polimerlerin kimyasal özellikleri de belirlenmiş ve en çok PE ve PP bulunmuştur.

2021 yılında yapılan bir başka çalışmada, plasenta ve mekonyum örnekleri incelenmiş ve örneklerin PE, PP, PS ve poliüretan açısından pozitif veri taşıdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, sadece sezaryen doğum sırasında elde edilen plasentanın havadaki mikroplastiklerle kontamine olduğu ifade edilmiştir (Braun vd., 2021).

Zhang vd., (2021) tarafından yapılan çalışmada, üç mekonyum, altı bebek ve on yetişkin dışkısı incelenmiş ve hepsinde mikroplastik kontaminasyonu tespit edilmiştir. Tüm bebek dışkılarında ortalama 36000 ng/g PET, 76 ng/g PC mikroplastik bulunurken, yetişkin dışkılarının hepsinde de mikroplastik kirliliğine rastlanmıştır. Ancak çalışmada, yetişkin dışkılarında tespit edilen mikroplastik kirliliğinin bebeklere göre daha az olduğu belirtilmiş ve bebeklerin günlük mikroplastik maruziyetinin yetişkinlerden daha yüksek olduğunu ifade edilmiştir.

2022 yılında yapılan bir çalışmada, 22 sağlıklı gönöllüden alınan kan örnekleri incelenmiştir. Çalışmada kan örneklerinde PET, PE, PS polimerlerine ait plastik partiköller tespit edilmiştir. Bu durum insanların farklı etmenlerle maruz kaldıkları mikroplastiklerin kan dolaşımına dahil olabildiğini açıkça ortaya koymaktadır (Leslie vd.,2022).

2.2.3 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Gıdalarda Bulunuşu

Mikroplastiklerin vücuda girişi esas olarak kontamine olmuş gıdalar ve suyun tüketilmesi ile gerçekleşmektedir. Gıdalar ve içecekler ile vücuda en çok giren tespit edilmiş plastik türleri; PP, PET, PVC, PE, HDPE, LDPE, PA, PS, EPS vb. olarak ifade edilmektedir. Her gıda maddesi mikroplastik içermemektedir. Ancak gıdalara mikroplastik kontaminasyonu; hammadde içerisinde, üretim aşamalarında, paket malzemesi olarak kullanılan plastik ambalajlardan ve gıdanın bulunduğu ortamdaki hava gibi kaynaklar ile meydana gelmektedir (Hassan vd., 2023; Yurtsever, 2019).

Conti vd., (2020) yılında yapılan çalışmada, insanların günlük olarak alışveriş yaptıkları market ve manavlardan meyve (elma ve armut) ve sebze (havuç, patates, marul, brokoli) temin ederek bu ürünlerdeki mikroplastik ve nanoplastik varlığını tespit edilmiştir. Özellikle elma en çok kontamine olan meyve örneği olurken, havuç en fazla kontamine olan sebze olmuştur. Çalışmada, en küçük mikroplastikler havuç örneklerinde (1,51 μm), en büyükleri ise marulda (2,52 μm) bulunmuştur. Meyveler, sebzelere kıyasla en yüksek mikroplastik (<10 μm) kirlenmesini göstermiştir. Meyve ve sebze tüketerek günlük mikroplastığa maruz kalma dozunun da belirlendiği çalışma da yetişkinlerin çocuklardan daha yüksek bir maruziyete maruz kaldığı da ifade edilmiştir.

Toprakta mikro-nanoplastik kirliliği tespit edilse de kirli sular ile sulama, bitkileri korumak için kullanılan plastik malzemeler ve aletler, zirai kimyasalların mikrokapsülasyonunda ve tohumların kaplanması rol oynayan sentetik polimerler bitkileri kirlüten etmenler olarak belirtilmektedir. Bu plastik materyaller; bitki gelişimini desteklemek ve su verimliliği gibi amaçlarla kullanılan UV ışık ve diğer çevresel faktörler altında bozularak kontaminasyon oranını arttırmaktadır (Vitali vd., 2023).

Yapılan pek çok çalışma ile karasal ve sucul ekosistemlerde mikroplastik varlığı kesin olarak tespit edilmiştir. Farklı deniz canlıları türleri (balıklar, midyeler, martılar deniztarağı) ve kabuklu deniz canlıları (istiridye, midye vb.) boyutları nedeniyle mikroplastikleri yutarak vücutlarına almaktadırlar (Akçay vd., 2020). Bu deniz canlılarının ve mikroplastik içerdiği tespit edilen gıdaların (bira, bal, sofra tuzu, meşrubatlar, soğuk çay, şeker, yumurta, içme suyu, mineralli sular, çeşme suyu, süt, konserve balık vb.) tüketimiyle insan beslenmesine mikroplastiklerin girişi kanıtlanmıştır (Liebezeit ve Liebezeit, 2013,2014; Gündoğdu, 2018; Schymanski vd., 2018; Hernandez vd., 2019; Zhang vd., 2019; Baalkhuyur vd., 2019; Altunışık, 2023). Tablo 2.6'da gıdalarda mikroplastik ve nanoplastik varlığı belirlemek üzere yapılan çalışmalar, kullanılan gıda örnekleri, ortalama mikro-nanoplastik sonuçları, plastik parçacıkların boyutları ve türüne ait bilgiler ile kullanılan analiz metotları verilmiştir.

Tablo 2.6 Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar

Gıda Örneği	Ortalama Mikroplastik İçeriği	Mikroplastik boyutu	Hâkim Mikroplastik Türü	Analiz Metodu	Referans
Meksika’da satışa sunulan 8 farklı markaya ait süt örneği	Ortalama mikroplastik konsantrasyonu 3-11 p/L (n:23)	<0,5 mm (%40); 0,5-1 mm (%28); 1-2 mm (%25)	Termoplastik sülfon polimerleri (polietersülfon, polisülfon)	SEM-EDS ile görüntüleme ve Raman spektroskopisi	Kutralam – Muniasamy vd., 2020
5 farklı üreticiden temin edilen yumurta örnekleri	Ortalama: 11,67 ± 3,98 p/ yumurta	50–100 µm	PE	SEM-EDX ile görüntüleme-ATR-FT-IR ile tür tayini	Liu vd., 2022
27 farklı markaya ait toplam 57 içecek örneği	Ortalama: 28 ± 5,29 p/L,	Ortalama boyut: 0,1-3 mm	PA, PEST, PET, akrilonitril-bütadien-stiren	Vakum filtrasyon - SEM-Raman spektroskopisi	Shruti vd., 2020
10 adet Tetrapak ve PE şişe ile ambalajlanmış <1% yağlı süt örneği	Ortalama: 6,5 ± 2,3 p/L	> 11 µm	HDPE/LDPE, PP ve PAM	Filtrasyon- Mikroskop ile İnceleme - FTIR Spektroskopisi	Diaz-Basantes vd., 2020
19 bal örneği ve 5 farklı şeker örneği	147±166 p/kg bal; 217±123 lif /kg şeker ve 7±32 fragment/kg şeker	40 µm- 9 mm	-	Diseksiyon mikroskopu ile görüntüleme (30x)	Liebezeit ve Liebezeit , 2013

Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar

5 adet paketlenmiş ve 2 adet açıkta satışa sunulan şeker örneği	343,7 ± 32,08 p/kg şeker	<300 µm	ABS, PCV, PET, EVA, CA, PTFE, HDPE, PC ve naylon	Filtrasyon- Stereomikroskop Görüntüleme (x15)- FTIR Spektroskopisi	Afrin vd., 2022
7 farklı markaya ait 50 konserve balık örneği (ton balığı ve uskumru)	128 p / konserve toplam ürün (50 adet örnekte bulunan toplam miktar)	Belirlenen liflerin boyutu: 1–5 mm (n = 35), fragment boyutu: 10–50 µm (n = 20) ve filmlerin boyutu: 100–500 µm (n = 7)	PET, PS ve PP	Floresan Mikroskobu ile görüntüleme- SEM- Raman spektroskopisi	Akhbariza deh vd., 2020
5 farklı bal örneği	Siyah parçacıklar: 1760- 8680 p/kg Beyaz şeffaf lifler: 132- 728 p/kg Beyaz şeffaf parçacıklar: 60- 172 p/kg Renkli lifler: (32-108 p/kg Renkli parçacıklar (8-64 p/kg	-	Selüloz, PET	FTIR – ATR spektroskopisi	Mühlschle gel vd., 2017
16 farklı sofratuzu örneği	Deniz Tuzu: 16–84 p/kg, Göl Tuzu: 8–102 p/kg ve Kaya tuzu: 9–16 p/kg	20 µm-5 mm	PE, PP	Raman spektroskopisi	Gündoğdu, 2018

Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar

11 farklı sofra tuzu	Ortalama:9,77 p/kg		PET, PP, PE	Filtrasyon-Streomikroskop ile görüntüleme-FTIR spektroskopisi	Lee vd., 2019
146 hazır gıda ve içecek örneği	Ortalama 639 p/kg Katı gıdalarda: 0-5700 p/kg İçeceklerde: 0-730 p/L	$\leq 500 \mu\text{m}$	PET	Filtrasyon-Mikroskop ile görüntüleme-Raman spektroskopisi	Bai vd., 2022
21 farklı sofra tuzu örneği	Kaya tuzu:115-185 p /kg; Deniz tuzu:50-280 p/kg	-	PET, PP, PE, selofan	FTIR spektroskopisi	Iñiguez vd.,2017
10 farklı markaya tuz örnekleri	Kaya tuzu: 28 adet/g, Deniz tuzu: 56 adet/g ve Göl tuzlarında 63 adet /g	$\sim 300 \mu\text{m}$	PA türevi (Nylon 6,6) polimerler	Işık mikroskobu ve FTIR spektroskopisi	Yurtsever, 2018
Farklı ambalaj materyallerinde bulunan su örnekleri	Cam şişe 50±52 p/L Geri dönüştürülebilir şişe 118±88 p/L Tek kullanımlık şişe 14±14 p/L Karton ambalaj 11±8 p/L	Sırasıyla 5-10 μm , 10-20 μm , 20-50 μm , 50-100 μm ve >100 μm	PET, PS, PP, PE	Raman spektroskopisi	Schymanski vd., 2018
159 farklı bölgeden toplanan musluk suyu örneği	0-61 p/L (ortalama:5,45 p/L)	-		Filtrasyon (2,5 μm) /Rose Bengal ile biyolojik boyama/Diseksiyon mikroskobu ile inceleme	Kosuth vd., 2018

Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar

24 farklı bira örneği	Litrede sırasıyla 79 lif, 12-109 fragment ve 2-66 granül partikül	-	-	0,8 µm gözenek çaplı filtre ile filtrasyon /40 µm çelik filtre ile filtrasyon / FTIR ve Raman Spektroskopi ile görüntüleme	Liebezeit ve Liebezeit, 2014
30 adet meşrubat örneği (15'i PET; 15'i Tetrapak ambalajlı)	Ortalama mikroplastik içeriği 8,9 p/L	Ortalama partikül boyutu 214,03 (27–1213) µm	PA, PET, PE	Vakum filtrasyon - Stereomikroskop ile görüntüleme-FTIR	Altunışık, 2023
Farklı ambalaj materyallerinden temin edilen 22 farklı mineralli su örneği	-Depozitolu şişeler: 118 ± 88 p/L -Tek kullanımlık plastik şişeler: 14 ± 14 p/L -Cam şişeler: 0-253 p/L -Karton ambalaj: 11 ± 8 p/L	5 ve 20 µm (örneklerin %80'inde)	PET, PP, PE, Poliolefin	Raman Spektroskopi ile görüntüleme ve sayım	Schymanski vd., 2018
32 farklı mineralli su örneği	Tek kullanımlık/ Tekrar kullanılabilir PET şişeler: 2649 ± 2857 p/L Cam şişeler: 6292 ± 10521 p/L	Örneklerden elde edilen mikroplastiklerin; %95'i <5µm- %50'si <1,5µm	PP, PE, PET, PET+olefin ve düşük seviyede diğer plastik	Mikro-Raman Spektroskopi ile tanımlama	Oßmann vd., 2018

Tablo 2.6 (devamı) Farklı gıda örneklerinde mikroplastik varlığı üzerine araştırmalar

10 farklı markaya ait PET ambalajlı mineralli su örneği	Ortalama: 656,8 mg/L	Ortalama: 2,44 µm ± 0,66	-	SEM-EDX	Zuccarello vd., 2019
10 farklı markaya ait PET ambalajlı mineralli su örneği	Ortalama: 8,5 ± 10,2 p/L	-	PET, PS, PP	Vakum filtrasyon- Rose Bengal ile Boyama - ATR FTIR	Makhdoumi vd.,2021
Maden suyu kaynağından şişeleme aşamasına kadar her noktadan alınan numuneler	Ham su kaynakları: Toplam 4 kaynaktan 1 kaynak hariç diğerlerinde ortalama 97 MP /m ³ Deferrize Su örnekleri: 2 kaynak hariç diğer 2'sinde 46-53 MP /m ³ Kostik Yıkama Suyu: 489-3240 MP/ L Doldurulmuş kapatılmış şişe: 317 ± 257 MP/ L	Ham su kaynakları: 11-530 µm Deferrize Su örnekleri: 1-50 µm Kostik Yıkama Suyu:- Doldurulmuş kapatılmış şişe: 11-50 µm	Ham su kaynakları: PVC, PEST Deferrize Su örnekleri: PVC, PA, PEST Kostik Yıkama Suyu:- Doldurulmuş kapatılmış şişe: PE, PS	FTIR ile görüntüleme	Weisser vd., 2021

*PE: Polietilen; PS: Polistiren; PP: Polipropilen; PET: Polietilen tereftalat; PVC: Polivinilklorür, PA: Poliamid, HDPE: Yüksek yoğunluklu polietilen, LDPE: düşük

yoğunluklu polietilen, PEST: polyester, PAM: Poliakliramid, EVA: Etil Vinil Asetat, CA: selüloz asetat, PTFE: politetra floroetilen, PC: polikarbonat, MP: mikroplastik, p:partikül terimlerini ifade etmektedir.

Tablo 2.6 incelendiğinde, insanların günlük hayatlarında tükettikleri pek çok gıda maddesinde mikroplastik/nanoplastik partiküllerine rastlanmıştır. Bu durum gıda zinciri ile gastrointestinal yolla mikroplastik ve nanoplastiklerin memeli canlı vücuduna girişini kanıtlar niteliktedir. Tabloda örneklerin özellikleri, ortalama mikroplastik ve nanoplastik miktarı, boyutu, yaygın tespit edilen plastik materyali ve analiz metotlarına yer verilmiştir.

2.1.6 Gıda Ambalajlarından Gıdalara Mikroplastik ve Nanoplastik Geçişi

İnsanların günlük kullanım ürünlerinde yapılan araştırmalar sonucunda mikro-nanoplastiklere rastlanmıştır. Daha önce bahsedilen primer ve sekonder mikroplastik parçacıkların oluşumuna bakıldığında dayanıklı plastik malzemelerin yaygın kullanımı sonucu olduğu fikrine varılmaktadır. Özellikle kullan-at şeklindeki ürünlerin çok büyük bir kısmı tüketicilerin kolaylıkla mikro-nanoplastik parçacıklara maruz kalmasına sebep olmaktadır. Biberon, emzik, bebek losyonları gibi ürünlerin kullanımı ile bebeklerin yılda 1,6 milyon plastik parçacığa maruz kaldığı tespit edilmiştir (Li vd., 2020; Lee vd., 2023).

Tüketiciler gıdalar aracılığı ile mikro ve nanoplastiklere maruz kalmaktadırlar. Ancak gıdalar dışında kişisel temizlik malzemeleri (yüz ve vücut peelingleri, makyaj malzemeleri, hijyenik pedler, vb.) ile cilt temasıyla vücuda mikro-nanoplastik geçişi olmaktadır (Lee vd., 2023).

Dış mekân tezgahlarında hazırlanan sokak yemeklerinde hava kaynaklı ve plastik malçlama ile üretilen yaş meyve-sebzelerde ise toprak kaynaklı mikroplastik kirliliği oluşmaktadır. Bunun dışında çoğu sıcak tüketilen hazır yiyecek ve içecek plastik malzemelerden yapılmış bardaklar ve kutularda servis edilmektedir. Bu bardaklar ve gıda kapları, UV ışınması ve ısı varlığında yavaş yavaş bozunmaya başlar. Özellikle mekanik aşınma ve yıkama, plastik kapların tekrarlı kullanımı gıdayı kirleten fiziksel bozunma yoluyla mikroplastik oluşumuna neden olabileceği düşünülmektedir (Lee vd., 2019; Diaz-Besentes vd., 2020; Sewwandi vd., 2023).

Gıdalara hammadde ve üretim prosesleri kaynaklı mikroplastik kontaminasyonu dışındaki en önemli bulaşı kaynağı gıdaların ambalajlanmasında ve servisinde kullanılan plastik ambalaj malzemeleridir. Plastikleri oluşturan monomerler, ambalaj malzemelerinin üretiminde kullanılan katkı maddeleri ve kimyasal maddeler ambalaj malzemelerinden gıdalara farklı oranlarda kontamine olabilmektedir (Toussaint vd.,2019). Plastik partiküllerin geçişi tespit edilirken gıdanın fizikokimyasal özellikleri de dikkate alınmalıdır. Gıdanın pH değeri, hidrofobiklik durumu, yüzey özellikleri, mikrobiyotası, hem mikrobiyota hemde gıdanın kendisi tarafından salınan enzimler parçacıkların gıda ile temas eden malzemedan gıda matrisine transferini etkileyebilir (Vitali vd., 2023).

Son yıllarda artan yemek uygulamaları ile tüketiciler kolaylıkla bulundukları yere yemek siparişi oluşturabilmektedir. Bu durum doğrudan hazır yemek servislerinde kullanılan plastik gıda ambalajlarının kullanımını da arttırmıştır. Özellikle sıcak olarak servis edilen hazır yemeklerin sıcak bir şekilde plastik ambalajlarda muhafaza edilmesi ile daha fazla mikroplastik geçişi olduğu de tespit edilmiştir. Burada plastik partiküllerin geçiş miktarı birkaç ana faktöre bağlıdır. Bunlar, ambalaj malzemesinin başlangıç mikroplastik konsantrasyonu, gıdanın plastik kap içerisinde ne kadar süre depolandığı ve plastik malzemenin üretimi dahil bertaraf edilinceye kadar geçirdiği süreçte maruz kaldığı sıcaklıktır (Du vd., 2020; Liu vd., 2021).

Mikrodalgada gıdaların ısıtılmasında kullanılan plastik kaplardan da gıdalara mikroplastik geçişi tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada, gıdalara sadece mikroplastik migrasyonu değil aynı zamanda yönetmeliğin belirlediği geçiş miktarlarının üzerinde kasten ve kasıtlı ilave edilmeyen bileşen geçişi de tespit edilmiştir. Günde bir kez plastik paketli bir gıdayı mikrodalgada ısıtarak tüketen bir tüketicinin vücuduna ortalama 55,15 mg kasten ve kasıtlı ilave edilmeyen bileşen ve 150 milyon partikül mikroplastik geçeceği belirlenmiştir (He vd.,2021).

Luo ve arkadaşları tarafından (2023) yapılan bir çalışmada, mutfakta sıklıkla kullanılan araçlardan blender kullanımı ile salınan mikroplastik seviyesi incelenmiştir. Ultra saf suyun kullanıldığı çalışmada 30 dk çalışma ile blendırdan

$\sim 0,36-0,78 \times 10^9$ mikroplastik ve nanoplastik transferinin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu çalışma ile sadece gıda ambalajı kaynaklı değil, mutfakta kullanılan araç-gereçler ile de gıda maddelerine çok ciddi oranda bir mikro-nanoplastik kontaminasyonu olduğu açık bir gerçektir.

Hazır gıdaların teslimatı için kullanılan plastik gıda ambalajları (Hee vd ., 2022), ofis veya dışarıda servis malzemesi olarak kullanılan plastik bardaklar (Du vd., 2020; Fadare vd., 2020; Zhou vd., 2023), plastik su şişeleri, kahve için kullanılan kağıt bardaklar (Ranjan vd., 2021), plastik şişelenmiş su ve mineralli içeceklerden (Zuccarello vd., 2019, Makhdoumi vd.,2021), sıklıkla plastik bardaklardan içilen sıcak su ile tüketilen içecekler ve sallama çay (Hernandez vd., 2019 ;Laborda vd., 2021) gibi ürünlerden de tüketiciler farklı oranlarda mikroplastik ve nanoplastiklere maruz kalmaktadırlar. Yapılan çalışmalar plastik gıda kapları ve genellikle restoranlar tarafından yiyecek dağıtımı için kullanılan plastik ambalajların ilk kullanım sırasında mikro ve nanoplastiklerin gıdaya geçişinde rol oynadığını ortaya koymaktadır (Fadare vd., 2020; Liu vd., 2021; Nelis vd., 2023). Tablo 2.7’de gıda ambalaj malzemelerinden gıdalara mikro va nanoplastik geçişini konu alan çalışmalar ve analiz metotları verilmiştir.

Tablo 2.7 Gıda ambalajlarından mikroplastik ve nanoplastik geçişinin incelendiği çalışmalar

Ambalaj Örneği	Ortalama Mikroplastik İçeriği	Mikroplastik boyutu	Hâkim Mikroplastik Türü	Analiz Metodu	Referans
Gıda paket malzemesi (PS, PP, PET, PE)	3-29 partikül/ambalaj	30-1000 μm	Akrilik, Naylon, PEST, PP, PS, PE ve PET	Filtrasyon- μ -FTIR-SEM-	Du vd., 2020
İki tür paket malzemesi (PP ve 1 adet tek kullanımlık plastik bardak (PP))	-	0-0,210 μm	PP	Filtrasyon- SEM-FTIR spektroskopisi	Fadare vd., 2020

Tablo 2.7 (devamı) Gıda ambalajlarından mikroplastik ve nanoplastik geçişinin incelendiği çalışmalar

5 farklı PE kaplı Kağıt Bardak örneği	Ortalama 12,93±11,69 x 10 ⁵ parçacık/L	Ortalama 6,2±6,2 µm ile 18,2±14,5 µmP	PE, PA, PBA	İzolasyon-SEM-µ-Raman	Zhang vd., 2023
Tek kullanımlık Kağıt Bardak	Ortalama 25000 partikül/100 ml	25,9µm-764,8µm	HDPE, selüloz	Filtrasyon-SEM-AFM-İyon Kromotografi	Ranjan vd., 2021
PP, PET ve PE malzemeden plastik bardaklar	Ortalama 723-1489 partikül/bardak	Ortalama boyut :< 50 µm	-	Filtrasyon-SEM-FTIR	Zhou vd.,2023
3 farklı markaya ait çay poşetleri	Ortalama 1806 partikül	0,5-270 µm/17-1260 nm	Polilaktik asit, PET, PS	Filtrasyon-ATR-FTIR	Laborda vd., 2021
4 farklı markaya ait sallama çay örneği	Sallama çay poşetlerinde (ortalama) 1000 x görüntülemeye : 1200 partikül/mm ² 100000× görüntülemeye : 7 milyon mikronaltı partikül/ mm ²	1000× ve 100000× objektif ile alınan sonuçlar sırasıyla; A: 24,3±14,4 µm ve 102±22 nm, B:52,3±29,3 µm ve 171±78 nm, C:12,6±6,7 µm ve 357±156 nm D: 8,6±5,2 µm ve 229±116 nm	PET, Nylon 6,6	SEM-FTIR-XPS	Hernandez vd, 2019
5 farklı gıda ambalajı	10-710 partikül /L	-	PP, PET, PS, Selüloz, Selofan,	Filtrasyon-SEM-ATR-FTIR	Hee vd., 2022

*PE: Polietilen; PS: Polistiren; PP: Polipropilen; PET: Polietilen tereftalat; PA: Poliamid, HDPE: Yüksek yoğunluklu polietilen, PEST: polyester, PBA: polibutilen adipat terimlerini ifade etmektedir.

Tablo 2.7 görüldüğü gibi farklı plastik materyallerden üretilmiş gıda ambalajlarından gıda maddelerine mikroplastik ve nanoplastik geçişi tespit edilmiştir. Gıda ambalaj maddelerinden farklı gıda örneklerine geçişi belirleyen sınırlı sayıda araştırmanın olduğu da açıktır. Bu durum özellikle plastik

malzemelerle sıklıkla tüketilen sıvı gıdalara mikroplastik ve nanoplastik geçişinin belirlenmesinin güncel bir araştırma alanı olduğunu da göstermektedir.

Joseph vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada, Monte Carlo Similasyon programı kullanılarak tüketicilerin kâğıt bardaklardan sıvı alımında maruz kalacakları mikroplastik ve florid miktarı araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, kâğıt bardakların plastik astarından sıcak suya geçen mikroplastik ve florid seviyesinin kritik alım düzeyi ve ömür boyu alım miktarını belirlemektir. Dünya genelinde 13 ülkede insanların 120 ml ile 1030 ml sıcak içecek tüketimi gerçekleştirdiğini belirten çalışma sonucunda, günde tüketicinin kilogramı başına $0,03 \pm 0,025$ mg/mikroplastik alımı ve $7,04 \pm 8,8$ µg florid alımı oluşacağı öngörülmüştür.

Kedzierski vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, ekstrüde polistiren (EPS) tabaklar ve streç film ile kaplı ambalajlar içinde satışa sunulan tavuk (1 paket) göğüs eti ve hindi (3 paket) göğüs etine bu ambalajlardan geçen mikroplastik seviyesi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, göğüs etlerinde EPS tabak kaynaklı bir mikroplastik geçişi olduğu tespit edilmiştir. Bu geçiş 4,0 ila 18,7 MP-XPS/kg göğüs eti olarak tespit edilmiştir. Bu durum seçilen ambalaj materyalinin et ürünlerinin yüzeyini kirlettiğini ve ambalaj materyalinden gıda mikroplastik geçişi olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

146 yemeğe hazır katı gıda ve içecek (bubble tea ve kahve) örneklerindeki mikroplastik kontaminasyonunun araştırıldığı başka bir çalışmada, ortalama mikroplastik varlığı 639 parçacık/ kg olarak tespit edilmiştir. En yüksek kirlilik pirinç örneğinde, en düşük kirlilik ise kahve örneklerinde bulunmuştur. Haftada 1-2 kez hazır gıda tüketen bir bireyin yaklaşık 170-638 mikroplastik parçacık da tüketeceği ortaya konmuştur (Bai vd., 2022).

2.3 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlanması

2.3.1 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlanmasında Optik Teknikler

Mikroplastik numunelerin boyutlarına ve şekil özelliklerine göre (lif, küresel, granüler, film vs.) sınıflandırılmasında diseksiyon mikroskobu kullanılırken,

elemental kompozisyonun belirlenmesinde SEM/EDS analizi yaygın bir şekilde yapılmaktadır (Eriksen vd., 2013).

Stereo- (veya diseksiyon) mikroskop ile görüntüleme, mikroplastiklerin boyut ve şekil özelliklerine göre tanımlanmasında kullanılan yaygın bir yöntemdir. Özellikle yüksek büyütme gücü sayesinde partiküllerin yüzeyleri ve yapısal özellikleri hakkındaki bilgilerin toplanmasını sağlar. Boyutu <100 µm ve aşağısındaki daha küçük parçacıkları bu yöntem ile tanımlamak güçtür (Shim vd.,2017; Esmeray ve Armutçu, 2020; Thaiba vd.,2023).

Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscopy, SEM), mikroplastik ve nanoplastikleri yüzey görüntülemesinde kullanılan yüksek çözünürlüklü bir görüntüleme metodudur (Mariano vd., 2021; Thaiba vd.,2023). Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile SEM, yalnızca morfolojik (şekil) ve boyut parçacıkların bilgisini değil aynı zamanda, temel bileşim veya kimyasal kimlik hakkında da fikir sahibi olunmasını sağlayan bir uygulamadır (Shim vd.,2017; Mariano vd., 2021). Tablo 2.8’de mikroplastiklerin tanımlanmasında yararlanılan metotlar verilmiştir.

Tablo 2.8 Mikroplastik identifikasyonunda kullanılan teknikler ile avantaj ve dezavantajları (Kwon vd., 2020)

İdentifikasyon Metodu	Avantajları	Dezavantajları
Görsel İnceleme	Ucuz, hızlı analiz	Olası pozitif partikül algılanması
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	Partikül boyut sınırlaması bulunmaması	Olası yanlış pozitif algılama
Görüntüleme / FTIR	Görsel Analiz ile birleştğinde kimyasal polimerin doğrulanması, hızlı tarama	Boyut 20µm ile sınırlı

Tablo 2.8 (devamı) Mikroplastik identifikasyonunda kullanılan teknikler ile avantaj ve dezavantajları (Kwon vd., 2020)

Görüntüleme/ RAMAN	Görsel analiz ile birleştğinde, kimyasal polimerlerin doğrulanması, birkaç mikrometre partikül boyutunun belirlenebilmesi	Pahalı, Zaman alıcı
Termal Dekompozisyon/ GC-MS	Kütle ölçümlerinde kolaylık	Boyut dağılımı hakkında bilgi vermemesi, kalibrasyon gerekliği

Gıdalarda mikroplastik ve nanoplastik varlığını belirlemek için Tablo 2.8’de görüldüğü gibi, diseksiyon mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), floresans mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) gibi optik görüntüleme metotları kullanılmaktadır. Alternatif bir diğer görüntüleme yöntemi ise floresan görüntülemedir. Boyalı bir numuneden gelen floresan sinyali, bir floresan mikroskobunda uygun uyarma/toplama filtre setleri kullanılarak toplanır. Beyaz veya saydam parçacıkların tanımlanmasında iyi bir zıtlık oluşturması tanımlamayı kolaylaştırmaktadır. Ancak bir numunede floresan kimyasal katkı maddeleri ve safsızlıklar varsa, floresan görüntüleme yönteminin seçiciliği ve doğruluğu azalır (Thaiba vd., 2023).

Bir diğer görüntüleme metodu olan geçirimli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscope, TEM), örnek içinden geçirilen yüksek enerjili elektronların görüntülenmesi prensibi ile görüntüleme yapan, çok yüksek bir çözünürlük gücüne sahip bir yöntemdir. Bu sayede çok küçük moleküllerin bile görüntülenmesini sağlar. TEM, nanomalzemelerin karakterizasyonunda yapısal ve elemental içerik hakkında bilgi vermesi ve görüntüleme tekniği olarak en çok kullanılan metottur. TEM daha çok nanopartiküllerin analizinde kullanılırken mikroplastiklerin karakterizasyonunda genellikle tercih edilmemektedir (Mariano vd., 2021).

Dinamik ışık saçılımı spektrometresi(DLS), partikül boyutu 1 μm 'den küçük olan nanoplastiklerin belirlenmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. DLS bir çözelti içerisindeki nanoplastiklerin saçtığı ışığın şiddeti ve değişimi üzerine ölçüm

gerçekleştirmektedir. Bu sayede yapılan analiz sonucunda nanopartikülün boyutu hakkında da fikir sahibi olunabilmektedir (Ateş, 2018; Huang vd., 2023).

2.3.2 Mikroplastik ve Nanoplastiklerin Tanımlama ve Nicel Analiz Metotları

Mikroplastik ve nanoplastiklerin dağılımı ve çevresel etkilerinin belirlenmesi için karakterize edilmeleri gerekmektedir. Mikro ve nano plastik parçacıklar karmaşık ve çeşitli özelliklere sahiptir. Tanımlanmaları sırasında birbirlerinden farklılık gösterdikleri; boyut, şekil özellikleri, yoğunlukları, polimer türleri, yüzey özelliklerinden yararlanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, kimyasal karakterizasyon belirlenirken kullanılan teknikler arasında taramalı elektron mikroskobu-enerji dağıtıcı X-ışını, Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Raman spektroskopisi, termal analiz, kütle spektrometresi bulunmaktadır (Ramasamy ve Murugan, 2022; Huang vd., 2023). Tablo 2.9’da çeşitli matrislerden mikro ve nanoplastik izolasyon, parçalama ve ölçüm metotları özetlenmiştir.

Tablo 2.9 Mikro ve nanoplastiklerin analiz metotları (Adhikari vd., 2021)

Matris	Ayrırma Metodu	Parçalama Metodu	Belirleme/ Miktar Tayini/ Karakterizasyon metotları
Biyota, biyolojik numuneler, doku örnekleri, çamur, çökelti, hava, su, gıda,	Elektro, santrifüj, elektro ayrıcı, yoğunluğa bağlı ayırım (sodyum iyodür (NaI), sodyum klorit (NaCl), çinko klorür (ZnCl ₂), sodyum Politungstat)	Alkali sindirim: Potasyum hidroksit (KOH), sodyum hidroksit (NaOH) Oksidatif sindirim: Hidrojen peroksit (H ₂ O ₂), Fenton reaktifi Asidik sindirim: Nitrik asit (HNO ₃), Perklorik asit (HClO ₄), sodyum Hipoklorit (NaClO) -Enzimatik parçalama: Selüloz, lipaz, kitinaz, proteaz	Optik mikroskop, stereomikroskop, Floresan mikroskobu, SEM enerjisi dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM/EDS), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Raman, gravimetrik, piroliz gazı kromatografi-kütle spektrometrisi (Py-GC-MS), sıvı kromatografi kütle spektrometresi (LC-MS/MS)

Tablo 2.9’da görüldüğü gibi farklı kaynaklardan elde edilen mikroplastik ve nanoplastiklerin tanımlanması genellikle üç basamaktan oluşur. Bunlardan birincisi, ortamdan mikroplastik ve nanoplastiklerin izolasyonu için numune alma ve hazırlama olarak belirtilmiştir. Numune hazırlamanın ardından mikro ve nanoplastikler, morfolojilerini (şekilleri ve boyutları), kimyasal bileşimlerini (polimer türleri ve katkı maddeleri) ve bolluklarını (sayısal veya kütle konsantrasyonları) belirlemek için analiz edilir (EFSA,2016; Adhikari vd., 2021; Fang vd., 2023).

Plastiklerin tanımlanmasında malzemeye zarar vermeden, düşük miktarlarda örnekle tanımlama yapabilen Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FT-IR) ve Raman teknikleri en çok kullanılan metodolojiler arasındadır. FTIR ile karşılaştırıldığında, Raman teknikleri daha iyi uzamsal çözünürlük (FTIR’ın 1-20’sine karşı 1 μ m’ye kadar), daha geniş spektral tarama alanı, polar olmayan fonksiyonel gruplara karşı daha yüksek hassasiyet gösterir. Ancak Raman tekniği plastiklerin bozunma sürecinin tespitinde FTIR kadar hassas ölçüm yapmamaktadır. Bu durum bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir (Oliveira ve Almeida, 2019).

Mikroplastiklerin kimyasal karakterizasyonunda en sık kullanılan metotlardan birisi FTIR spektroskopisidir. Yüksek güvenilirlik oranı nedeniyle izole edilen partiküllerin tanımlanmasında oldukça başarılı bir yöntemdir (Käppler vd., 2016; Shim vd., 2017; Esmeray ve Armutçu, 2020). Mikroplastiklerin analizinde FTIR’ın üç modu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar iletim, yansıma ve zayıflatılmış toplam yansıma (ATR)’dır (Chen vd., 2020)

Mikroplastiklerin incelenmesinde farklı IR tekniklerinden yararlanılmaktadır. Bu tekniklerden birisi ATR-FTIR olarak adlandırılan katı, sıvı veya yarı katı formdaki malzemelerin analizine olanak sağlayan yöntemdir. ATR- FTIR ile gerçekleştirilen analizlerde parçaçık ATR-FTIR kristali ile temas halinde olmalıdır. ATR-FTIR ile kalın ve opak mikroplastikler herhangi bir numune hazırlığına gerek kalmadan analiz edilebilmektedir. Ayrıca düzensiz yüzeyli parçaçıkların analizini de mümkün kılan bir tekniktir (Chen vd., 2020; Vitali vd.,2022).

Mikroplastiklerin tanımlanmasında yararlanılan bir diğer teknik mikro-FTIR (μ -FTIR)'dır. μ -FTIR tekniği FTIR'ın mikroskopi ile birlikte uygulanması ile artan çözünürlük sayesinde daha küçük örneklerin tanımlanmasını gerçekleştirebilmektedir. Plastiklerin tanımlanmasında geçiş ve yansıma modunda μ -FTIR kullanılabilir. Yapılan analizlerde geçiş modunda yüksek kalitede spektrum sağlanırken, yansıma modunda kalın ve opak mikroplastik örnekleri kolaylıkla analiz edilebilmektedir (Tagg vd., 2015; K  ppler vd., 2016).

RAMAN spektroskopisi de FTIR gibi, ışık ile maddenin etkileşimi sonucu maddenin moleküllerindeki titreşimler vasıtasıyla kimyasal ve moleküler yapısının aydınlatılmasında kullanılan yaygın bir tekniktir (O  mann vd., 2018). <20 μ m boyutlarındaki mikroplastiklerin tanımlanmasında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Mikro ve nanoplastiklerin tespiti için, teknik bir mikroskopla birlikte kullanıldığında, yönteme mikro (μ)-Raman denir. Raman spektroskopisi de FT-IR ile benzer şekilde maddenin polimer kimliği hakkında bilgi sağlar. Yöntemin en büyük avantajlarından birisi düşük numune miktarına ihtiyaç duymasıdır. Aynı zamanda taranan polimerlerin stereoreg  l  rliğini de karakterize eder. Raman spektroskopisi son yapılan çalışmalarda, 100 nm kadar küçük boyutlu nanoplastiklerin varlığını doğrulamak içinde kullanılmıştır (Adhikari vd., 2021).

Katı ve sıvı örneklerdeki elementlerin hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlayan indüktif olarak eşleştirilmiş plazma – Kütle Spektrometresi (ICP-MS) niteliksel ve niceliksel anlamda ölçüm yapmaya yardımcı ileri teknik bir analiz metodudur. ICP-MS yöntemi numunelerin elementel kompozisyonun karakterize edilmesinde ve miktarının belirlenmesinde kullanılır. Burada 7-250 atom kütlesi olan metaller ve ametallerden analiz edilebilmektedir (Ateş, 2018).

Mikroplastiklerin kimyasal analizler yardımıyla belirlenmesinde başlıca kullanılan metot terma degradasyona dayalı GC/MS'dir. Özellikle   vre ve gıda örneklerinde plastik kontaminasyonunun tanımlanmasında ve miktarın belirlenmesinde belirli sıcaklık aralıklarında plastiklerde oluşan bozunma (  oğunlukla piroliz, py)   r  nleri üzerinden bir belirleme yapılmaktadır. Piroliz sonucu meydana gelen bozunma ürünleri aracılığı ile polimerin kütlesi, uçucu bileşenlerin moleküler düzeyde

belirlenmesi ve miktar tayini gerçekleştirilebilmektedir. TED-GC/MS yaklaşımlı analizde ise termogravimetrik analiz cihazı (TGA) ile numunuler hazırlanmaktadır. Genellikle inert gaz (N₂) ile piroliz işlemi kontrollü olarak 600 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda analiz gerçekleştirilir. TGA'nın FTIR spektroskopisi veya GC-MS gibi analitik cihazlarla birleştirilmesi, gaz halindeki ayrışma ürünlerine dayalı polimerlerin karakterize edilmesinde de önemli bir avantaj sağlamaktadır (Ivleva, 2021; Mansa ve Zou, 2021).

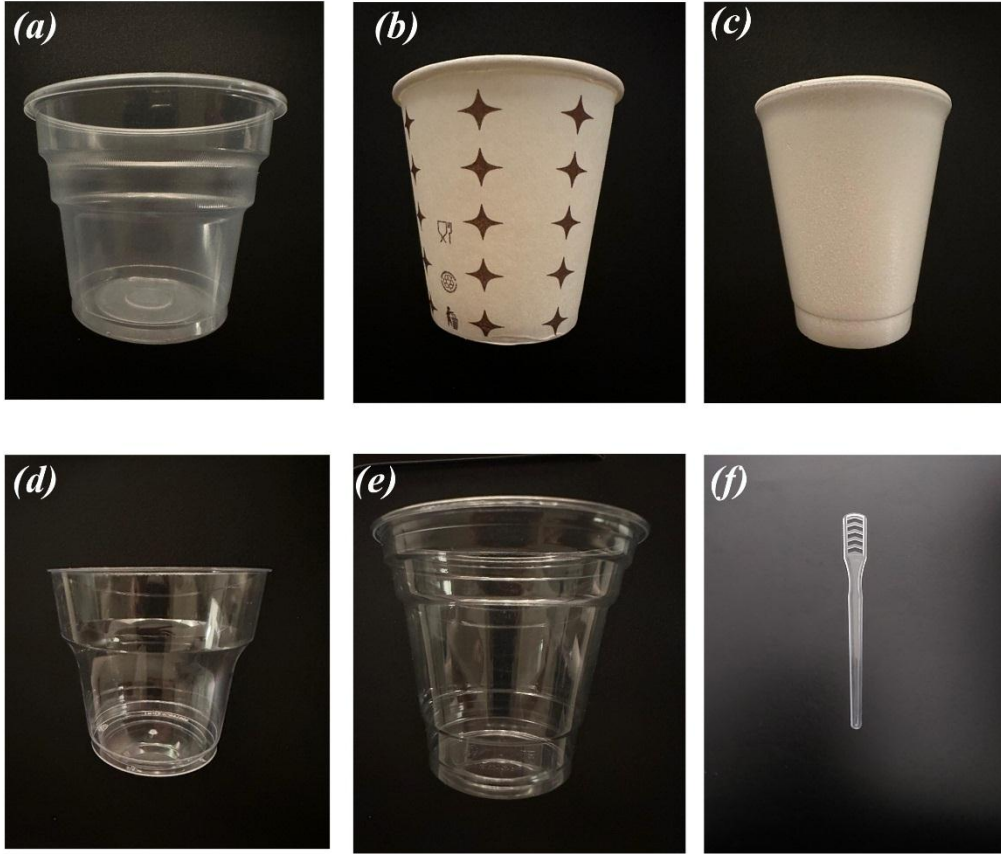


Bu çalışmada, farklı tip tek kullanımlık plastik bardaklardan farklı sıcaklıktaki sulara geçiş yapan mikroplastiklerin sayısının tespiti ve karakterizasyonu amaçlanmıştır.

3.1 Materyal ve Sarf Malzeme Temini

Tez çalışması kapsamında, tüketicilerin sıvı gıdaları tüketmekte sıklıkla tercih ettiği beş farklı hammaddeden üretilmiş plastik bardak türü kullanılmıştır. Seçilen bardaklara ait görseller Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan plastik bardaklar;

1. PET (Polietilen tereftalat),
2. PS (Polistiren),
3. PP (Polipropilen),
4. PE (polietilen) kaplı karton bardaklar,
5. EPS (expanded polistiren) köpük bardaklar ve plastik karıştırıcı olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca plastik kaşıklarla karıştırmanın mikroplastik geçişi üzerine etkisi de araştırılmıştır. Kullanılan tüm plastik bardakların ve plastik karıştırıcının türü FTIR ile doğrulanmış ve OPUS Kütüphanesi ile tam eşleşme sağlanmıştır. Plastik karıştırıcının PS hammaddesinden üretildiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.1 Kullanılan plastik bardaklar

*(a) PP bardak, (b) PE kaplı kağıt bardak, (c) EPS bardak (d) PS bardak, (e) PET bardak ve (f) plastik kaşık

Bardak teminleri Mart 2022-Nisan 2023 tarihleri arasında İstanbul’da yer alan yerel marketlerden gerçekleştirilerek tüm bardakların marka-seri numarası-satın alma tarihi kayıt altına alınmış ve bu bilgiler Tablo 3.1’de verilmiştir. Bardakların hacimleri 200-300 mL olarak seçilmiştir. Ayrıca bardakların kalınlıkları dijital mikrometre (Mitutoyo, Japan) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre bardak kalınlıkları şu şekilde tespit edilmiştir: EPS: $1880 \mu\text{m} \pm 0,005$; PP, PET ve PE bardak: $350 \mu\text{m} \pm 0,01$, PE film: $200 \mu\text{m} \pm 0,01$, PS $850 \mu\text{m} \pm 0,01$.

Tablo 3.1 Bardak temin yerleri

Bardak Türü	Temin Yeri	Marka	Satın Alma Tarihi
PET	İnternet Satıcısı	Ambalaj Pazarı	27.03.2023
PS	Yerel Ambalaj Satıcısı	Anı Plastik	20.03.2022
PP	Market	Işık Plastik	10.05.2022
PE KB	Yerel Ambalaj Satıcısı	Maxima	21.07.2022
EPS	Yerel Ambalaj Satıcısı	Filpa	20.03.2022
PS Kaşık	Yerel Ambalaj Satıcısı	Akış Plastik	20.03.2022

*PET: Polietilen tereftalat, PS: Polistiren, PP: Polipropilen, PE KB: Polietilen kaplı Kağıt Bardak, EPS: Expanded Polistiren

Tablo 3.1’de görüldüğü gibi bardak temini gerçekleştirilirken, ülkemizde tüketicilerin kolaylıkla ulaşabileceği kanallar tercih edilmiştir.

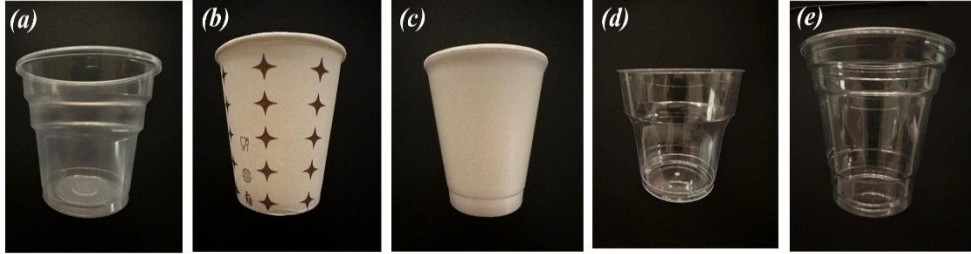
3.2 Deney Dizaynı ve Mikroplastik İzolasyonunun Gerçekleştirilmesi

Bu çalışmada, yapılan deneysel çalışmalar sırasında çevreden ve analizciden kaynaklanabilecek mikroplastik kontaminasyonunu engellemek amacıyla azami önlemler alınmıştır. Deneysel çalışmaların tamamı HEPA filtreli kabin (Thermo Scientific, S2020 1.2, İngiltere) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Pamuklu laboratuvar önlüğü ve nitril eldiven kullanımıyla analizci kaynaklı olası bir kontaminasyonun önüne geçilmesi hedeflenmiştir. Örneklerin tamamında ultra saf su cihazından (ELGA, Option-Q 7BP, İngiltere) elde edilen su kullanılmıştır. Analize başlamadan önce kabin içi %70’lik etil alkol çözeltisi ile silinerek temizlenmiştir. Deneyler öncesi kullanılan tüm cam malzemeler, üç kez ultra saf sudan geçirilerek kabin içerisine yerleştirilmiştir. Plastik bardaklardan sıvı gıdalara mikroplastik geçişinde sıcaklığın etkisini belirlemek için testlerde kullanılan ultra saf su örnekleri, sıcaklık probuna sahip bir manyetik ısıtıcıda (ISOLAB, Almanya) ısıtılmıştır. Soğuk

kullanım koşullarının simülasyonu için kullanılan ultra saf su, cam bir malzeme içerisinde buzdolabında soğutulmuştur.

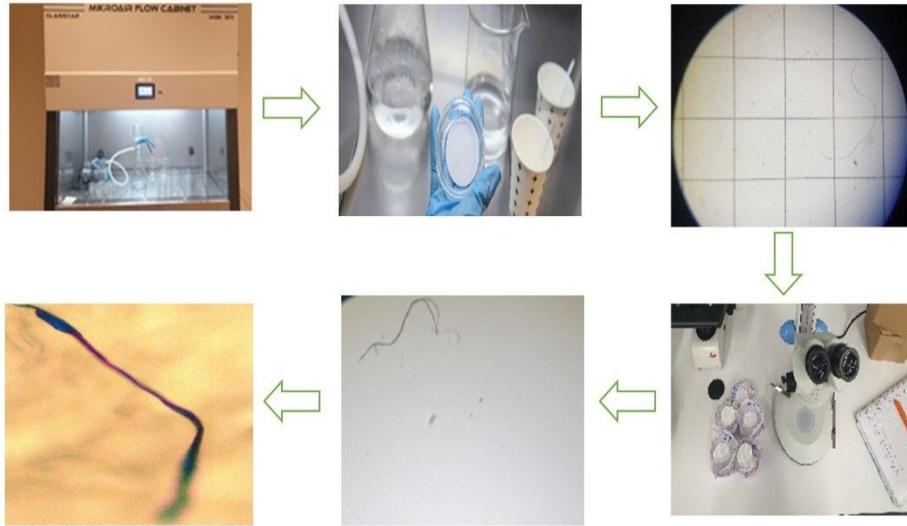
Çalışmada 3 paralel ve 3 tekerrür olarak şekilde bardaklara sırasıyla 50'şer ml ultra saf su doldurulmuştur. Ultra saf su tüketim için en çok tercih edilen 4 °C, 50 °C ve 80 °C olarak belirlenen sıvı sıcaklıklarında (Abraham vd., 2019) ve 0, 5, 10 ve 20 dk. (Du vd., 2020; Liu vd., 2021) tüketim periyodu boyunca bardakta bekletilmiştir. Ardından 47 mm 0,45 µm gözenek çapında steril selüloz asetat membran filtrede (Filter Bio, Çin) vakum süzme seti (ISOLAB, Almanya) aracılığı ile süzölmüştür. Sıcak su ile yapılan örneklerde ayrıca plastik kaşık eklenerek de analiz gerçekleştirilmiştir. Kontrol örneklerinde de benzer kullanım koşulları korunarak plastik bardakların yerine ultra saf su ile 3 kez yıkanarak temizlenmiş cam beher kullanılmıştır. Örneklerin hazırlanmasına ait deney prosedürü Şekil 3.2'de verilmiştir.

DENEY DİZAYNI



Ultra Saf Suyun Bardaklarda Bekletilmesi
(4 °C-50 °C-80 °C 0 ,5,10,20 dk.)

Mikroplastik Ekstraksiyon Analizleri



Plastik Parçacıkların Karakterizasyonu Analizleri



ATR-FTIR



SEM



DSC



Zeta Sizer

Şekil 3.2 Çalışmanın gerçekleştirilmesinde izlenen deney prosedürü

Ayrıca bu çalışmada, bardakların kullanım öncesi yıkanmasının mikropplastik geçişi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla da deneme planı oluşturulmuş olup, bu amaçla su ile bekletme ve filtrasyon işlemlerine geçilmeden önce bardakların iç kısımları 10 ml ultra saf su ile yıkanmış ve bardakların ‘*yıkama suyu*’ elde edilmiştir. Bu su ile ayrıca su ile yıkanan bardaklarda filtrasyon sonucu ‘*filtrat*’ olarak biriken su örneklerinde mikropplastik sayıları incelenmiştir.

Ön yıkama yapılmış plastik bardaklarda bekletilen suların filtrasyonunda kullanılan filtreler, cam petri kutuları içine yerleştirilmiş, petriler parafilm ile kapatılmış ve diğer analizlerde incelenmek üzere oda sıcaklığında saklanmıştır. Mikropplastiklerin karakterizasyonu kısmında diseksiyon mikroskobu ile sayım, ATR-FTIR analizi ile kimyasal karakterizasyon analizi, SEM analizi ile bardak iç yüzeyinde meydana gelen değişimler, DSC analizi ile farklı sıcaklıktaki suların bardakların termal özelliklerde yarattığı değişim ve zeta sizer ile nanopplastiklerin olası varlığı analiz edilmiştir. Ayrıca, bardaklarda bekletilen sularda ICP-MS ile ağır metal analizi yapılarak plastikten sıvıya olası ağır metal geçişi araştırılmıştır.

3.3 Mikropplastiklerin Tanımlanması

Filtrasyon işlemlerinden sonra, testlerde kullanılan filtreler diseksiyon mikroskobunda (ISOLAB, Almanya) incelenmiş ve gözlemlenen mikropplastikler sayılarak kayıt altına alınmıştır. Ayrıca sıcak ve soğuk su sıcaklıkları uygulamalarının bardak iç yüzeyinde meydana getirdiği değişim ATR-FTIR ve SEM ile incelenmiştir (Kosuth vd., 2018).

3.3.1 Diseksiyon Mikroskobu ile Mikropplastiklerin Sayımı

Tez çalışması kapsamında belirlenen sıcaklık ve süre içerisinde gerçekleştirilen filtrasyon işlemlerinde kullanılan ve daha sonraki yapılacak incelemeler için oda sıcaklığında cam petrilerde saklanan filtre örneklerinin yüzeyinde biriken mikropplastik partikülleri diseksiyon mikroskobu (ISOLAB, Almanya) ile incelenmiştir. Çalışmada kullanılan mikroskop $0,7 \times$ ile $4,5 \times$ büyütme faktörüne sahiptir ve görüntüyü 1:6,4 oranında yakınlaştırmaktadır. Çalışma kapsamında mikroskop altında toplam 350 filtre incelenmiştir. Sonuçlar; mikropplastik miktarı,

renk ve şekil özelliklerine göre kayıt altına alınmıştır. Ayrıca filtre yüzeyinde en fazla sayımın yapıldığı örnekler kameralı ışık mikroskobu ile (Olympus, CKX41, Japonya) 20× objektifte incelenerek gözlemlenen parçacıkların boyutları belirlenmiştir.

3.4 SEM Analizi

Çalışma kapsamında, tüketicilerin içme davranışları üzerinden tanımlanan sıcaklıklarda tek kullanımlık bardaklarda bekletilen suların tek kullanımlık bardakların iç yüzey morfolojilerinde meydana getireceği muhtemel değişimler SEM ile analiz edilmiştir. SEM analizi için hiç işlem uygulanmamış bardak örnekleri ile 4 °C, 50 °C veya 80 °C su sıcaklıklarına 20 dk. uygulanmış bardaklar kullanılmıştır. Bu amaçla, testte kullanılan bardaklardan bir bıçak yardımıyla 1cm×1cm kesitler alınmıştır. Bu kesitler kaplama cihazı (Quorum, SC7620) ile 18 mA 150 sn altın-paladyum ile kaplanmıştır. Daha sonra, SEM (Zeiss, EVO MA10) cihazı ile 10 KV hızlandırma voltajında 50×- 3000× büyütme gücü aralığında görüntüleme gerçekleştirilmiştir (Hee vd., 2022; Zhou vd., 2023).

3.5 ATR-FTIR Analizi

Farklı sıcaklık derecelerindeki suların bekletildiği bardakların iç yüzeylerinde meydana getireceği olası moleküler ve kimyasal değişimler ATR-FTIR ile analiz edilmiş olup elde edilen sonuçlar işlem uygulanmamış bardak örnekleri ile karşılaştırılmıştır (Zhou vd., 2023). Bardaklar laboratuvarında 1cm×1cm boyutlarında kesilmiş ve FTIR spektrometresinde (Bruker Tensor 27, Bremen, Almanya) okuma yapılmıştır. Her bardaktan 3 paralel hazırlanmış ve analiz hassasiyeti için okuma üç kez tekrar edilmiştir.

3.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi

Farklı sıcaklıklardaki suların belirlenen sürelerde bardaklarda bekletilmesinin bardakların termal özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri belirlemek için muamele görmüş bardak örneklerinde DSC analizi yapılmış ve analiz için DSC (Q20, TA Instruments, Inc., ABD) cihazı kullanılmıştır. Bardaklardan 3-5 mg

kesilip alınarak alüminyum pan içinde kapatıldıktan sonra cihaza yerleştirilmiştir. Test sırasında sıcaklık 0 °C'den 250 °C'ye kadar 10 °C/dk. oranında arttırılmıştır. Test sırasında azot (N₂) gazı akış hızı 50 ml/dk. olarak ayarlanmıştır. Kontrol olarak boş pan kullanılmıştır (Chen vd., 2013; Hu vd., 2023). PP ve PE malzemelere ait kristallik değerleri;

$$\% \text{ Kristalinite} = \frac{\Delta H_f(\bar{o})}{\Delta H_{f0}} \times 100 \quad (3.1)$$

denklemine göre hesaplanmıştır. $\Delta H_f(\bar{o})$ DSC analizi ile ölçülen ΔH değerini ifade ederken, ΔH_{f0} ise saf polimere ait kristalinite değerini ifade etmektedir. %100 saf PP ait ΔH_{f0} değeri 190 J/g (Mourad vd., 2013), PE ait ΔH_{f0} değeri 243,8 J/g (Kong vd., 2002) olarak referans alınmış ve bardaklara ait kristalinite değerleri hesaplanmıştır.

3.7 Ağır Metal Analizi

Çalışmamız kapsamında plastik bardaklardan sıvı gıdalara geçen ağır metal varlığını tespit etmek amacıyla, çalışmada her bir bardak örneği için en yüksek mikropplastik sayım sonucu elde edilen dört örnek (PP ve PE kaplı kâğıt bardak için 50 °C'de 20 dk. PS ve PET bardak için 80 °C'de 20 dk. bekletilmiş sular) bu analizde işleme alınmıştır. Kontrol olarak hiçbir işlem görmemiş ultra saf su kullanılmıştır. Su örneklerindeki Al, Cr, Zn, Cd, Pb, Sb, Hg ağır metallerinin tespiti ICP-MS (İndüksiyonla birleştirilmiş plazma – kütle spektroskopisi, (Agilent 7700, ICP MS, ABD) cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Nguyen vd., 2023).

3.8 DLS Yöntemi ile Parçacık Boyutu Ölçümü

Dinamik Işık Saçılımı (DLS), sıvı süspansiyonlardaki nanopartikülleri karakterize etmede günümüzde yaygın olarak kullanılan metotlardan birisidir. DLS metodu, seyreltik süspansiyon içerisindeki küçük parçacıkların yaydığı ışığın şiddetinin ve değişiminin ölçümü temeline dayanır (Ateş, 2018). Plastik bardaklarda farklı sıcaklıklarda ve sürelerde bekletilen sulara bardaklardan nanoplastik geçeceği varsayılarak sıvılardaki olası nanoplastik varlığı ve bunların boyutlarının tespiti için bu çalışmada DLS tekniğinden faydalanılmıştır. Bu amaçla, bardak örnekleri

içerisinde 4 °C, 50 °C veya 80 °C su sıcaklığında 20 dk. süreyle bekletilen ultra saf su örnekleri, filtreden geçirilmiş ultra saf su ile 3 kez yıkanarak temizlenmiş cam deney tüpleri içerisinde analize getirilmiştir. Bardak içerisinde bulunan sıvılardaki nanoplastik düzeyinin analiz edilmesi için zeta sizer (Nano ZS90, (Malvern Instruments Ltd, Birleşik Krallık) cihazında partikül boyutu ölçümü gerçekleştirilmiştir. İşlemden önce, partikül boyutu hücreleri (küvetleri) de ultra saf su ile en az 3 kez yıkanmıştır. Kontrol numunesi olarak işlem görmemiş ultra saf su kullanılmıştır. Zeta sizer cihazına ait küvete (Malvern, DTS0012, Birleşik Krallık) 25 °C sıcaklıkta 1 ml örnek ilave edilmiş ve 10 sn aralıklarla on tekrarlı ölçüm alınmıştır. Her bir su numunesi için bu ölçümler 3 kez tekrar edilmiştir (Bhattacharjee, 2016; Ateş, 2018; Ekvall vd., 2019).

3.9 Tüketici Mikroplastik Maruziyet Durumunun Hesaplanması

Tek kullanımlık plastik bardakların en yaygın kullanımı sıcak ve soğuk içeceklerin tüketimidir. Tek kullanımlık plastik bardaklar, toplu taşıma (şehirlerarası otobüs hizmetleri, uçaklar vb.), kafeteryalar, okul kantinlerinden evlere kadar her yerde farklı nitelik ve içerikteki içeceklerin tüketimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. İstatistiklere göre, yalnızca ABD'de yılda 50 milyar plastik bardak kullanılmaktadır (Evans, 2019). Yapılan bir çalışmada, Türkiye’de tüketicilerin ortalama haftada 1-2 kez dışarıda yemek yedikleri tespit edilmiştir (Kolanowski vd., 2021). Bu referanslar ışığında, Türkiye’deki bir tüketicinin haftalık bu bardaklar ile 0,5-1 L sıvı tüketebileceği tahmin edilmiştir. Sonuç olarak, bir tüketicinin 52 hafta boyunca maruz kalacağı toplam mikroplastik miktarı aşağıdaki denklem (3.2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Yıllık Maruziyet} =$$

$$\text{Tek bardaktan geçen maksimum mikroplastik sayısı} \times \text{Tüketilen sıvı içecek miktarı (L)} \times 52 \quad (3.2)$$

Çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz verilerin tüketici alışkanlıkları ile simüle edilmesi sonucu tüketicilerin ne kadar mikroplastığe maruz kalacağı hesaplanmıştır (Hee vd., 2022).

3.10 İstatistiksel Analizler

Çalışmada elde edilen tüm veriler (mikroplastiklerin boyutları ve miktarları), veriler arasındaki farklılıkların anlamlı olup olmadığını belirlemek için istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla, istatistiksel analiz programı (IBM, SPSS Statistics 24) ile varyans analizi (ANOVA) uygulanacaktır. Bardak türlerine sıcaklık ve sürenin etkisi her bir bardak türü için *One-Way ANOVA* testi ile belirlenmiştir. Tüm deney sonuçları üzerine sıcaklık, süre ve plastik türünün yarattığı istatistiksel fark %95 anlamlılık düzeyinde çok faktörlü varyans analizi *Two-Way ANOVA* testi ile belirlenmiştir. Kullanım öncesi yıkamanın partikül sayısına etkisi ise *paired sample t test* ile tespit edilmiştir. Plastik kaşık kullanılan ve kullanılmayan örneklerin sonuçları ise *independent t test* ile karşılaştırılmıştır. Tüm çalışmalar 3 tekrarlı olarak tasarlanmıştır. Veriler, replikatlardan ve paralellerden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması ve standart sapması hesaplanarak sunulacaktır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1 Tek Kullanımlık Plastik Bardaklardan Sıvı Gıdalara Geçen Mikroplastik Varlığı

Ambalajlardan gıda ve içeceklere geçen plastik parçacık sayısının belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında, tek kullanımlık plastik bardaklardan sıvı gıdalara geçen plastik miktarına ilişkin sonuçlar tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 4.1 ile Tablo 4.5'te 4 °C, 50 °C ve 80 °C sıvılarda tespit edilen mikroplastik miktarları, partikül/L (p/L) cinsinden verilmiştir. Ayrıca 50 °C ve 80 °C örneklerde plastik kaşık kullanımının etkisini incelemek amacıyla plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları da bu tablolarda yer almaktadır.

Tablo 4.1 EPS bardağa ait sayım sonuçları (p/L)

Süre (dk.)	EPS				
	4 °C	50 °C		80 °C	
	Plastik kaşksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşksız
0	400±20,00 ^{aA}	3100±629,60 ^{bB}	406,66±122,20 ^{bA}	466,67±155,34 ^{aB}	553,33±150,11 ^{aA}
5	246,66±100,00 ^{aA}	1693,3±500,13 ^{bB}	700,00±52,91 ^b _A	460±208,80 ^{aB}	300,00±87,17 ^{aA}
10	293,33±147,42 ^{aA}	1786,6±907,81 ^{bB}	673,33±115,47 ^{bA}	386,67±155,34 ^{aB}	366,66±261,02 ^{aA}
20	260,00±91,65 ^a _A	1826,6±64,29 ^{bB}	720,00±393,95 ^{bA}	506±136,13 ^{aB}	446,66±113,72 ^{aA}

*EPS: Expanded Polistiren, p/L: litrede partikül sayısı

**Aynı sütundaki farklı küçük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı (p<0,05) olduğunu göstermektedir. Aynı satırdaki farklı büyük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı (p<0,05) olduğunu göstermektedir.

***Sonuçlar, üç paralelin ortalamasıdır.

Tablo 4.1 incelendiğinde, EPS bardak türünde en yüksek mikroplastik geçişinin plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen 50 °C 0. dk.'da gerçekleştiği belirlenmiştir. En düşük geçiş ise 4 °C 20. dk. 246,66±100,00 p/L olarak tespit

edilmiştir. İstatistiksel olarak sıcaklığa göre 50°C’de uygulamasının sonuçları 4 °C ve 80 °C’ sıcaklık uygulamasına göre istatistiksel olarak önemli bulunurken ($p<0,05$), sürenin örneklerdeki partikül geçişi üzere istatistiksel bir etkisi tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Plastik kaşık kullanılan verilerin istatistiksel olarak kullanılmayan örneklere göre sonuçları anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Tablo 4.2 PS bardağa ait sayım sonuçları (p/L)

PS					
Süre (dk.)	4 °C	50 °C		80 °C	
	Plastik Kaşiksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşiksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşiksız
0	186,66±100,66 _{aA}	440±190,79 ^{bA}	406,66±161,65 ^{bA}	1093,33±162,89 ^{cA}	1360,00±363,86 ^{cA}
5	153,33±30,55 ^{aA}	786,66±233,5 _{2bA}	913,33±102,63 ^{bA}	2006,67±542,71 ^{cA}	913,33±102,6 _{3cA}
10	213,33±11,54 ^{aA}	346,66±92,38 ^{bA}	706,66±150,11 ^{bA}	1886,67±742,25 ^{cA}	913,33±179,5 _{2cA}
20	193,33±110,15 ^{aA}	491,66±110,1 _{5bA}	940,00±302,65 ^{bA}	1745±375,41 ^{cA}	1106,66±152,75 ^{cA}

*PS: d Polistiren, p/L: litrede partikül sayısı

**Aynı sütundaki farklı küçük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir. Aynı satırdaki farklı büyük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir.

***Sonuçlar, üç paralelin ortalamasıdır.

Tablo 4.2’de veriler incelendiğinde, PS bardaklardan sulara en yüksek mikropplastik geçişi 2006,67±542,71 p/L ile 80 °C’de 5.dk.’da tespit edilirken, en düşük geçiş 4 °C’de 5.dk. sürede 153±30,55 p/L olarak belirlenmiştir. İstatistiksel olarak, PS bardakta tüm sıcaklık derecelerindeki değişim istatistiksel olarak birbirinden önemli düzeyde farklı bulunmuştur ($p<0,05$). Sürenin örneklerdeki partikül geçişi üzerine istatistiksel olarak önemli bir etkisi tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Plastik kaşık kullanımı veriler arasında istatitiki açıdan önemli bir fark oluşturmamıştır ($p>0,05$).

Tablo 4.3 PET bardağa ait sayım sonuçları (p/L)

PET					
Süre (dk.)	4 °C	50 °C		80 °C	
	Plastik Kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız
0	413±140,74 ^{aA}	453,33±147,42 ^{aA}	593±90,18 ^{aA}	926,67±264,07 ^{aA}	1160±300 ^{aA}
5	480±190,78 ^{aA}	693,33±306,15 ^{aA}	600±163,70 ^{aA}	966,67±316,43 ^{aA}	1260±156,56 ^{aA}
10	373±41,63 ^{aA}	746,66±98,65 ^{aA}	573±102,63 ^{aA}	933,33±310,69 ^{aA}	1100±138,56 ^{aA}
20	393±141,89 ^{aA}	660±57,73 ^{aA}	173±46,18 ^{aA}	1060±363,86 ^{aA}	613±231,80 ^{aA}

*PET: Polietilen tereftalat, p/L: litrede partikül sayısı

**Aynı sütundaki farklı küçük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir. Aynı satırdaki farklı büyük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir.

***Sonuçlar, üç paralelin ortalamasıdır.

PET bardak türüne ait verilerin paylaşıldığı Tablo 4.3 incelendiğinde, en yüksek mikroplastik geçişi 80 °C 5. dk.'da 1260±156,56 p/L olarak tespit edilirken, en düşük geçiş 4 °C 10.dk. 373±41,63 p/L olarak belirlenmiştir. Bu bardak türünde sıcaklık ve sürenin sıvıya geçen partikül miktarı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmamıştır ($p<0,05$). Plastik kaşık kullanımı veriler arasında istatitiki açıdan önemli bir fark oluşturmamıştır ($p>0,05$).

Tablo 4.4 PP bardağa ait sayım sonuçları (p/L)

PP					
Süre (dk.)	4 °C	50 °C		80 °C	
	Plastik Kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız
0	326,00±120,55 ^a A	413,33±98,66 ^b A	1013,00±219,3 ^g bA	853,33±61 ^{bA}	806,00±184,75 ^{bA}
5	226,00±80,83 ^{aA}	706,66±70,24 ^b A	366,00±141,89 ^{bA}	920,00±200 ^{bA}	566,00±130,13 ^{bA}
10	266,00±50,33 ^{aA}	526,66±75,72 ^b A	386,00±117,19 ^{bA}	920,00±163,7 ¹ bA	586,00±248,46 ^{bA}
20	160,00±0 ^{aA}	648,33±350,0 ⁵ bA	1420,00±98,66 ^{bA}	856,67±185,8 ³ bA	860,00±140 ^{bA}

*PP: Polipropilen; p/L: litrede partikül sayısı

**Aynı sütundaki farklı küçük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir. Aynı satırdaki farklı büyük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir.

***Sonuçlar, üç paralelin ortalamasıdır.

PP bardağa ait sonuçların verildiği Tablo 4.4 incelendiğinde, en yüksek mikropplastik geçişi 50 °C 20. dk.'da 1420±98,6 p/L olarak tespit edilirken, en düşük geçiş 4 °C 20.dk. 160±20 p/L olarak belirlenmiştir. Yüksek su sıcaklıklarında (50 °C-80 °C) bardağın kullanımı ile elde edilen sonuçlar soğuk içecek sıcaklıklarına göre istatistiksel olarak daha yüksek bulunurken ($p<0,05$), sürenin istatistiksel açıdan herhangi bir etkisi tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Plastik kaşık kullanımı veriler arasında istatitiki açıdan önemli bir fark oluşturmamıştır ($p>0,05$).

Tablo 4.5 PE bardağa ait sayım sonuçları (p/L)

PE KB					
Süre (dk.)	4 °C	50 °C		80 °C	
	Plastik kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız	Plastik Kaşık	Plastik Kaşıksız
0	126±75,72 ^{aA}	466,66±113,72 ^{bA}	746±197,32 ^{bA}	233,33±94,52 ^{aA}	440±52,92 ^{aA}
5	280±40,00 ^{aA}	640±72,11 ^{bA}	626±144,68 ^{bA}	340±52,92 ^{aA}	506±90,18 ^{aA}
10	246±61,10 ^{aA}	720±91,65 ^{bA}	1080±230,65 ^{bA}	306±83,27 ^{aA}	413±30,55 ^{aA}
20	220±69,28 ^{aA}	641,66±160,00 ^{bA}	1346±473,85 ^{bA}	873±316,44 ^{aA}	333±174,74 ^{aA}

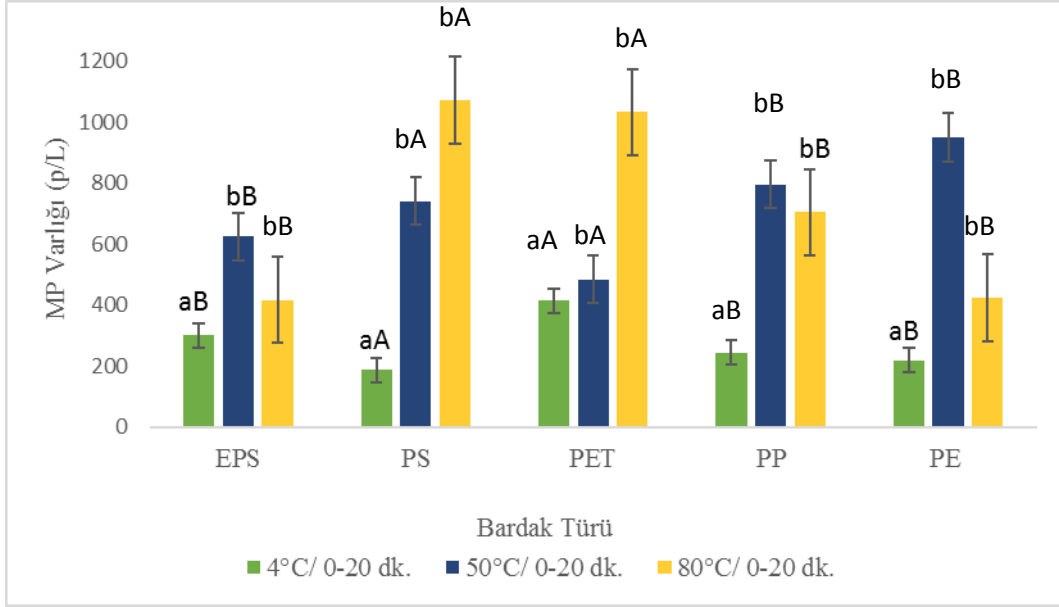
*PE KB: Polietilen kaplı Kağıt bardak; p/L: litrede partikül sayısı

**Aynı sütundaki farklı küçük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir. Aynı satırdaki farklı büyük harfler, verilerin istatistiksel olarak farklı ($p<0,05$) olduğunu göstermektedir.

***Sonuçlar, üç paralelin ortalamasıdır.

PE kağıt bardağa ait veriler incelendiğinde; en yüksek geçiş plastik kaşıksız 50 °C 20.dk. 1346±473,85 p/L olarak görülürken, en düşük geçiş ise 4 °C 0. dk. 126±75,72 p/L olarak tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak 50°C sıcak su uygulamasının sonuçları 4 °C ve 80 °C örnekleri sonuçlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Sürenin ise istatistiksel açıdan örnekler üzerine etkisi tespit edilmemiştir ($p>0,05$). Plastik kaşık kullanımı veriler arasında istatitiki açıdan önemli bir fark oluşturmamıştır ($p>0,05$).

Şekil 4.1.'de üç farklı su sıcaklığında (4 °C, 50 °C ve 80 °C) bir tüketim periyodu boyunca plastik kaşık kullanılmadan gerçekleştirilen mikroplastik sayım sonuçlarının ortalama değerleri, sütun grafiği ile verilmiştir.



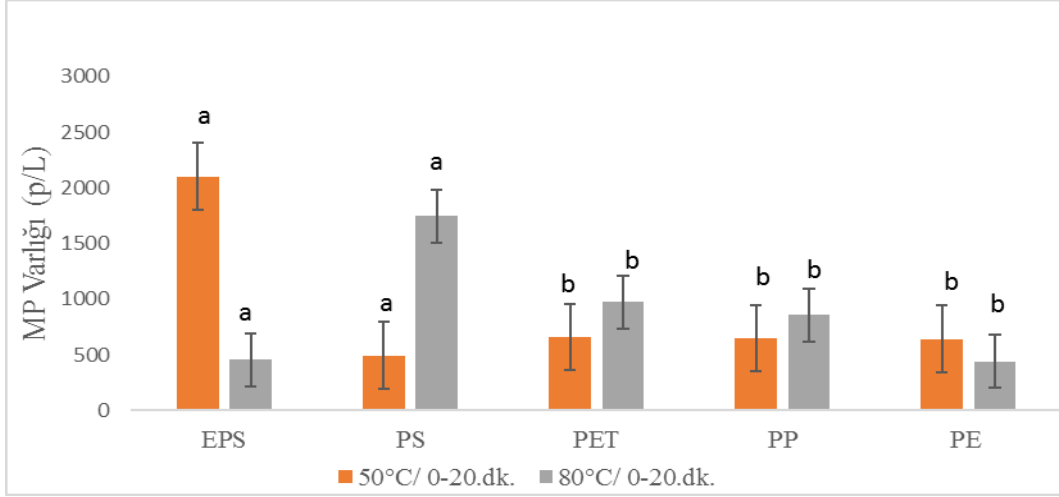
*Tablodaki veriler plastik kaşık kullanılmayan 0. dk. ile 20. dk. arasındaki tüm verilerin ortalamasını ifade etmektedir.

**EPS: Expanded polistiren, PS: polistiren, PP: polipropilen, PET: polietilen tere ftalat, PE: Polietilen kaplı kağıt bardak

***Grafikte büyük harfler bardak türündeki istatistiksel farklılığı gösterirken ($p < 0,05$), küçük harfler sıcaklık farkından kaynaklı istatistiksel farkı ($p < 0,05$) ifade etmektedir.

Şekil 4.1 Bardak türüne göre mikroplastik dağılımı

Şekil 4.2'de iki farklı su sıcaklığında (50 °C ve 80 °C) bir tüketim periyodu boyunca plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen mikroplastik sayım sonuçlarının ortalama değerleri, sütun grafiği ile verilmiştir.



*Tablodaki veriler plastik kaşık kullanılan 0. dk. ile 20. dk. arasındaki tüm verilerin ortalamasını ifade etmektedir.

**EPS: Expanded polistiren, PS: polistiren, PP: polipropilen, PET: polietilen tere ftalat, PE: Polietilen kaplı kağıt bardak

***Grafikte küçük harfler bardak türünden kaynaklı istatistiksel farklılığı ($p < 0,05$) ifade etmektedir.

Şekil 4.2 Bardak türüne göre mikroplastik dağılımı (plastik kaşık kullanılan)

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de çalışmada elde edilen tüm sonuçların ortalama değerleri üzerinden çizilmiş sütun grafikleri görülmektedir. Çalışmada plastik kaşık kullanılmayan 4 °C, 50 °C ve 80 °C su sıcaklığının ve dört farklı sürenin mikroplastik geçişine etkisi incelendiğinde, tüm deney sonuçlarından elde edilen ortalama mikroplastik geçişi $574,33 \pm 374,12$ p/L bulunmuştur. Plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarının ortalama değeri $901,00 \pm 650,04$ p/L olarak tespit edilmiştir. En düşük geçiş PE kaplı kağıt bardakta 4 °C 0. dk.’da $126 \pm 75,72$ p/L olarak tespit edilirken, en yüksek mikroplastik geçişi plastik kaşık kullanılan PS bardaktan 80 °C 5. dk.’da $2006,67 \pm 542,71$ p/L olarak bulunmuştur.

Plastik kaşık kullanılmayan örneklerin istatistiksel analiz sonuçlarında, sürenin partikül sayısı üzerine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p > 0,05$). Analiz sonuçlarına göre, plastik bardakların farklı sıcaklıklarda su ile kullanımı mikroplastik geçişi üzerine etkilidir. Su sıcaklığının artışı ile mikroplastik geçişi artmıştır. 50 °C ve 80 °C ‘de meydana gelen mikroplastik geçişi 4 °C göre istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p < 0,05$; two-way ANOVA). Farklı plastik bardak kullanımının partikül transferi üzerine etkisi istatistiksel açıdan

değerlendirilmiştir. PS ve PET bardak türünden gerçekleşen partikül geçişi diğer plastik bardak türlerine göre istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Farklı plastik gıda ambalajlarından mikroplastik geçişinin incelendiği önceki çalışmalarda da en yüksek mikroplastik geçişi PS ambalajda tespit edilmiştir (Du vd., 2020; Hee vd., 2022). Bu durum diğer plastik bardaklara göre; PS bardakların sıcak ve soğuk içecek tüketiminde yüksek oranda mikroplastik riski oluşturacağını fikrini destekler niteliktedir. Su sıcaklığının artışı ile bardaklardan sıvıya geçen mikroplastik miktarındaki artış sıcak içeceklerde riskin daha yüksek olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar çalışmamızla benzerlik göstermekte ve sonuçlarımızı desteklemektedir.

Plastik bardaklardan mikroplastik transferinde meydana gelen farklı seviyelerdeki geçişin plastik kapların üretim süreci ve yüzey özellikleri dikkate alındığında amorf yapılı plastik malzemelerden mikroplastiklerin daha kolay bardak içindeki sıvıya geçiş yapabileceği düşünülmektedir (Zhou vd., 2023). Plastik bardaklardan geçiş yapan mikroplastik seviyelerindeki farklılığın bir diğer sebebinin, suyun iyonik kuvveti içinde asılı duran mikroplastiklerin ve nanoplastiklerin stabilizasyonunu ve agregasyonu etkileyebileceği düşüncesidir. Plastikler ve su arasındaki reaksiyonlar sonucunda hidrofobik özellik gösteren mikro ve nanoplastikler yüzeyleri gereği hidroksit iyonlarının adsorbsiyonu ile negatif yüklenir. Bu durum ile mikro ve nanoplastikler kararlı ya da gevşek kümelenmeler oluşturabilirler (Enfrin vd., 2019; Lee ve Chae, 202).

Plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve 50 °C ve 80 °C sıcaklık uygulaması ve sürenin mikroplastik transferi üzerine etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0,05$). Ancak PS ve EPS bardak türünden elde edilen sonuçların diğer bardak türlerine göre sulara geçiş yapan partikül sayısı istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Ayrıca plastik kaşık kullanımı ile plastik kaşık kullanılmayan deney sonuçlarının verileri karşılaştırılmış ve aralarında istatistiksel açıdan bir fark tespit edilmemiştir. Bu durum plastik kaşık kullanımının mikroplastik geçişi üzerine bir etkisi olmadığını göstermektedir ($p>0,05$).

Tablo 4.6 Kullanım öncesi yıkama ve filtratta bulunan mikroplastik varlığı

	Yıkama (p/L)					Filtrat (p/L)				
Sıcaklık	4 °C	50 °C		80 °C		4 °C	50 °C		80 °C	
Bardak Türü		*	**	*	**		*	**	*	**
EPS	415	2325	747	750	415	147	173	127	153	115
PS	896	2858	2639	992	855	152	207	54	202	192
PET	730	2150	2382	458	1237	56	150	342	110	822
PP	606	875	349	475	1311	67	185	118	103	171
PE	523	700	1046	442	697	64	182	317	248	174

* EPS: Expanded polistiren, PS: polistiren, PP: polipropilen, PET: polietilen tere ftalat, PE: Polietilen kaplı kağıt bardak

**Plastik kaşık uygulaması yıkama ve filtrat verilerine ait sonuçları temsil etmektedir.

*** Plastik kaşık kullanılmayan yıkama ve filtrat verilerini temsil etmektedir.

Çalışmada kullanılan plastik bardaklar analize alınmadan önce içleri 10 ml ultra saf su ile yıkanmış yıkama suyu mikroplastik varlığı açısından test edilmiştir. Tablo 4.6'nın yıkama sütununda bu çalışmada elde edilen mikroplastik sayım sonuçları görülmektedir. Ayrıca tüm deney tamamlandıktan sonra süzme setinin altında biriken filtratta kalan mikroplastik miktarı tekrar süzülerek mikroplastik sayımı gerçekleştirilmiştir. Plastik bardakları kullanmadan önce iç yıkama uygulamasının sonraki kullanımda mikroplastik transferi üzerine etkisi anlamlı bir fark oluşturmuştur ($p<0,05$; paired sample t test). Yıkama yapmanın mikroplastik geçişini %51-66 oranında azalttığı tespit edilmiştir ($p=0,038$, $p<0,05$). Bu durum tek kullanımlık plastik bardakları kullanmadan önce su ile yıkamanın içeceğe geçiş yapan mikroplastik seviyesini azalttığını göstermektedir.

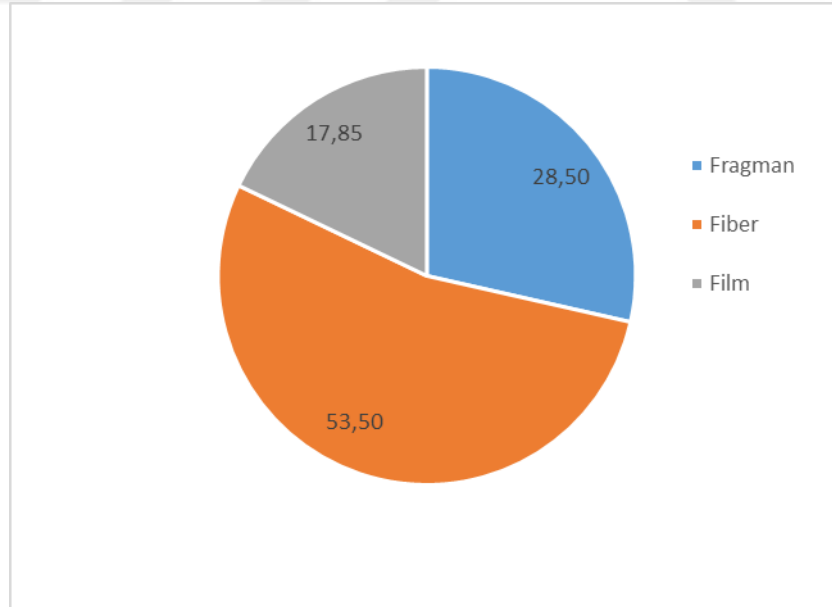
Çalışmamız kapsamında ön yıkamanın bu denli etkili olması, plastik gıda ambalajlarında üretim prosesinden, atmosferden bir kontaminasyon meydana geldiğini açıkça ortaya koymaktadır. Gıda ambalajlarından gıdaya mikroplastik geçişinin belirlenmesinde; ambalaja kullanım sırasında uygulanan mekanik stres ve sürtünmenin (karıştırma vb.), yüksek sıcaklıklarda kullanım ve ambalajın tekrarlı

kullanımının, ambalaj malzemesinin üretiminde ne oranda geri dönüşüm malzemesinin kullanıldığı gibi bilgilerin önem taşıdığı bir gerçektir (Du vd., 2020; Fadare vd., 2020; Jadhav vd., 2021).

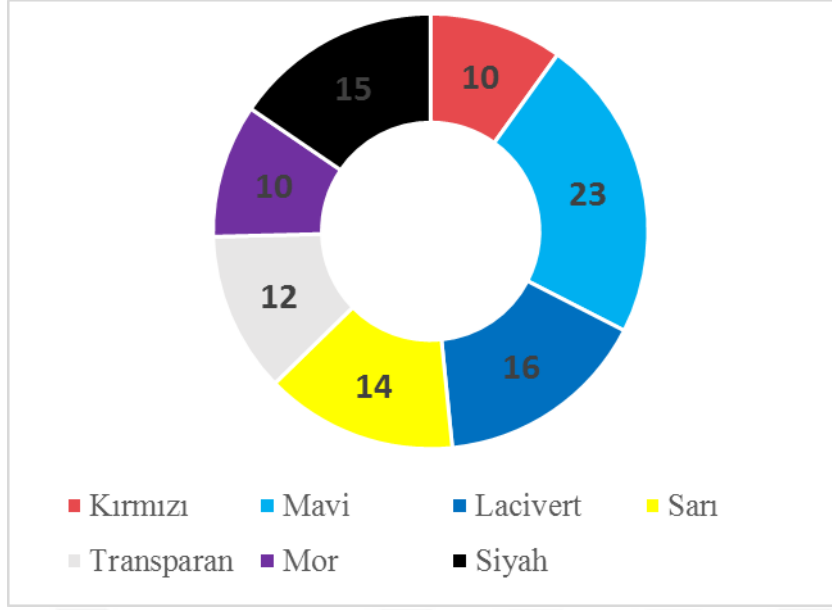
5 °C ve 60 °C su sıcaklığının üç farklı bardak türlerinde (PET, PP ve PE) meydana getirdiği mikroplastik geçişinin incelendiği çalışmada (Zhou vd. 2023), çalışmamıza benzer şekilde PP ve PE kaplı kâğıt bardakta 60 °C su sıcaklığının 5 °C'ye göre daha yüksek bir mikroplastik ayırımına sebep olduğunu belirtilmiştir. Bu durum özellikle su sıcaklığının artışı ile plastik malzemenin deformasyon hızının arttığı ve mikroplastik dökme eğiliminin artışı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca çalışmada bardaklara kullanım öncesi yıkama işlemi gerçekleştirilmiş ve %36,9 ile %50,2 oranında mikroplastik seviyesinin azaldığı raporlanmıştır.

4.1.1 Mikroplastiklerin Renk-Şekil Özellikleri ve Boyut Dağılımları

Testlerde kullanılan filtrelerin mikroskop altında incelenmesi sırasında mikroplastik sayımı yapılmasının yanında mikroplastiklerin renk ve şekil özellikleri de kayıt altına alınmıştır. Gözlemlenen mikroplastiklerin şekil ve renk özelliklerine ait veriler sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3 Mikroplastiklerin şekil dağılımı



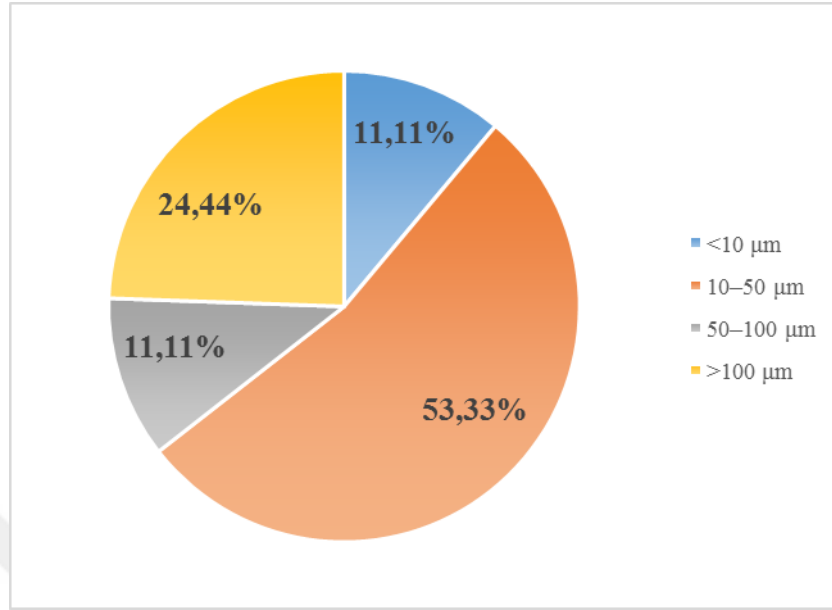
Şekil 4.4 Mikroplastiklerin renk dağılımı

Şekil 4.1 ve 4.2 incelendiğinde, tespit edilen mikroplastiklerin renk özelliklerinde en baskın renk mavi (%22,6) olarak belirlenirken, lacivert (%15,8), siyah (%15,4), sarı (%14,2), şeffaf (%11,9), kırmızı (%9,9) ve mor (%9,9) renklerde belirtilen yüzdelerde dağılım göstermiştir. Çalışmamızda gözlemlenen mikroplastik parçaçıkların şekil özelliklerine göre dağılımı sırasıyla %53,5 fiber, %28,5 fragman ve %17,8 film olarak belirlenmiştir

Du vd., (2020) tarafından, yaygın kullanılan dört farklı tek kullanımlık ambalajdan (PP, PS, PET, PE) gıdalara mikroplastik geçişinin incelendiği çalışmada, tespit edilen mikroplastiklerin şekil özelliklerinde çalışmamıza benzer şekilde %50'nin üzerinde dominant şekil fiber olarak belirtilmiştir. Renk dağılımlarında ise; çalışmada tespit edilen mikroplastiklerde baskın renk şeffaf ve beyaz olarak belirtilirken bu renkler dışında kırmızı, mavi, sarı, siyah renklerde değişen oranlarda belirlenmiştir.

Farklı markalara ait içeceklerde mikroplastik varlığının tespit edildiği bir başka çalışmada da mikroplastiklerin renk ve şekil özelliklerine dair sonuçlar verilmiştir. Çalışmada bulunan mikroplastiklerin %60'ı fiber şekil özelliğine sahipken, %34 fragman, %6 film özellikte gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada renk özellikleri %57

şeffaf, %28 mavi, %12 gri, %2 kırmızı ve %1 siyah tespit edilmiştir (Altunışık, 2023).



Şekil 4.5 Mikroplastiklerin boyut dağılımı

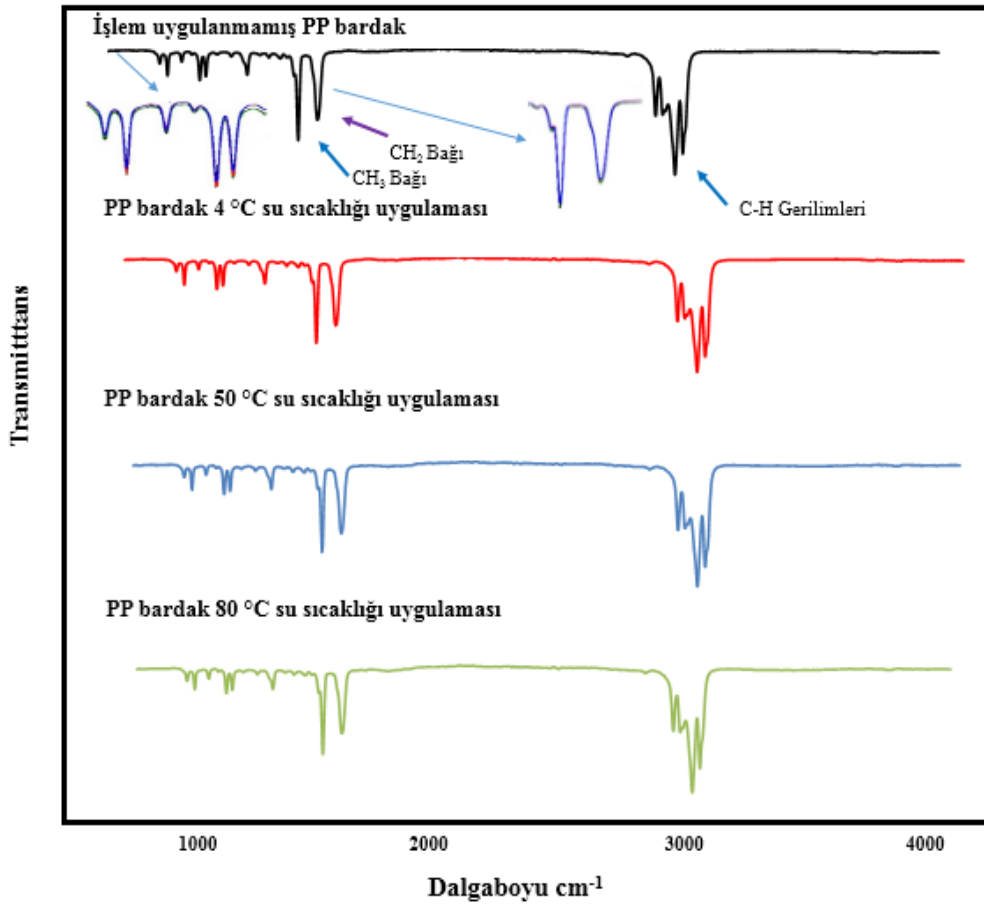
Şekil 4.5'te görüldüğü gibi filtre yüzeyinde tespit edilen mikroplastiklerde gerçekleştirilen boyut ölçümü sonuçlarında veriler dört sınıfa ayrılmıştır (<10 µm, 10-50 µm, 50-100 µm ve >100 µm) (Zhou vd., 2022). Partiküllerin %11,11'i <10 µm, %53,33'ü 10-50 µm, %11,11'i 50-100 µm ve %24,44'ü >100 µm boyut dağılımı göstermiştir. Çalışmamızda mikroplastiklerin büyük çoğunluğu 10-50 µm boyutundadır. Farklı plastik bardaklardan 5 °C ve 60 °C su sıcaklığında mikroplastik geçişinin araştırıldığı çalışmada da en baskın boyutun <50 µm olduğu raporlanmıştır (Zhou vd., 2022). Plastik malzemelerle şişelenmiş sularda mikroplastik varlığının belirlendiği başka bir çalışmada ise (Schymanski vd., 2018), 20-50 µm boyutunda tespit edilen mikroplastikler %12, 10-20 µm boyuttaki plastik partiküller %29 olarak raporlanmıştır.

Küçük boyutlarından dolayı farklı yollarla vücuda alınan mikroplastiklerin insan ve hayvan sağlığı üzerine potansiyel etkileri olduğu bir gerçektir. Ancak insanlar üzerine etkileri tam olarak belirlenmemiştir (Osman vd., 2023). Kim vd., (2022) tarafından yapılan çalışmada, mikroplastiklere uzun süre maruz kalmanın mide

kanseri riski oluşturabileceği bildirilmiştir. Mikroplastik maruziyetinin tümörlerin büyümesinde artışa sebep olduğu belirtilmiştir.

4.2 ATR-FTIR

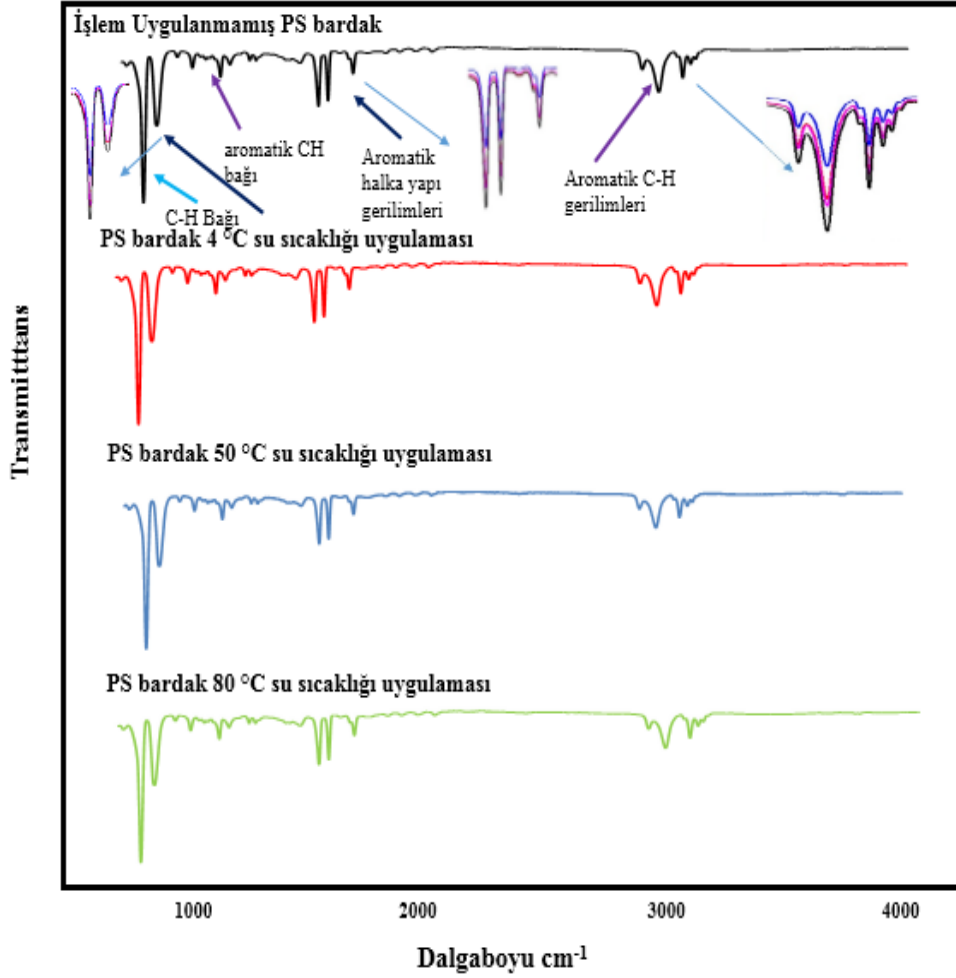
Farklı su sıcaklıklarının bardak iç yüzeyinin kimyasal yapısında meydana getirdiği olası değişimleri incelemek amacıyla ATR-FTIR tekniği ile analiz gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları Şekil 4.6-4.10'da verilerek spektrumlar üzerinde karakteristik pikler gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PP bardağa ait ATR-FTIR spektrumları

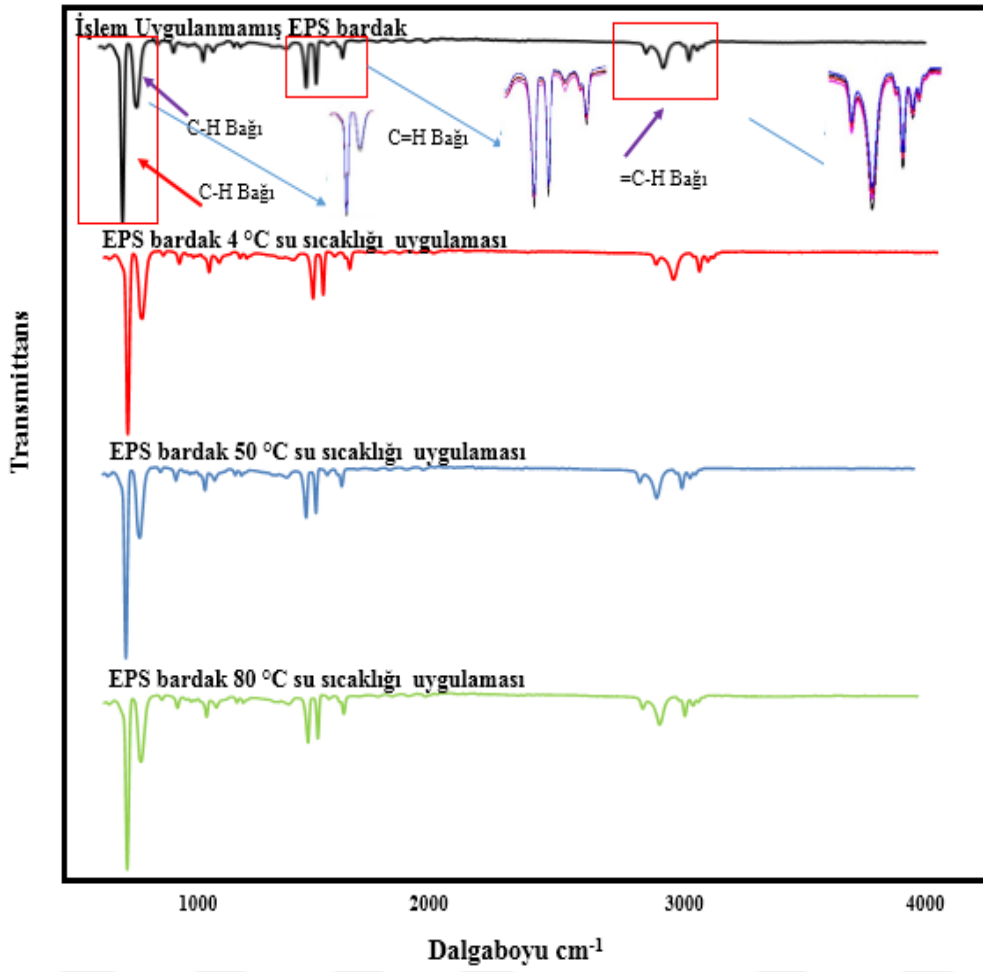
PP bardak için (Şekil 4.6), 2950-2838 cm^{-1} bölgesinde C-H gerilimlerine ait pikler gözlemlenirken, 1455 cm^{-1} CH₂ bandı gözlemlenmiştir. Ayrıca 1377 cm^{-1} CH₃

bağına ait pik, 808-1166 cm^{-1} aralığında da polimere ait referans tüm pikler (C-CH₃ bağı, C-C bağı, C-C gerilimleri) gözlemlenmiştir.



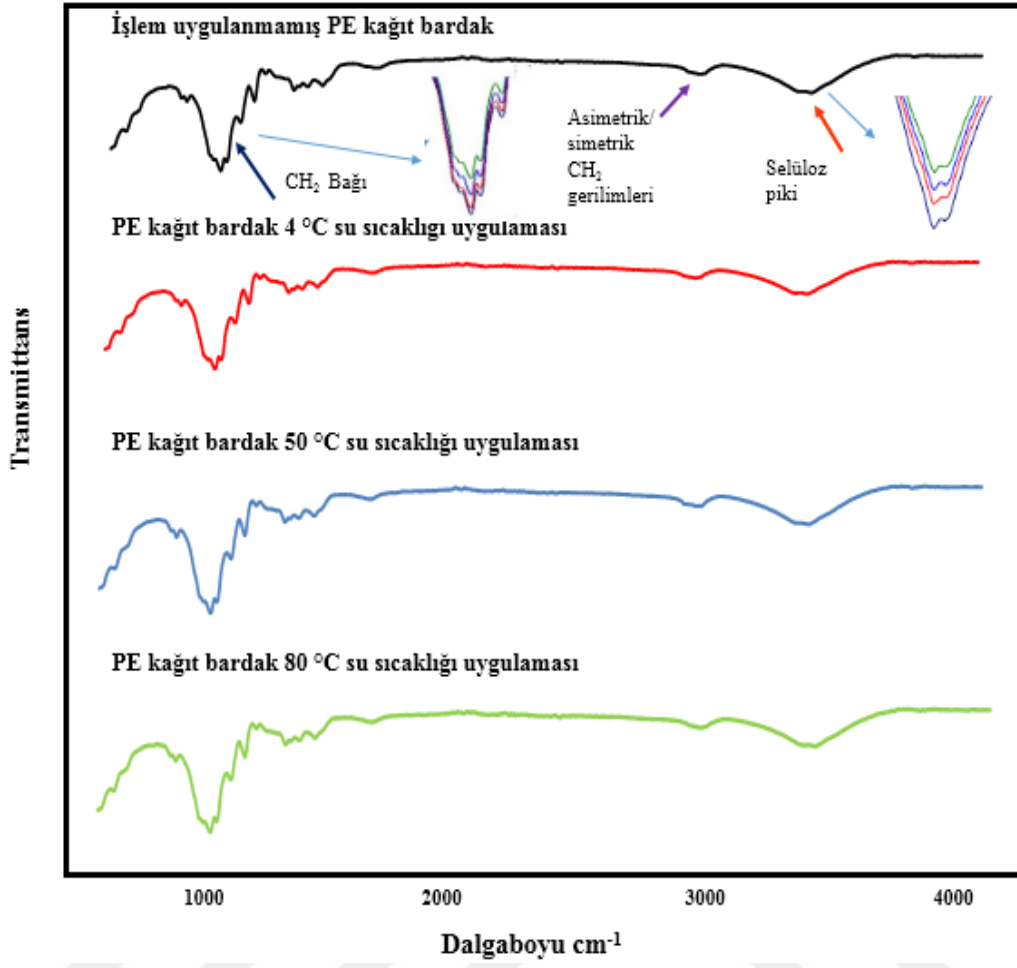
Şekil 4.7 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PS bardağa ait ATR-FTIR spektrumları

Şekil 4.7’de PS bardağa ait parmak izi niteliğindeki tüm pikler uygulanan su sıcaklıkları sonrası gerçekleştirilen ölçümlerde görülmüştür. Polimerin kimyasal yapısındaki 3081, 3059, 3024 ve 3001 cm^{-1} dalga boyunda C-H aromatik halka yapıya ait pikler gözlemlenirken, 695 cm^{-1} dalga boyunda aromatik halka yapıya ve 759 cm^{-1} dalga boyunda =C-H bağına ait karakteristik pikler görülmektedir (Chércoles Asensio vd., 2009)



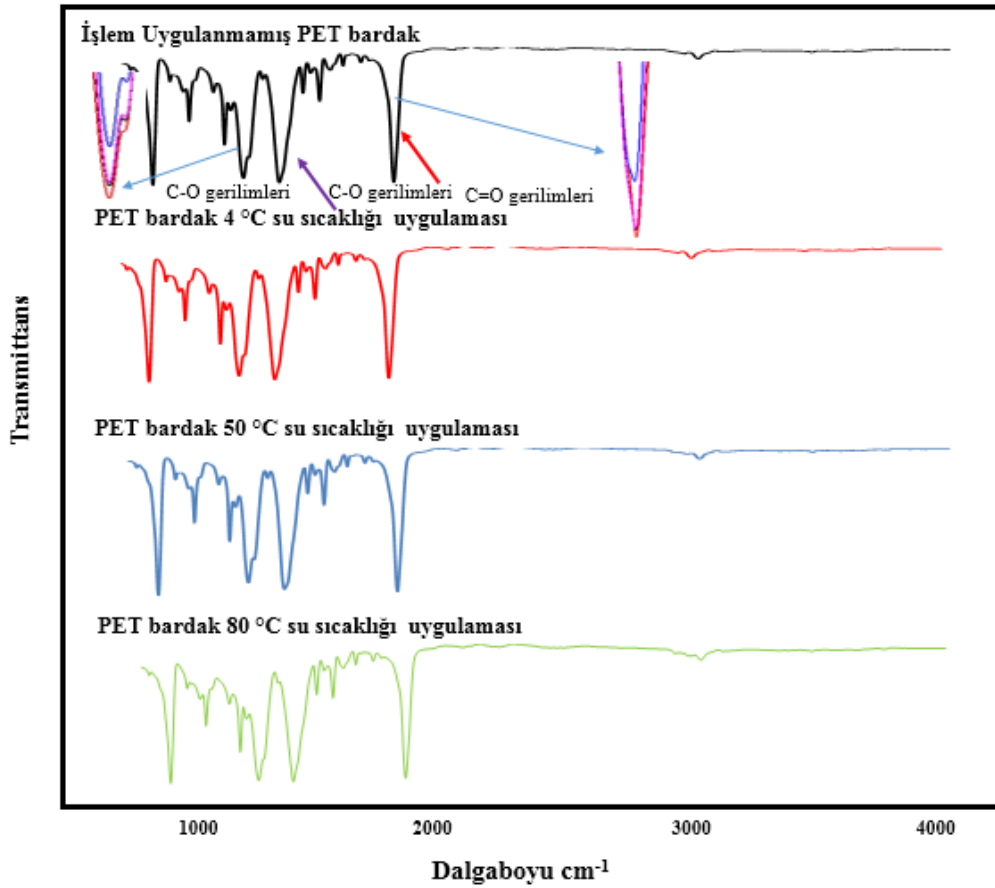
Şekil 4.8 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış EPS bardağa ait ATR-FTIR spektrumları

Benzer şekilde (4.8), EPS bardaklarda da polimerin parmak izi olarak adlandırılan tüm pikler görülmüştür. 3024 cm⁻¹ bölgesinde aromatik C-H gerilimleri, 1492-1601 cm⁻¹ aromatik halka yapının gerilimleri, 1027 cm⁻¹ aromatik CH bandı, 756 cm⁻¹ piki ise CH bandını 694 cm⁻¹ ise aromatik CH bağı dışındaki halka yapıya ait en büyük zirve vardır (Jung vd., 2018).



Şekil 4.9 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PE kaplı kağıt bardağa ait ATR-FTIR spektrumları

PE kaplı kağıt bardağa ait spektrum (Şekil 4.9) incelendiğinde, 2916-2850 cm^{-1} aralığında asimetrik/simetrik CH_2 gerilimi gözlemlenirken, 3334 cm^{-1} piki ve 1426 cm^{-1} CH_2 bandı ile bardağın dış kısmında bulunan selüloza ait karakteristik bir piklerdir (Gulmine vd., 2002; Lee vd., 2024).



Şekil 4.10 Farklı su sıcaklıkları uygulanmış PET kaplı kağıt bardağa ait ATR-FTIR spektrumları

PET bardağa ait spektrum incelendiğinde (Şekil 4.10) görüldüğü üzere, 3100-2800 cm⁻¹'deki bant aromatik ve alifatik C-H bağ gerilmesi, 1720 cm⁻¹'deki ester karbonil bağ gerilmesi, 1235 cm⁻¹'deki ester grubu gerilmesi, 1090 cm⁻¹'deki metilen grubu ve 1016 ve 725 cm⁻¹'deki aromatik bantlara ait spesifik piklerin tamamı gözlemlenmiştir (Chen vd., 2013). Bahsedilen parmak izi niteliğindeki bütün piklerin tüm su sıcaklığı dereceleri uygulanmış bardaklarda gözlemlenmesi kimyasal olarak bardak iç yüzeyinde bir değişim olmadığını ifadesi olsa da transmittans değerlerinde meydana gelen azalmanın yüzeyde meydana gelen yüzey erozyonundan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Zhou vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada da benzer şekilde farklı su sıcaklıkları (5 °C ve 60 °C) plastik bardakların iç yüzeyinde kimyasal değişim meydana getirmemiştir. FTIR spektrumları incelendiğinde, beş plastik bardak

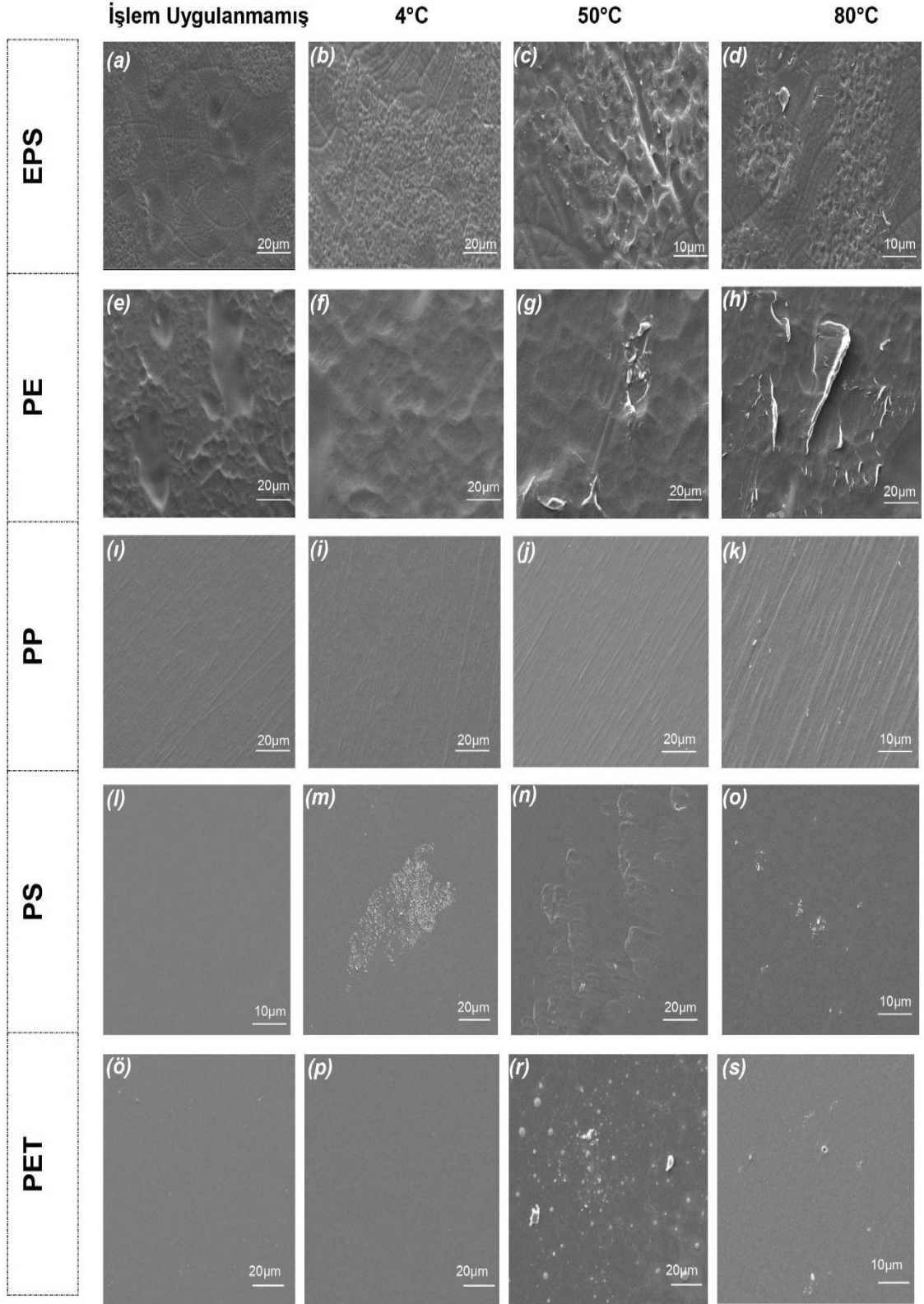
türünde farklı sıcaklıklarda ultra saf su uygulama öncesi ve sonrasında herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Tüketim davranışı sırasında yaygın görülen üç sıcaklığın bardağın kimyasal kompozisyonunu değiştirmedeği görülmektedir.

Ayrıca spektrumlarda, absorpsiyon zirvelerinde gözlemlenen değişiklik plastik bardaklara uygulanan farklı sıcaklıkların polimer yüzeyindeki katman yapısında meydana getirdiği değişimlerle ilişkilendirilebilir. ATR-FTIR datalarında sıcaklığın artışı ile meydana gelen absorbans düşüşünün temel nedeni, SEM görüntülerinde de gözlemlenen yüzey erozyonu olarak yorumlanabilir. Sıcaklık artışı ile plastik bardakların yüzey morfolojilerinde meydana gelen aşınma IR ışını yoğunluğunun azalmasına sebep olabilir (Urbaniak-Domagala, 2012; Fadare vd., 2020).

4.3 SEM

Tek kullanımlık plastik bardaklardaki, farklı su sıcaklıklarının bardak iç yüzeyinde meydana getirdiği morfolojik değişim SEM analizi ile belirlenmiştir. Şekil 4.11’te, hiç işlem görmemiş bardak yüzeyleri ile 4 °C, 50 °C ve 80 °C sıcaklıkta 20 dk. süreyle su bekletilmiş bardak yüzeyleri görülmektedir. Su ile temas etmemiş EPS ve PE kaplı kâğıt bardak yüzeylerinde (Şekil 4.11 (a), (e)) bir pürüzlülük mevcut olup bunun üretim sırasında gerçekleştiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, PP, PS ve PET bardakların iç yüzeyleri (Şekil 4.11 (ı),(l),(ö)) pürüzsüz bir görüntü sergilemiştir. Tüm plastik bardaklarda, kullanım koşullarının simüle edildiği işlemler sonrasında bardak iç yüzeylerinde belirgin deformasyonlar görülmüştür. Su sıcaklığının artışı ile tüm yüzeylerde yıpranmanın derinleştiği ve bu yıpranmalar kaynaklı mikropplastik kopuşlarının gerçekleştiği düşünülmektedir. Özellikle su sıcaklığındaki artış ile kullanımdan önce en pürüzsüz yüzeylere sahip olan PS ve PP bardakta (Şekil 4.11 (ı-k), (l-o)) porozlu yapı oluşumu ve deformasyon net bir şekilde görülmektedir. Bu görseller çalışmada, 80 °C’de sırasıyla en yüksek mikropplastik geçişlerinin tespit edildiği PS ve PET bardakların sonuçlarını (Şekil 4.11 (ö-s)) destekler niteliktedir. Benzer şekilde 50 °C sıcaklık uygulamasında en yüksek mikropplastik geçişinin tespit edildiği PE kaplı bardakta da görsellerde de görüldüğü üzere kâğıt yüzeye kaplanarak üretilen PE filmde yırtılmaların ve

kopuşların başladığı görülmektedir (Şekil 4.11(e-h)). PET bardakta da benzer şekilde su sıcaklığının artışı ile yüzey deformasyonu derinleşmiş ve mikropplastik kopuşları gözlemlenmiştir (Şekil 4.11 (ö-s)). Zhou vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, PET, PP ve PE bardaklara 5 °C ve 60 °C su sıcaklıklarına sahip ultra saf su bekletilmiş ve uygulanan su sıcaklıklarının bardak iç yüzeyinde yarattığı morfolojik değişim gözlemlenmiştir. Çalışmada su sıcaklığının artışı ile çalışmamıza benzer şekilde yüzeylerde aşınma meydana geldiği belirtilmiştir. Chen vd. (2023) tarafından yapılan çalışmada, PP ve PS bardaklarda 95 °C'deki sıcak su 20 dk. süreyle uygulanmış ve bardak iç yüzeyinde deformasyonların arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar da çalışma sonuçlarımızı destekler niteliktedir. PE kaplı kağıt bardaklar kağıt bardakların iç yüzeyine PE filmin spreyleneşmesi ile üretilmektedir (Du vd., 2020; Zhou vd., 2023). Bu üretim prosesi nedeniyle kullanılmamış bardaklarda yüksek yüzey pürüzlülüğü ve tümseklenmeler görülmektedir. Yüksek su sıcaklığına bağılı olarak yüzeye kaplanmış filmin ciddi anlamda yıpranmaya maruz kaldığı kırılmaların ve çatlamaların oluşumuyla mikropplastik geçişinin gerçekleştiğı düşünölmektedir. Kâğıt bardaklarda gerçekleştirilen çalışmalarda da çalışmamıza benzer sonuçlar elde edilmiş ve su sıcaklığının artışına bağılı olarak yüksek yüzey yıpranmaları oluşmuştur (Zhang vd., 2023; Zhou vd., 2023; Lee vd., 2024). EPS bardaklarda da PE kaplı bardaklara benzer şekilde kullanılmamış olan bardaklarda köpük yapıdan dolayı tümseklenmeler gözlemlenirken, su sıcaklığının artışı bardak iç yüzeyinde yıpranmaları beraberinde getirmiş ve mikropplastik kopuşlarının ana nedenlerinden biri olmuştur.



Şekil 4.11 Farklı sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardak iç yüzeylerinin SEM görüntüleri (1000× -3000×)

4.4 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

DSC tekniği, polimer malzemelerin ısı analizini için kullanılan termoanalitik bir yöntemdir. Analiz boyunca cihaza yerleştirilen numune ve referans aynı sıcaklıkta tutulur ve aynı hızda ısıtılır. Bu sayede numune ve referansın ısı akışının hızı ölçülür ve birbiriyle karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma ile malzemenin bileşimi, erime noktası (T_m), cam geçiş sıcaklığı (T_g) ve oksidasyon gibi özellikleri yanı sıra soğurulan ve salınan enerji miktarı (ΔH) belirlenebilir (Arda, 2011). DSC, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir numunenin içine veya dışına olan ısı akışını ölçerek erime, kristalleşme veya cam geçişi gibi olayların gözlemlenmesine olanak tanır (Schirmer vd. 2024). Bu geçişler, fiziksel özelliklere ve polimer türlerine ilişkin değerli bilgiler sağlar. Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda suların bekletildiği plastik bardakların ısı davranışında herhangi bir değişikliğin meydana gelip gelmediği, DSC ile analiz edilmiştir. Tablo 4.7’de farklı sıcaklık derecelerinde 20 dk. bekletilmiş bardakların DSC değerleri görülmektedir.

Tablo 4.7 Farklı su sıcaklıklarına 20 dk. maruz bırakılmış plastik bardakların DSC değerleri

Örnek	T_g (°C)	T_m (°C)	ΔH (J/g)	X_c (%)
EPS 0	107,02	TE	TE	TE
EPS 4°C	104,88	TE	TE	TE
EPS 50 °C	102,40	TE	TE	TE
EPS 80 °C	100,14	TE	TE	TE
PS 0	97,11	TE	TE	TE
PS 4 °C	98,67	TE	TE	TE
PS 50 °C	98,89	TE	TE	TE
PS 80 °C	98,89	TE	TE	TE
PET 0	81,57	TE	TE	TE
PET 4 °C	83,35	TE	TE	TE

Tablo 4.7 (devamı) Farklı su sıcaklıklarına 20 dk. maruz bırakılmış plastik bardakların DSC değerleri

PET 50 °C	91,12	TE	TE	TE
PET 80 °C	96,22	TE	TE	TE
PP 0	TE	167,72	82,83	43,59
PP 4 °C	TE	167,63	77,44	40,75
PP 50 °C	TE	168,71	65,86	34,56
PP 80 °C	TE	166,91	67,26	35,40
PEKB 0	TE	108,21	70,64	28,97
PEKB 4 °C	TE	107,55	67,07	27,51
PEKB 50 °C	TE	106,88	36,11	14,81
PEKB 80 °C	TE	105,55	1,23	0,50

*T_g: Camısı geçiş sıcaklığı, T_m: Erime sıcaklığı, ΔH: Entalpi, X_c: %Kristalinite değerlerini ifade etmektedir.

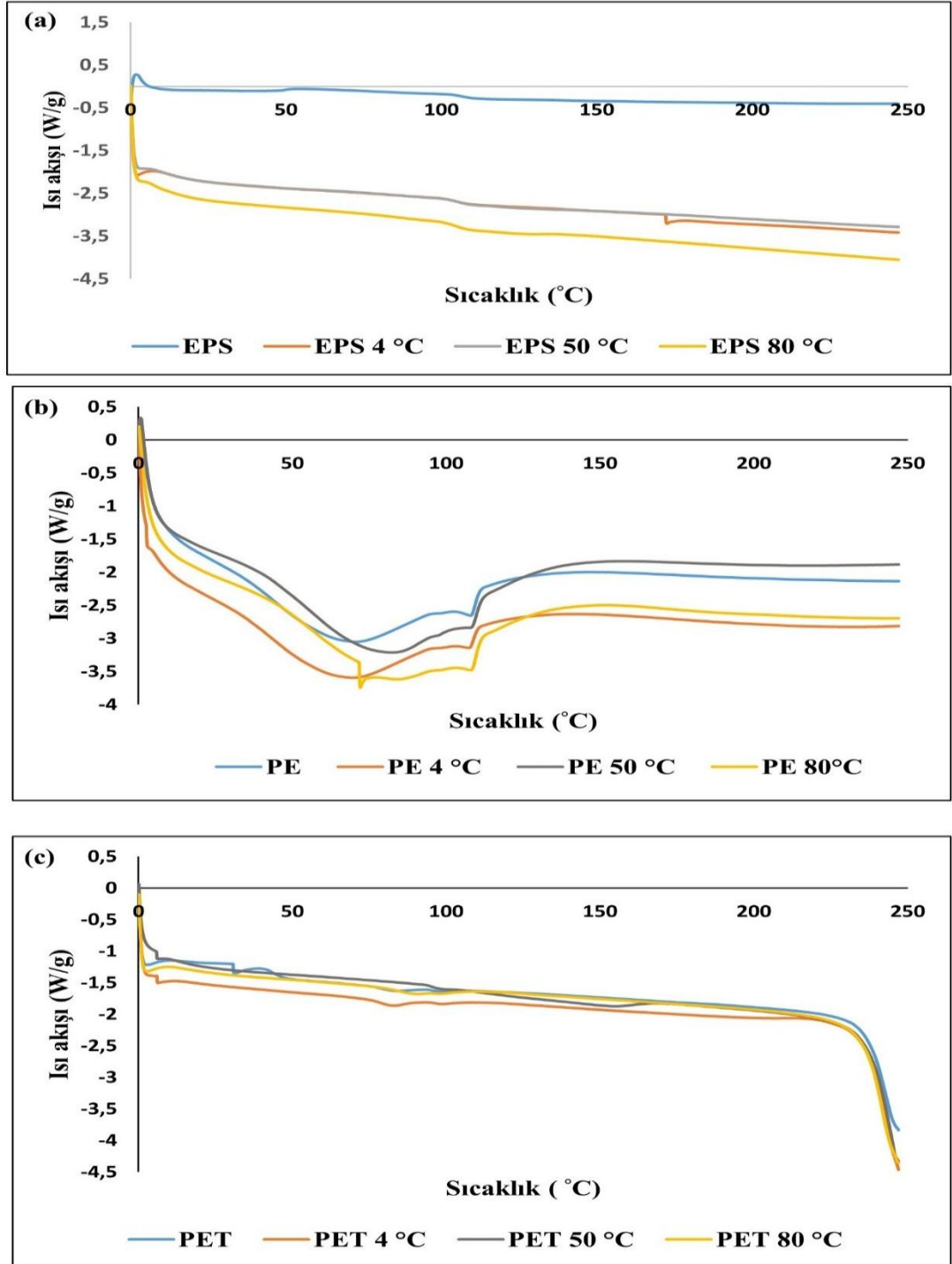
**0: İşlem uygulanmamış bardağı örnekleri ifade etmektedir.

***EPS: Expanded polistiren, PS: Polistiren, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PEKB: Polietilen kaplı karton bardak, TE: Tespit edilmedi.

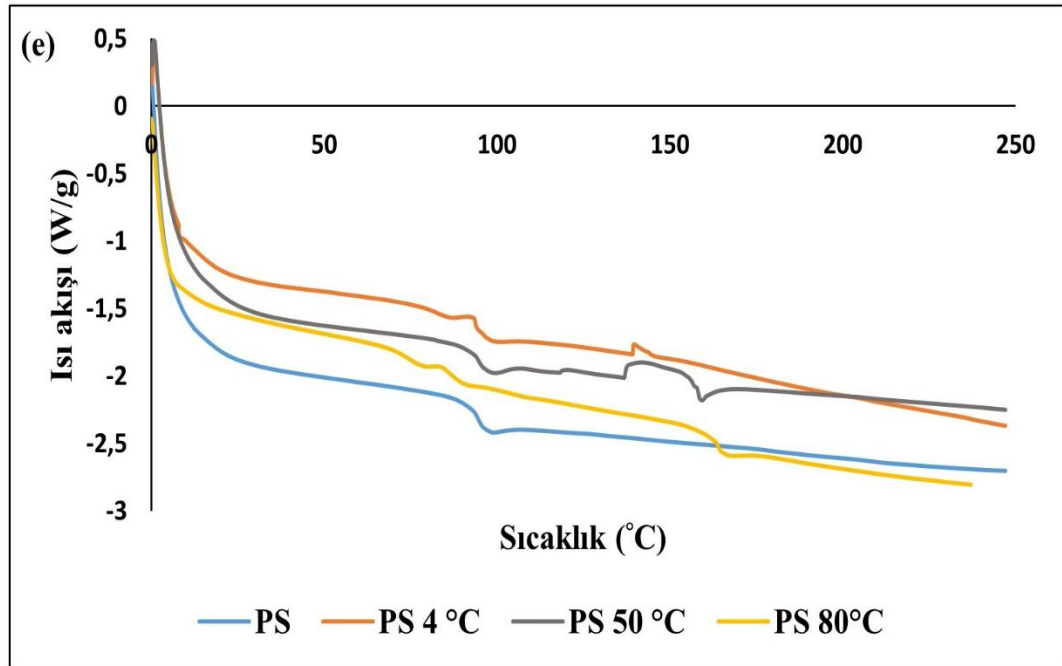
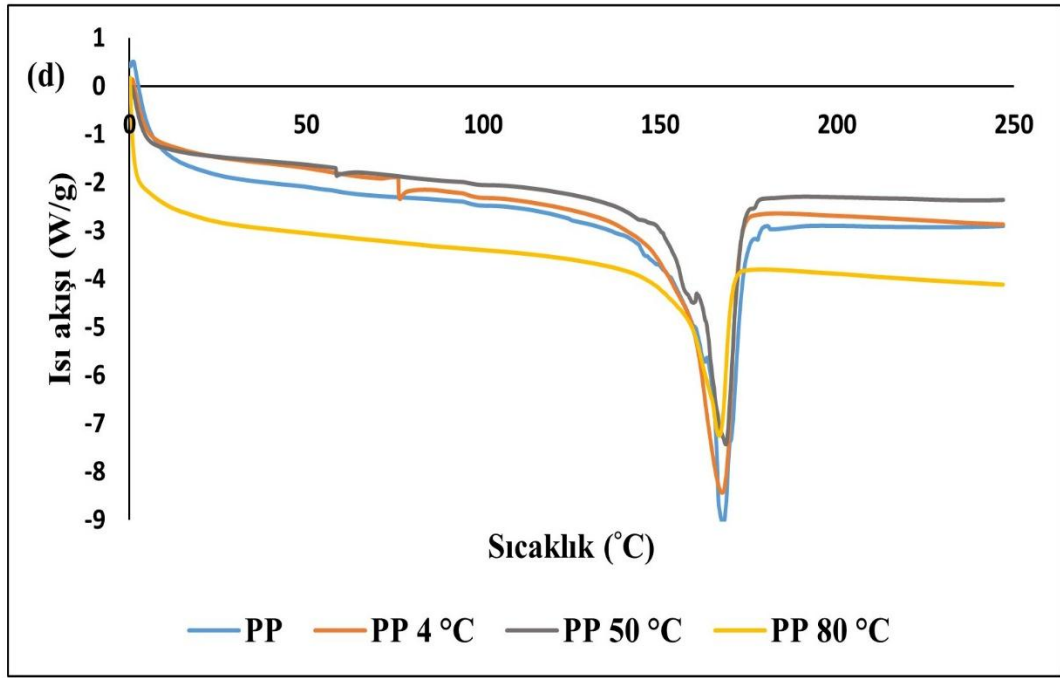
Tablo 4.7 incelendiğinde semi kristalin yapı gösteren PP, PE ve PET ait erime sıcaklıkları ve entalpi değerleri ile amorf yapıdaki plastik bardakların (EPS, PS) camısı geçiş sıcaklıkları ve entalpi değerleri üzerinden hesaplanmış kristallik değerleri (x_c) görülmektedir.

Polimerin kauçuğumsu bir yapı kazandığı camısı geçiş sıcaklığı (T_g) sıcaklığı üzerinden değerlendirilir (Üçüncü, 2011; Sorolla-Rosario vd., 2022). Benzer polimerik yapıda olan PP ve PE malzemelerde farklı su sıcaklığı uygulamaları T_m sıcaklıklarını büyük ölçüde değiştirmemiştir. Hiç işlem uygulanmamış PP bardakta T_{m-PP0}: 167,72 °C iken sıcak içecekleri temsil eden 80 °C uygulanmış PP bardakta erime sıcaklığı T_{m-PP80°C}:170,30 °C olarak belirlenmiştir. PP bardaklar ile yapılan bir çalışmada erime sıcaklığının T_m: 160 °C olduğu belirtilmiştir (Lopes vd., 2019). Bizim sonuçlarımızda bu değer ile uyum göstermektedir. Aynı durum PE bardak için de geçerlidir. Hiç işlem uygulanmamış PE bardakta T_{m-PE0}: 108,21 °C iken

sıcak içecekleri temsil eden 80 °C uygulanmış PP bardakta erime sıcaklığı $T_{m-PE80^{\circ}C}$: 105,55 °C olarak belirlenmiştir. Hu vd. tarafından (2023) yapılan çalışmada PE, PP ve EPS plastik gıda ambalajlarının işlem uygulanmamış hali ile 100 °C 1 saat ısıtılma işlemi uygulanmış halleri DSC analizi ile karşılaştırılmış ve sonuçta T_m sıcaklıkları birbirine benzer olarak tespit edilmiş ve bizim çalışmamıza benzer bir sonuç elde edilmiştir. Çalışmamızda EPS ve PS bardaklarda işlem uygulanmamış numunede T_{g-EPS0} :107,02 °C, T_{g-PS0} : 97,11 °C olarak belirlenirken 80 °C uygulanmış EPS bardakta $T_{g-EPS 80^{\circ}C}$:100,14 °C'dir. PS bardakta ise bu değer $T_{g-PS 80^{\circ}C}$: 98,89 °C olarak belirlenmiştir. Amorf polimerlerden EPS gıda ambalajlarında tespit edilen T_g sıcaklığının yaklaşık 100 °C olması gerekmektedir. Amorf polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g) değeri camsı ve kauçuk yapı arasındaki geçişi temsil eden kritik bir sıcaklık değeridir. Çalışmamızda tespit ettiğimiz değerler bu sıcaklık derecesine çok yakın bir değerdir (Hu vd., 2023). PET bardaklarda camsı geçiş sıcaklığı $T_{gPET 0-PET80^{\circ}C}$:81,57 °C-96,22 °C aralığında tespit edilmiştir. Farklı plastik malzemelerden mikroplastiklerin belirlenmesinde TGA ve DSC metotlarının kullanıldığı bir çalışmada PET ambalaj için T_g :75±0,05 °C olarak belirlenmiştir (Sorolla-Rosario vd., 2022).



Şekil 4.12 Farklı su sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardaklara ait DSC grafikleri



Şekil 4.12 (devamı) Farklı su sıcaklıklarda ilave edilen sular ile 20 dk. muamele görmüş plastik bardaklara ait DSC grafikleri

Şekil 4.12’de DSC analizine ait grafikler görülmektedir. Plastik polimerlerin bozunma mekanizmaları dikkate alındığında, abiyotik olarak bozulmaya sebep olan termal etkiler sonucunda polimerlerin yüzeylerinde değişimler meydana gelmektedir. Termal etkiler sonucunda meydana gelen yüzey bozunması kırılma hızını artırır ve parçalanmaya yol açar (Gewert vd., 2015). Şekil 4.12 (e) grafiğinde, PS polimerinin farklı su sıcaklıklarına maruz bırakılmış örneklerinde termal özelliklerinde meydana gelen değişim görülmektedir. PS yapısı itibarıyla amorf ve hidrotermal olarak bozunmaya müsait bir polimerdir. Bu nedenle çalışmamızda uygulanan en yüksek sıcaklık derecesi olan 80 °C’de ısı akışında dalgalanmalar olması termal özelliklerinde değişim meydana geldiğini göstermektedir. Plastik yapısında amorf bölgelerin fazla olması moleküllerin hareketliliğini ve yüksek monomer erişimini desteklemektedir (Jadhav vd., 2021; Tsochatzis vd., 2024). Plastikler hidrotermal bozunma gösterebilirler. Bu bozunma ile polimer zincirinde kırılmalar meydana gelmektedir (Jadhav vd., 2021). Bu değişim sonucunda da DSC grafiklerinde ısı akışı düşüşü veya endotermik bir tepki görülebilmektedir. Çalışmamızda kullanılan bardakların yüksek su sıcaklıklarına maruz kalması sonucunda DSC grafiklerinde görüldüğü gibi ısı akışından bir düşüş meydana gelmiştir.

Son yıllarda mikroplastik varlığını belirlemeye yönelik plastiklerin termal özelliklerinden yararlanmaya dayalı termal gravimetrik yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır (Bitter ve Lackner, 2021; Sorolla-Rosario vd., 2022; Hu vd., 2023). DSC tekniği ile mikroplastik varlığının belirlenmesinde özellikle yarı kristal yapıdaki plastiklerin erime noktaları farklılıklarından yararlanarak belirleme yapmanın mümkün olabileceği raporlanmıştır. Çevresel matrislerde yarı kristal yapıdaki mikroplastiklerin (PP, PET, PE ve PA6) termooanalitik metotlarla tespiti üzerine yapılan çalışmada, amorf yapıdaki plastiklerin uygulanan analiz sıcaklıklarında erimeyeceği ancak bu yöntemde kullanılan sıcaklık aralığından daha yüksek sıcaklıklarda termal olarak dejenere olmaya başlamasından dolayı DSC ile tespit edilemezler (Bitter ve Lackner, 2021).

4.5 Plastik Bardaklardan Suyu Geçen Ağır Metaller

Çalışmamızda en fazla mikropplastik sayımı yaptığımız dört örneğimizde bulunan ağır metallerin tespitini gerçekleştirmek amacıyla ICP-MS tekniği ile 7 ağır metal (Al, Cr, Zn, Cd, Pb, Sb, Hg) ng/mL düzeyinde analiz edilmiştir. Tablo 4.8’de Avrupa Birliği (EU Standartları) 10/2011 Standartları gıda ile temas eden plastik gıda ambalajlarında izin verilen limitler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Türk Gıda Kodeksi Bulaşanlar Yönetmeliğin’de içme sularında bulunmasına izin verilen maksimum ağır metal limitleri verilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.8’ de görülmektedir.

Tablo 4.8 Ağır metal migrasyon limitleri

Standartlar	TML **	Spesifik Ağır Metal Migrasyon Limitleri							Kaynak
		Al	Zn	Cr	Cd	Hg	Pb	Sb	
Gıda ile Temas Eden Plastik Maddeler (mg/kg)									
AB 10/2011	60,0	1,0	5.0	TE	TE	TE	TE	<0,04	EU (2011)
TGK (2019/44)	60,0	1,0	5,0	TE	TE	TE	TE	<0,04	TGK (2019)
İzin Verilen Ağır Metal Limitleri (mg/L)									
Dünya Sağlık Örgütü (WHO)	-	0,100	-	0,05	0,003	0,006	0,01	0,02	WHO (2022)
Türk Standartları, TS 266		0,200	-	0,05	0,005	0,001	0,010	0,005	TSE (2022)

*TE: Tespit edilmemeli,

**TML: Toplam Migrasyon Limiti

***Al: Alüminyum, Zn: Çinko, Cr: Krom, Cd: Kadmiyum, Hg: Cıva, Pb: Kurşun, Sb: Antimon elementlerini ifade etmektedir.

Türkiye’de ve Dünya’da insani tüketim amacı ile kullanılan içme sularını kapsayan standartlarda en önemli limitlerden birisi de ağır metaller ile ilgili verilen

bulunmasına izin verilen maksimum limit değerlerdir. Tablo 4.8 incelendiğinde, hem ülkemizde hem de dünyadaki önemli standartlara dair limit değerler görülmektedir. 10/2011 sayılı Avrupa Birliği standartlarında gıda ile temas eden plastik maddelerden vücuda maksimum geçiş yapan toplam migrasyon seviyesi 60 mg/kg olarak verilmiştir. Türk Gıda Kodeksi gıda ile temas eden plastik malzemelerden vücuda geçiş yapan toplam migrasyon limiti de aynı seviyededir (EU, 2011; TGK, 2019).

Tablo 4.9 Plastik bardaklardan suya geçen ağır metal analizi sonuçları (ng/mL)

Örnek	Al	Cr	Zn	Cd	Pb	Sb	Hg
Kontrol	< 1,25	< 0,014	1,48 ± 0,04	< 0,006	< 0,01	< 0,007	< 0,008
50 °C PE KB	< 1,25	< 0,014	1,03±0,03	< 0,006	< 0,01	< 0,007	< 0,008
50 °C PP	< 1,25	< 0,014	1,60±0,05	< 0,006	< 0,01	< 0,007	< 0,008
80 °C PS	< 1,25	< 0,014	1,97±0,06	< 0,006	< 0,01	< 0,007	< 0,008
80 °C PET	49,63±3,30	< 0,014	4,05±0,12	< 0,006	< 0,01	0,73±0,01	< 0,008

*PS: Polistiren, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PEKB: Polietilen kaplı karton bardak

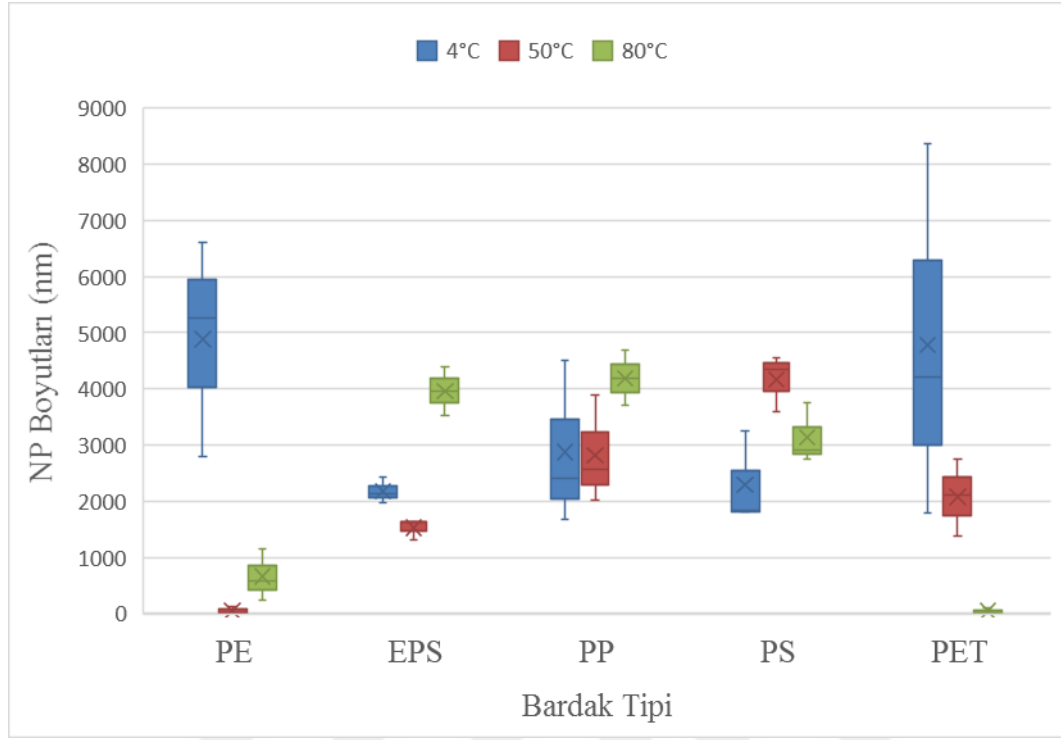
Tablo 4.9 incelendiğinde, plastik bardaklardan sıvıya Al elementinin geçişinde en yüksek geçiş 49,63±3,30 ng/mL olarak tespit edilmiştir. Alüminyum gıdalarda doğal olarak bulunur. Alüminyum ve bileşikleri insanlarda zayıf bir şekilde emilir, ancak hangi oranda emildikleri net bir şekilde araştırılmamıştır. Ayrıca Al maruziyeti, WHO tarafından muhtemelen insanlarda Alzheimer hastalığının (AD) başlangıcı için bir risk faktörüdür (Dahiya, 2022). Cr elementinin sıvı numunelerde tespit edilen değeri ise tespit limiti olan 0,014 ng/mL'den düşüktür. Zeng vd (2023) tarafından yapılan 100 °C 15 dk. tüketimin simüle edildiği çalışmada kontrolde 0,004±0,002 µg/L Cr tespit edilirken PE kaplı kağıt bardakta 0,033±0,018 µg/L, PP bardakta ise 0,028 ± 0,017 µg/L bulunmuştur. Çalışmamızda tespit ettiğimiz Cr seviyesi limitlerin altında tespit edilmiştir. Uluslararası Kanseri Araştırma Örgütü

(IARC) tarafından Grup 2A kanserojenik ağır metal sınıfında ilan edilen Pb elementi, su örneklerinde tespit limitlerinin altında ($<0,01$ ng/mL) olarak tespit edilmiştir. 10/2011 AB ile Türk Gıda Kodeksine göre içme sularında Pb bulunmamalıdır (Eti vd. 2023; EU, 2011; TKG, 2019). Cd elementi sonuçları yine tüm örneklerde 0,006 ng/ml'den daha düşük düzeyde tespit edilmiştir. Plastik gıda ambalajlarından (PET, PS, PP, PE ve PC) farklı gıda simülantlarına (distile su, %3 asetik asit çözeltisi ve %15 etil alkol çözeltisi) toplam ağır metal migrasyonunun incelendiği çalışmada, PP önemli ölçüde Cd açığa çıkarırken PET, PS ve PP ambalajlarda daha düşük seviyelerde Cd tespit edilmiştir (Eti vd., 2023). Zn beslenme açısından gerekli bir metaldir ve eksikliğinde ciddi sağlık sorunları ortaya çıkabilir. 32 farklı plastik gıda ambalajından gıdalara geçen on ağır metalin araştırıldığı bir çalışmada, Zn miktarı 7,27-88,69 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Çalışmada tespit edilen değer çalışmamızda tespit ettiğimiz 1.03-4.05 ng/ml değeri limitlerin altında bir değerdir (Noori vd., 2023). 10/2011 AB standartlarında Sb elementi için izin verilen sınır <0.04 mg/kg, Hg elementi için ise tespit edilmemelidir. WHO ise içme sularında Hg elementinin kabul edilebilir limitini 0,002 mg/L olarak açıklamıştır (WHO,2022). Çalışmamızda tespit edilen Hg elementine ait değer mevcut standarda uygundur. PE, PET, PC ve PP ambalajlardaki ağır metal varlığını inceleyen bir çalışmada, tüm numularında Sb elementini izin verilen limitlerin üstünde tespit etmiştir. Aynı çalışmada Hg elementi ise kabul edilebilir sınırlar içinde bulunmuştur (Eti vd.2023). Bu sonuçlar üzerinden en çok mikroplastik geçişi tespit edilen örneklerimize ait sular ulusal ve uluslararası limitlere göre güvenli olarak değerlendirilmektedir.

4.6 DLS Yöntemi ile Partikül Boyutu Ölçümü

Plastik bardaklardan sıvı gıdalara geçen nanoplastikleri belirlemek amacıyla bardaklarda farklı sıcaklıklarda tutulan sularda DLS yöntemi ile partikül boyut analizi yapılmıştır. Bu kapsamda 4 °C, 50 °C ve 80 °C su sıcaklıklarda 20 dk. bekleme periyodunda hazırlanan örneklerden ve kontrol olarak kullandığımız ultra saf suda boyut ölçümü sonuçları Şekil 4.13'de verilmiştir. Kontrol grubu analiz sonuçlarında ortalama partikül boyutu $129,39 \pm 107,03$ nm olarak tespit edilmiştir. En küçük boyutta sıvıya geçen nanopartiküller PET bardakta 80 °C 'de 41,78 nm

boyutundadır. En yüksek nanoboyutta ultra saf suya geçiş yapan partiküller 4 °C. PET ve PE bardaklarda ~4000 nm boyutunda gerçekleşmiştir.



*EPS: Expanded polistiren, PS: Polistiren, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PEKB: Polietilen kaplı karton bardak

Şekil 4.13 Nanopartiküllerin boyut dağılımı

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi su sıcaklığı arttıkça suya geçen partikül boyutlarının 80 °C EPS ve PP bardakta arttığı gözlemlenirken, PET bardaklarda durum tam tersi şekilde boyut küçülmesi ile sonuçlanmıştır. Son vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, LDPE ve polilaktik asit (PLA) kaplı kâğıt bardaklardan 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 98 °C sıcaklıkta 1, 5, 10, 30 ve 60 dk.'da ultra saf suya geçen nanoplastik miktarının tespiti üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sıvının temas ettiği süre arttıkça partikül boyutunun 1µm'den ~100 nm ile 200 nm boyutlarına düştüğü belirlenirken, su sıcaklığının artışı ile ultra saf suya salınan parçaçık boyutu ~100 nm'den 200 nm ve 1µm boyutlarına yükselmiştir.

PET bardaklarda bu durumun tersi bir boyut dağılımı gözlemlenmesinin temel sebebi, bu plastik molekülün camsı geçiş sıcaklığı T_g :75-80 °C olmasından dolayı

farklılık gözlemlenmiş olabilir. Çalışmamızda gerçekleştirdiğimiz yüksek sıcaklık uygulamasının moleküller arası bağların fiziksel olarak kırılmasına sebep olduğu bu nedenle daha küçük partikül boyutunda bir transfer gerçekleştirdiği düşünülmektedir.

4.7 Tüketici Mikroplastik Maruziyet Durumu

Günümüz toplumları sosyal yaşantısının bir parçası haline gelen dışarıda beslenme kültürü, son yıllarda artan bir talep görmektedir. Catering sektörünün hızlı gelişimi ve yemek uygulamaları ile tüketiciler kolaylıkla bulundukları yere yemek siparişi oluşturabilmektedir (Du vd., 2020). Çoğu sıcak tüketilen hazır yiyecek ve içecekler, plastik malzemelerden yapılmış bardaklar ve kutularda servis edilmektedir. Bu durum doğrudan hazır yemek servislerinde kullanılan plastik gıda ambalajlarının kullanımını da arttırmaktadır (Lee vd., 2019; Diaz-Besentes, Conesa & Fullana, 2020; Sewwandi vd., 2023). Tek kullanımlık plastik bardakların en yaygın kullanımı sıcak ve soğuk içeceklerin tüketimidir. Tek kullanımlık plastik bardaklar, toplu taşımalarda (şehirlerarası otobüs hizmetleri, uçaklar vb.), kafeteryalar ve okul kantinlerinden evlere kadar her yerde farklı nitelik ve içerikteki içeceklerin tüketimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. İstatistiklere göre, yalnızca ABD’de yılda 50 milyar plastik bardak kullanılmaktadır (Evans, 2019). Yapılan bir çalışmada, Türkiye’de tüketicilerin haftada 1-2 kez dışarıda yemek yedikleri tespit edilmiştir (Kolanowski vd., 2021). Bu çalışmadan hareketle ülkemizde tek kullanımlık plastiklerde tüketilen sıcak veya soğuk içecek miktarının yaklaşık 500-1000 mL sıvı içecek olduğu tahmin edilmektedir. Çalışmamız sonucunda elde ettiğimiz verilerin tüketici alışkanlıkları ile simüle edilmesi sonucu tüketicilerin yılda ne kadar mikroplastığe maruz kalacağı hesaplanmıştır (maksimum mikroplastik geçiş miktarı x Tüketilen içecek miktarı (L) x 52 hafta) (Hee vd., 2022). Gerçekleştirilen hesaplamalar ile tüketicilerin plastik bardak ile içecek tüketimi sonucu yılda vücutlarına ne kadar mikroplastik alımı gerçekleştirdikleri Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10 Yıllık mikroplastik maruziyeti (MP/yıl)

Bardak Türü	Maksimum Mikroplastik Varlığı (p/L)		Yıllık Maruz Kalınan Mikroplastik Miktarı (MP/yıl)	
	*	**	*	**
PS	1360	2006	35360-70720	52156-104312
PP	1420	920	36920-73840	23920-47480
PE KB	1346	720	34996-69992	18720-37440
EPS	720	3100	18720-37440	80600-161200
PET	1260	1060	32760-65520	27560-55120

* Plastik kaşık kullanılmayan örneklerde elde edilen maksimum sonuçları temsil etmektedir.

** Plastik kaşık kullanılan örneklerde elde edilen maksimum sonuçları temsil etmektedir.

* EPS: Expanded polistiren, PS: Polistiren, PET: Polietilen tereftalat, PP: Polipropilen, PEKB: Polietilen kaplı karton bardak

Günlük hayatlarımızın vazgeçilmezi tek kullanımlık plastik bardaklar her ne kadar işimizi kolaylaştırırsa da malesef tüketilen farklı sıcaklıktaki sıvılara geçen mikroplastiklerle vücudumuza farklı oranlarda giriş yapmaktadır. Tablo 4.10 incelendiğinde görüldüğü üzere genellikle tek kullanımlık plastiklerde tüketilen sıcak veya soğuk içecek miktarının haftada yaklaşık 500-1000 mL sıvı içecek olduğu tahmini ile yılda; PP bardak ile 23.920-73.840 adet, PE kaplı kâğıt bardak ile 18.720-69.992 adet, EPS bardak ile 18.720-161.200 adet, PS bardak ile 35.360-104.312 adet, PET bardak ile 27.560-65.520 mikroplastik partikülüne maruz kalınmaktadır. Cox vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, gıdalar ve içecekler aracılığı ile tüketicilerin yıllık 39.000-52.000 aralığında mikroplastığa maruz kaldıkları tespit edilmiştir. Zhou vd. (2023) tarafından, farklı su sıcaklıklarının plastik bardak türlerinde neden olduğu mikroplastik geçişinin incelendiği çalışmada, yıllık mikroplastik maruziyet miktarı; 37.613 ile 89.294 mikroplastik/yıl olarak belirlenmiştir. Farklı plastik türlerinden gıda ambalajlarının incelendiği başka bir çalışmada ise, PS gıda kaplarından yılda ~11.800 mikroplastik parçaçığın geçişi tespit edilirken, melamin gıda kaplarında bu değer ~18.500 parçaçık olduğu bulunmuştur (Hee vd., 2022).

Bu çalışmada, tüketicilerin günlük hayatında en fazla kullandığı beş farklı plastik malzeme türünden (EPS, PS, PP, PE ve PET) üretilmiş bardak seçilerek tüketimin yoğun olarak gerçekleştirildiği üç farklı sıcaklık derecesinde (4 °C, 50 °C ve 80 °C) bir tüketim periyodu boyunca (0, 5, 10 ve 20 dk.) maruz kaldığı mikroplastik miktarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk etapta, mikroplastiklerin izolasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca plastik bardakları kullanmadan önce ön yıkama işlemi gerçekleştirilmiş ve ön yıkamanın etkisi de çalışmada belirlenmiştir. Belirlenen mikroplastiklerin boyutu, renk ve şekil özellikleri kayıt altına alınmıştır. Alınan sonuçlar üzerinden tüketicilerin yıllık ne kadar mikroplastığe maruz kaldığı hesaplanmıştır. İkinci etapta ise sulara mikroplastik transfer mekanizmasını açıklamak amacıyla, uygulanan farklı sıcaklık derecelerinin bardak iç yüzeyinde meydana getirdiği kimyasal, morfolojik ve termal değişim ATR-FTIR, SEM ve DSC analizleri ile belirlenmiştir. Bardaklardaki sıvıya geçiş yapan nanoplastiklerin boyutları hakkında fikir edinmek için DLS tekniği kullanılarak partikül boyut dağılımı ölçümü yapılmıştır. Ayrıca en fazla mikroplastik sayımının gerçekleştirildiği örneklerde sıvıya geçen ağır metallerin tespiti, ICP-MS ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, en düşük mikroplastik geçişi PE kaplı kağıt bardakta 4 °C 0. dk.'da 126 p/L olarak tespit edilirken, en yüksek mikroplastik geçişi plastik kaşık kullanılan PS bardaktan 80 °C 5. dk. da 2006,67 p/L olarak bulunmuştur. Çalışmada elde edilen diğer bulgular maddeler halinde verilmiştir;

- Çalışmada sıvı gıdaya geçen ortalama mikroplastik miktarı plastik kaşık kullanılmayan örneklerde, $574,33 \pm 374,12$ p/L olarak tespit edilirken, plastik kaşık kullanılarak gerçekleştirilen örneklerde $901,00 \pm 650,04$ p/L olarak belirlenmiştir.
- Plastik bardaklarda kullanımdan önce ön yıkama gerçekleştirmenin salınan mikroplastik seviyesini %51-66 oranında azalttığı tespit edilmiştir ($p=0,038$, $p<0,05$). Bu durum tek kullanımlık plastik bardakları

kullanmadan önce su ile yıkamanın vücuda geçiş yapan mikroplastik seviyesini azalttığını göstermektedir.

- Çalışmamızda tespit edilen mikroplastiklerin renk özelliklerinde en baskın renk mavi (%22,6) olarak belirlenirken, lacivert (%15,8), siyah (%15,4), sarı (%14,2), şeffaf (%11,9), kırmızı (%9,9) ve mor (%9,9) renklerde belirtilen yüzdelerde dağılım göstermiştir.
- Çalışmamızda gözlemlenen mikroplastik parçacıkların şekil özelliklerine göre dağılımı sırasıyla %53,5 fiber, %28,5 fragman ve %17,8 film olarak belirlenmiştir.
- SEM analizinde gözlemlendiği gibi plastik bardakların yüksek sıcaklık derecelerinde kullanımı bardak iç yüzeyinde ciddi bir aşınma ve partikül kopuşları meydana getirmektedir.
- ATR-FTIR analizinde farklı sıcaklıklarda suların bekletildiği plastik bardakların iç yüzeyinde kimyasal yapıda bir değişim meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, plastik kapların iç yüzeylerinin ısı ile işlemle (yüzey erozyonu) aşınmasının bir göstergesi olabilecek şekilde referans dalgaboylarında IR ışın yoğunluğunun azaldığı görülmüştür.
- DLS tekniği ile farklı sıcaklıklardaki sıvı gıdalara mikroplastik partiküller dışında farklı boyutlarda nanopartiküllerin de geçiş yaptığı belirlenmiştir.
- Çalışmamız kapsamında, haftada bir veya iki kez dışarıda sıcak veya soğuk içecek tüketen tüketicilerin tek kullanımlık plastik bardakların kullanımıyla tercih ettikleri plastik türüne bağlı olarak 18.720-161.200 MP/yıl düzeyinde mikroplastığe maruz kaldıkları tespit edilmiştir.

Tüm sonuçlar dikkate alındığında, bu çalışma günlük hayatımızın vazgeçilmezi tek kullanımlık plastik bardakların bir gıda güvenliği sorunu olduğuna dikkati çekmeyi amaçlamaktadır. Bilindiği gibi insanlar günlük hayatlarında farklı oranlarda mikro- ve nanoplastiklere maruz kalmaktadır. Maruz kalınan bu partiküllerin vücuttaki emilim ve atılım mekanizması üzerine hala çalışmalar artan hızıyla devam etmektedir.

Gıdalarla veya plastik gıda ambalajlarının kullanımıyla vücuda giren plastik partiküller hem gıda kontaminantı hem de bir çevre kirliliği sorunudur. Bu

sorunun çözümü için gelecek çalışmalarda konunun farklı boyutlarda da ele alınması bir zorunluluktur. Türkiye’de bu konudaki araştırmalar oldukça kısıtlıdır. Ülkemizdeki tüketicilerin ne denli bir kontaminasyona maruz kaldığı net değildir. Bu çalışma ile tüketicilerin bu konu ile ilgili farkındalık kazanması sağlanacaktır.

Mikroplastik varlığı ile ilgili gelecek çalışmalarda,

- farklı niteliklere sahip içeceklerde (maden suyu, meyve suyu, gazlı içecekler vb.) mikroplastik varlığı ile farklı depolama ve tüketim koşullarının mikroplastik geçişi üzerine etkisi,
- mikroplastik varlığı henüz belirlenmemiş farklı gıda maddelerinde (yaş meyve-sebze, sokak yemekleri, fast-food ürünler, bebek mamaları vb.) mikroplastik varlığı,
- endüstriyel mutfaklarda sıklıkla kullanılan alet-ekipmanların ve paket malzemelerinin mikroplastik transferi üzerine etkisine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmesi,
- Gıda ve içeceklerle vücuda alınan plastik partiküllerinin sağlık üzerine etkilerinin çalışılması ve

sonuç olarak, her türlü ambalaj vb kullanımlarda plastik partiküllerinin oluşumunun engellenmesi ve bunların bulunduğu ortamdan ayrılarak tüketiminin önlenmesi üzerine interdisipliner araştırmaların yapılması da önemli görülmektedir.

- Abbasi, S., & Turner, A. (2021). Human exposure to microplastics: a study in Iran. *Journal of hazardous materials*, 403, 123799. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123799>
- Abraham, J., & Diller, K. (2019). A review of hot beverage temperatures—Satisfying consumer preference and safety. *Journal of Food Science*, 84, 2011-2014. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14699>
- Adhikari, S., Kelkar, V., Kumar, R., & Halden, R. U. (2022). Methods and challenges in the detection of microplastics and nanoplastics: a mini-review. *Polymer International*, 71(5), 543-551. <https://doi.org/10.1002/pi.6348>
- Afrin, S., Rahman, M. M., Hossain, M. N., Uddin, M. K., & Malafaia, G. (2022). Are there plastic particles in my sugar? A pioneering study on the characterization of microplastics in commercial sugars and risk assessment. *Science of The Total Environment*, 837, 155849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155849>
- Ahmed, N. (2023). Utilizing plastic waste in the building and construction industry: A pathway towards the circular economy. *Construction and Building Materials*, 383, 131311.
- Akçay, S., Törnük, F., & Yetim, H. (2020). Mikroplastikler: Gıdalarda bulunuşu ve sağlık üzerine etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 530-538. <https://doi.org/10.31590/ejosat.725259>
- Akhbarizadeh, R., Dobaradaran, S., Nabipour, I., Tajbakhsh, S., Darabi, A. H., & Spitz, J. (2020). Abundance, composition, and potential intake of microplastics in canned fish. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111633. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111633>
- Alimba, C. G., & Faggio, C. (2019). Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 68, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>
- Altunışık, A. (2023). Microplastic pollution and human risk assessment in Turkish bottled natural and mineral waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 39815-39825. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117720>
- Amato-Lourenço, L. F., Carvalho-Oliveira, R., Júnior, G. R., dos Santos Galvão, L., Ando, R. A., & Mauad, T. (2021). Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126124. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Arı, M., & Ögüt, S. (2021). Mikroplastikler ve Çevresel Etkileri. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 864-877. <https://doi.org/10.29130/dubited.757698>

- Ateş, M. (2018). Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 11(1), 63-69.
- Atugoda, T., Piyumali, H., Wijesekara, H., Sonne, C., Lam, S. S., Mahatantila, K., & Vithanage, M. (2023). Nanoplastic occurrence, transformation and toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 363-381. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01479-w>
- Auta, H., Emenike, C., & Fauziah, S. (2017). Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation. *Environmental Pollution*, 231, 1552-1559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.043>
- Baalkhuyur, F. M., Dohaish, E. J. A. B., Elhalwagy, M. E., Alikunhi, N. M., AlSuwailem, A. M., Rostad, A., Coker, D. J., Berumen, M. L., & Duarte, C. M. (2018). Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea coast. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.040>
- Bai, C. L., Liu, L. Y., Guo, J. L., Zeng, L. X., & Guo, Y. (2022). Microplastics in take-out food: Are we over taking it?. *Environmental Research*, 215, 114390. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114390>
- Bang, D. Y., Kyung, M., Kim, M. J., Jung, B. Y., Cho, M. C., Choi, S. M., ... & Lee, B. M. (2012). Human risk assessment of endocrine-disrupting chemicals derived from plastic food containers. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11(5), 453-470. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00197.x>
- Bhattacharjee, S. (2016). DLS and zeta potential—what they are and what they are not?. *Journal of controlled release*, 235, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.06.017>
- Bitter, H., & Lackner, S. (2021). Fast and easy quantification of semi-crystalline microplastics in exemplary environmental matrices by differential scanning calorimetry (DSC). *Chemical Engineering Journal*, 423, 129941. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129941>
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the total environment*, 612, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Braun, T., Ehrlich, L., Henrich, W., Koepfel, S., Lomako, I., Schwabl, P., & Liebmann, B. (2021). Detection of microplastic in human placenta and meconium in a clinical setting. *Pharmaceutics*, 13, 921. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13070921>
- Carbery, M., O'Connor, W., & Palanisami, T. (2018). Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International*, 115, 400-409. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.007>
- Chaudhry, A. K., & Sachdeva, P. (2021). Microplastics' origin, distribution, and rising hazard to aquatic organisms and human health: Socio-economic

- insinuations and management solutions. *Regional Studies in Marine Science*, 48, 102018. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102018>
- Chen, H., Xu, L., Yu, K., Wei, F., & Zhang, M. (2023). Release of microplastics from disposable cups in daily use. *Science of The Total Environment*, 854, 158606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158606>
- Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H., & Luo, Y. (2020). Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 18, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.05.004>
- Chen, Z., Hay, J. N., & Jenkins, M. J. (2013). The thermal analysis of poly (ethylene terephthalate) by FTIR spectroscopy. *Thermochimica Acta*, 552, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.11.002>
- Chércoles Asensio, R., San Andrés Moya, M., De la Roja, J. M., & Gómez, M. (2009). Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 395, 2081-2096. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3201-2>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Conti, G. O., Ferrante, M., Banni, M., Favara, C., Nicolosi, I., Cristaldi, A., ... & Zuccarello, P. (2020). Micro-and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research*, 187, 109677. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>
- Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F., & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53, 7068-7074. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- De-la-Torre, G. E. (2020). Microplastics: An emerging threat to food security and human health. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1601-1608. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04138-1>
- Dahiya, V. (2022). Heavy metal toxicity of drinking water: A silent killer. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 19(1), 020-025. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2022.19.1.0107>
- Diaz-Basantes, M. F., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2020). Microplastics in honey, beer, milk and refreshments in Ecuador as emerging contaminants. *Sustainability*, 12, 5514. <https://doi.org/10.3390/su12145514>
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?. *Marine pollution bulletin*, 104(1-2), 290-293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>

- Du, F., Cai, H., Zhang, Q., Chen, Q., & Shi, H. (2020). Microplastics in take-out food containers. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 122969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122969>
- Ebrahimi, P., Abbasi, S., Pashaei, R., Bogusz, A., & Oleszczuk, P. (2022). Investigating impact of physicochemical properties of microplastics on human health: A short bibliometric analysis and review. *Chemosphere*, 289, 133146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133146>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *Efsa Journal*, 14(6), e04501.
- Ekvall, M. T., Lundqvist, M., Kelpsiene, E., Šileikis, E., Gunnarsson, S. B., & Cedervall, T. (2019). Nanoplastics formed during the mechanical breakdown of daily-use polystyrene products. *Nanoscale Advances*, 1(3), 1055-1061. <https://doi.org/10.1039/C8NA00210J>
- Enfrin, M., Dumée, L. F., & Lee, J. (2019). Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes—origin, impact and potential solutions. *Water research*, 161, 621-638. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.049>
- Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., & Amato, S. (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*, 77, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- Eroğlu, Y., (2024). Türkiye Plastik Sektör İzleme Raporu 2024/3.12.05.2024 tarihinde <https://pagev.org/turkiye-plastik-sektor-izleme-raporu-2024-3> adresinden erişildi.
- Esmeray, E., & Armutcu, C. (2020). Mikroplastikler, çevre ve insan sağlığı üzerine etkileri ve analiz yöntemleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 839-868. <https://doi.org/10.29130/dubited.586453>
- Eti, S. A., Islam, M. S., Shourove, J. H., Saha, B., Ray, S. K., Sultana, S., ... & Rahman, M. M. (2023). Assessment of heavy metals migrated from food contact plastic packaging: Bangladesh perspective. *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19667>
- European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. *Off. J. Eur. Union*, 12, 1-89.
- Fadare, O. O., Wan, B., Guo, L.-H., & Zhao, L. (2020). Microplastics from consumer plastic food containers: Are we consuming it? *Chemosphere*, 253, 126787. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126787>
- Fang, C., Luo, Y., & Naidu, R. (2023). Microplastics and nanoplastics analysis: options, imaging, advancements and challenges. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117158. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117158>
- Fonseca, M. M. A., Gamarro, E. G., Toppe, J., Bahri, T., & Barg, U. (2017). The impact of microplastics on food safety: The case of fishery and aquaculture

- products. *FAO Aquaculture Newsletter*, 43-45. Erişim adresi: <https://www.fao.org/3/I7677E/I7677E.pdf> (Erişim Tarihi: Nisan, 2020).
- Gallego-Schmid, A., Mendoza, J. M. F., & Azapagic, A. (2019). Environmental impacts of takeaway food containers. *Journal of Cleaner Production*, 211, 417-427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.220>
- Gesamp. (2016). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 220.
- Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental science: processes & impacts*, 17(9), 1513-1521. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/em/c5em00207a>
- Gigault, J., Ter Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P. Y., Gauffre, F., Phi, T. L., ... & Reynaud, S. (2018). Current opinion: what is a nanoplastic?. *Environmental pollution*, 235, 1030-1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Gulmine, J., Janissek, P., Heise, H., & Akcelrud, L. (2002). Polyethylene characterization by FTIR. *Polymer Testing*, 21, 557-563. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00124-6)
- Gündoğdu, S. (2018). Contamination of table salts from Turkey with microplastics. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35, 1006-1014. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1447694>
- Hassan, F., Prasetya, K. D., Hanun, J. N., Bui, H. M., Rajendran, S., Kataria, N., ... & Jiang, J. J. (2023). Microplastic contamination in sewage sludge: Abundance, characteristics, and impacts on the environment and human health. *Environmental Technology & Innovation*, 103176. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103176>
- He, Y. J., Qin, Y., Zhang, T. L., Zhu, Y. Y., Wang, Z. J., Zhou, Z. S., ... & Luo, X. D. (2021). Migration of (non-) intentionally added substances and microplastics from microwavable plastic food containers. *Journal of hazardous materials*, 417, 126074. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126074>
- Hee, Y. Y., Weston, K., & Suratman, S. (2022). The effect of storage conditions and washing on microplastic release from food and drink containers. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100826>
- Heidbreder, L. M., Lange, M., & Reese, G. (2021). # Plasticfreejuly—analyzing a worldwide campaign to reduce single-use plastic consumption with twitter. *Environmental Communication*, 15(7), 937-953. <https://doi.org/10.1080/17524032.2021.1920447>
- Hernandez, L. M., Xu, E. G., Larsson, H. C., Tahara, R., Maisuria, V. B., & Tufenkji, N. (2019). Plastic teabags release billions of microparticles and nanoparticles into tea. *Environmental Science & Technology*, 53, 12300-12310. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02540>

- Hu, J. L., Duan, Y., Zhong, H. N., Lin, Q. B., Zhang, T., Zhao, C. C., ... & Zheng, J. G. (2023). Analysis of microplastics released from plastic take-out food containers based on thermal properties and morphology study. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 40(2), 305-318. <https://doi.org/10.1080/19440049.2022.2157894>
- Huang, Z., Hu, B., & Wang, H. (2023). Analytical methods for microplastics in the environment: a review. *Environmental chemistry letters*, 21(1), 383-401. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01525-7>
- Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. D. L. A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., ... & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific reports*, 7(1), 14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- Iñiguez, M. E., Conesa, J. A., & Fullana, A. (2017). Microplastics in Spanish table salt. *Scientific Reports*, 7(1), 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x>
- Ivleva, N. P. (2021). Chemical analysis of microplastics and nanoplastics: challenges, advanced methods, and perspectives. *Chemical reviews*, 121(19), 11886-11936. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>
- Jadhav, E. B., Sankhla, M. S., Bhat, R. A., & Bhagat, D. S. (2021). Microplastics from food packaging: An overview of human consumption, health threats, and alternative solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100608. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100608>
- Janssens, V., (2022). Plastics-the Facts 2022.15.04.2023 tarihinde <https://plasticseurope.org> adresinden erişildi.
- Johnson, N. G., Burnett, L. E., & Burnett, K. G. (2011). Properties of bacteria that trigger hemocytopenia in the Atlantic blue crab, *Callinectes sapidus*. *The Biological Bulletin*, 221(2), 164-175.
- Joseph, A., Parveen, N., Ranjan, V. P., & Goel, S. (2023). Drinking hot beverages from paper cups: Lifetime intake of microplastics. *Chemosphere*, 317, 137844. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137844>
- Jung, M. R., Horgen, F. D., Orski, S. V., Rodriguez, V., Beers, K. L., Balazs, G. H., ... & Lynch, J. M. (2018). Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Marine pollution bulletin*, 127, 704-716. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>
- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., et al. (2016). Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408, 8377-8391. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9956-3>
- Karami, A., Golieskardi, A., Choo, C. K., Larat, V., Karbalaei, S., & Salamatinia, B. (2018). Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. *Science of the Total Environment*, 612, 1380-1386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.005>

- Kasmuri, N., Tarmizi, N. A. A., & Mojiri, A. (2022). Occurrence, impact, toxicity, and degradation methods of microplastics in environment—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 30820-30836. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18268-7>
- Kayan, A., & Küçük, A. (2020). Plastik kirliliğin çevresel zararları ve çözüm önerileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), 403-427.
- Kedzierski, M., Lechat, B., Sire, O., Le Maguer, G., Le Tilly, V., & Bruzard, S. (2020). Microplastic contamination of packaged meat: Occurrence and associated risks. *Food Packaging and Shelf Life*, 24, 100489. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100489>
- Kim, H., Zaheer, J., Choi, E. J., & Kim, J. S. (2022). Enhanced ASGR2 by microplastic exposure leads to resistance to therapy in gastric cancer. *Theranostics*, 12(7), 3217-3236. <https://www.thno.org/v12p3217.htm>
- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water research*, 155, 410-422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Kolanowski, W., Karaman, A. D., Yildiz Akgul, F., Ługowska, K., & Trafialek, J. (2021). Food safety when eating out—Perspectives of young adult consumers in Poland and Turkey—A pilot study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 1884. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041884>
- Kong, Y., & Hay, J. N. (2002). The measurement of the crystallinity of polymers by DSC. *Polymer*, 43(14), 3873-3878. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00235-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00235-5)
- Kosuth, M., Mason, S. A., & Wattenberg, E. V. (2018). Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS One*, 13(4), e0194970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Koyuncuoğlu, P. (2021). Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Kaynaklı Mikroplastik Kirlilik Profiline Belirlenmesi: Denizli İli Örneği.(Doktora Tezi).Yöktez.
- Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D. C., Gupta, J., Khan, E., ... & Bolan, N. S. (2020). Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environmental Pollution*, 265, 114980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Shruti, V. C. (2020). Branded milks—Are they immune from microplastics contamination? *Science of The Total Environment*, 714, 136823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136823>
- Kwon, J. H., Kim, J. W., Pham, T. D., Tarafdar, A., Hong, S., Chun, S. H., ... & Jung, J. (2020). Microplastics in food: a review on analytical methods and challenges. *International journal of environmental research and public health*, 17(18), 6710. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186710>

- Laborda, F., Trujillo, C., & Lobinski, R. (2021). Analysis of microplastics in consumer products by single particle-inductively coupled plasma mass spectrometry using the carbon-13 isotope. *Talanta*, 221, 121486. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121486>
- Lee, H., Kunz, A., Shim, W. J., & Walther, B. A. (2019). Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review. *Scientific reports*, 9(1), 10145. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46417-z>
- Lee, H., Kunz, A., Shim, W. J., & Walther, B. A. (2019). Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review. *Scientific Reports*, 9, 10145. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46417-z>
- Lee, J., & Chae, K. J. (2021). A systematic protocol of microplastics analysis from their identification to quantification in water environment: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 124049. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124049>
- Lee, J., Kong, J., & Jeong, S. (2024). To avoid overestimation of microplastics released from actual usage of disposable cups: In-depth quantitative analysis of microplastics and simultaneously exposed chemicals. *Microchemical Journal*, 196, 109629. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109629>
- Lee, M., Kim, H., Ryu, H. S., Moon, J., Khant, N. A., Yu, C., & Yu, J. H. (2022). Review on invasion of microplastic in our ecosystem and implications. *Science Progress*, 105(4), 00368504221140766. <https://doi.org/10.1177/00368504221140766>
- Lee, Y., Cho, S., Park, K., Kim, T., Kim, J., Ryu, D. Y., & Hong, J. (2023). Potential lifetime effects caused by cellular uptake of nanoplastics: A review. *Environmental Pollution*, 121668. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121668>
- Leslie, H. A., Van Velzen, M. J., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L., Xiao, L., Kehoe, D. K., Gun'ko, Y. K., ... & Wang, J. J. (2020). Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nature Food*, 1(11), 746-754. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Liang, B., Zhong, Y., Huang, Y., Lin, X., Liu, J., Lin, L., ... & Huang, Z. (2021). Underestimated health risks: polystyrene micro-and nanoplastics jointly induce intestinal barrier dysfunction by ROS-mediated epithelial cell apoptosis. *Particle and fibre toxicology*, 18(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s12989-021-00414-1>
- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2013). Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 30(12), 2136-2140. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

- Liebezeit, G., & Liebezeit, E. (2014). Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 31(10), 1574-1578. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.945099>
- Liu, J., Zhang, T., Piché-Choquette, S., Wang, G., & Li, J. (2021). Microplastic pollution in China, an invisible threat exacerbated by food delivery services. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(5), 778-785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151685>
- Liu, S., Liu, X., Guo, J., Yang, R., Wang, H., Sun, Y., ... & Dong, R. (2022). The association between microplastics and microbiota in placentas and meconium: The first evidence in humans. *Environmental Science & Technology*, 57(23), 17774-17785. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04706>
- Luo, Y., Awoyemi, O. S., Naidu, R., & Fang, C. (2023). Detection of microplastics and nanoplastics released from a kitchen blender using Raman imaging. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 131403. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131403>
- Lusher, A., Hollman, P., & Mendoza-Hill, J. (2017). Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, (615).
- Makhdoumi, P., Amin, A. A., Karimi, H., Pirsheh, M., Kim, H., & Hossini, H. (2021). Occurrence of microplastic particles in the most popular Iranian bottled mineral water brands and an assessment of human exposure. *Journal of Water Process Engineering*, 39, 101708. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101708>
- Mansa, R., & Zou, S. (2021). Thermogravimetric analysis of microplastics: A mini review. *Environmental Advances*, 5, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100117>
- Mao, X., Xu, Y., Cheng, Z., Yang, Y., Guan, Z., Jiang, L., & Tang, K. (2022). The impact of microplastic pollution on ecological environment: a review. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 27(2), 46. <https://doi.org/10.31083/j.fbl2702046>
- Mariano, S., Tacconi, S., Fidaleo, M., Rossi, M., & Dini, L. (2021). Micro and nanoplastics identification: classic methods and innovative detection techniques. *Frontiers in toxicology*, 3, 636640. <https://doi.org/10.3389/ftox.2021.636640>
- Mohamed Nor, N. H., Kooi, M., Diepens, N. J., & Koelmans, A. A. (2021). Lifetime accumulation of microplastic in children and adults. *Environmental science & technology*, 55(8), 5084-5096. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07384>
- Mourad, A. H. I., Akkad, R. O., Soliman, A. A., & Madkour, T. M. (2009). Characterisation of thermally treated and untreated polyethylene–polypropylene blends using DSC, TGA and IR techniques. *Plastics, Rubber and Composites*, 38(7), 265–278. <https://doi.org/10.1179/146580109X12473409436625>

- Mühlschlegel, P., Hauk, A., Walter, U., & Sieber, R. (2017). Lack of evidence for microplastic contamination in honey. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(11), 1982-1989. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1347281>
- Nelis, J. L., Schacht, V. J., Dawson, A. L., Bose, U., Tsagkaris, A. S., Dvorakova, D., ... Thomas, K. V. (2023). The measurement of food safety and security risks associated with micro-and nanoplastic pollution. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 161, 116993. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116993>
- Nguyen, V. T., Linh, T. T. T., Vo, T. K., Nguyen, Q. H., & Van, T. K. (2023). Analytical techniques for determination of heavy metal migration from different types of locally made plastic food packaging materials using ICP-MS. *Food Science & Nutrition*, 11(7), 4030-4037. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3391>
- Noori, H. J., Ahmad, H. I., & Rasheed, R. M. (2023). Determination of heavy metals in Iranian food packaging plastic. *Academic Journal of Nawroz University*, 12(4), 559-563. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v12n4a1226>
- Olatunji, O., (2022). Plastic and Polymer Industry by Region 15.04.2023 tarihinde <https://doi.org/10.1007/978-981-19-5231-9> adresinden erişildi.
- Oliveira, M., & Almeida, M. (2019). The why and how of micro (nano) plastic research. *TrAC Trends in analytical chemistry*, 114, 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.02.023>
- Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., Omar, S., Elgarahy, A. M., Farghali, M., ... & Akinyede, K. A. (2023). Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 2129-2169. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
- Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water research*, 141, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
- Opmaan, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., Dicke, W. (2018). Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water research*, 141, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>
- Piringer, O.G. and Baner, A.L. (2008) *Plastic Packaging: Interactions with Food and Pharmaceuticals*. 2nd Edition, Wiley-VCH, Weisheim. <http://dx.doi.org/10.1002/9783527621422>
- Prata, J. C. (2018). Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. *Marine Pollution Bulletin*, 129, 262-265. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.046>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., ... & Draghi, S. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

- Rai, P. K., Lee, J., Brown, R. J., & Kim, K. H. (2021). Environmental fate, ecotoxicity biomarkers, and potential health effects of micro-and nano-scale plastic contamination. *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123910. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123910>
- Ramasamy, B. S. S., & Palanisamy, S. (2021). A review on occurrence, characteristics, toxicology and treatment of nanoplastic waste in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43258-43273. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14883-6>
- Ramasamy, R., & Murugan, M. (2022). Microplastics: Distribution, Isolation, Detection, and Effects on Flora and Fauna—A Mini Review. *World Journal of Environmental Biosciences*, 11(4-2022), 1-8. <https://doi.org/10.51847/93t7FJrzKu>
- Ranjan, V. P., Joseph, A., & Goel, S. (2021). Microplastics and other harmful substances released from disposable paper cups into hot water. *Journal of Hazardous Materials*, 404, 124118. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124118>
- Sa'adu, I., & Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9>
- Sana, S. S., Dogiparthi, L. K., Gangadhar, L., Chakravorty, A., & Abhishek, N. (2020). Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 44743-44756. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10573-x>
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series. *Annals of Internal Medicine*, 171(6), 453-457.
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U., & Fürst, P. (2018). Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research*, 129, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>
- Schirrmeister, S., Kurzweg, L., Gjashta, X., Socher, M., Fery, A., & Harre, K. (2024). Regression analysis for the determination of microplastics in sediments using differential scanning calorimetry. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33100-8>
- Selamoğlu Çağlayan, H., & Aytan Kopuz, Ü. (2020). Mikroplastiklerin Deniz Çevresinde Neden Olduğu Etkiler. *Doğanın Sesi*(6), 44-56.
- Sewwandi, M., Wijesekara, H., Rajapaksha, A. U., Soysa, S., & Vithanage, M. (2023). Microplastics and plastics-associated contaminants in food and beverages; Global trends, concentrations, and human exposure. *Environmental Pollution*, 317, 120747. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120747>
- Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. E. (2017). Identification methods in microplastic analysis: a review. *Analytical Methods*, 9(9), 1384-1391. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>

- Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I., & Kutralam-Muniasamy, G. (2020). First study of its kind on the microplastic contamination of soft drinks, cold tea and energy drinks - Future research and environmental considerations. *Science of The Total Environment*, 138580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138580>
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>
- Son, J. W., Nam, Y., & Kim, C. (2024). Nanoplastics from disposable paper cups and microwavable food containers. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 133014. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133014>
- Sorolla-Rosario, D., Llorca-Porcel, J., Pérez-Martínez, M., Lozano-Castello, D., & Bueno-Lopez, A. (2022). Study of microplastics with semicrystalline and amorphous structure identification by TGA and DSC. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 106886. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106886>
- Stapleton, P. A. (2021). Microplastic and nanoplastic transfer, accumulation, and toxicity in humans. *Current opinion in toxicology*, 28, 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.10.001>
- Tagg, A. S., Sapp, M., Harrison, J. P., & Ojeda, J. J. (2015). Identification and quantification of microplastics in wastewater using focal plane array-based reflectance micro-FT-IR imaging. *Analytical chemistry*, 87(12), 6032-6040. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b00495>
- Talukdar, A., Bhattacharya, S., Bandyopadhyay, A., & Dey, A. (2023). Microplastic pollution in the Himalayas: Occurrence, distribution, accumulation and environmental impacts. *Science of the Total Environment*, 874, 162495. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162495>
- Thaiba, B. M., Sedai, T., Bastakoti, S., Karki, A., Anuradha, K. C., Khadka, G., ... & Neupane, B. B. (2023). A review on analytical performance of micro-and nanoplastics analysis methods. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(5), 104686. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104686>
- Toussaint, B., Raffael, B., Angers-Loustau, A., Gilliland, D., Kestens, V., Petrillo, M., Rio-Echevarria, I. M., & Van den Eede, G. (2019). Review of micro-and nanoplastic contamination in the food chain. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 36(5), 639-673. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1583381>
- Tsochatzis, E. D., Gika, H., Theodoridis, G., Maragou, N., Thomaidis, N., & Corredig, M. (2024). Microplastics and nanoplastics: exposure and toxicological effects require important analysis considerations. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32261>
- TSE, Türk Standardları Enstitüsü. Sular - İnsanî tüketim amaçlı sular. Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü, Kabul 28.04.2022, TS 266/T3: 2022.
- Türk Gıda Kodeksi, Gıda İle Temas Eden Plastik Madde Ve Malzemeler Tebliği. (Tebliğ No: 2019/44). (2019,25 Aralık).Resmi Gazete (Sayı: 30989

(Mükerrer)).ErişimAdresi:<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191225M1-10.htm>

- Urbaniak-Domagala, W. The use of the spectrometric technique FTIR-ATR to examine the polymers surface. *Advanced aspects of spectroscopy* 2012, 3, 85-104. <http://dx.doi.org/10.5772/48143>.
- Üçüncü, M. (2011).Gıda Ambalajlama Teknolojisi. Ambalaj Sanayicileri Derneği.
- Van Cauwenberghe, L.; Janssen, C.R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental pollution* 2014, 193, 65-70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- Verschoor, A., De Poorter, L., Roex, E., & Bellert, B. (2014). Quick scan and prioritization of microplastic sources and emissions. RIVM Letter report, 156, 141.
- Vitali, C., Peters, R. J., Janssen, H.-G., & Nielen, M. W. (2023). Microplastics and nanoplastics in food, water, and beverages; part I. Occurrence. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 159, 116670. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2022.116670>
- Waring, R. H., Harris, R., & Mitchell, S. (2018). Plastic contamination of the food chain: A threat to human health? *Maturitas*, 115, 64-68. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.06.010>
- Weisser, J., Beer, I., Hufnagl, B., Hofmann, T., Lohninger, H., Ivleva, N. P., & Glas, K. (2021). From the well to the bottle: identifying sources of microplastics in mineral water. *Water*, 13(6), 841. <https://doi.org/10.3390/w13060841>
- Welle, F., & Franz, R. (2018). Microplastic in bottled natural mineral water–literature review and considerations on exposure and risk assessment. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 35(12), 2482-2492. <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1543957>
- Wilcox, C., Van Sebille, E., & Hardesty, B. D. (2015). Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the national academy of sciences*, 112(38), 11899-11904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1502108112>
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. World Health Organization.
- Yates, J., Deeney, M., White, H., Joy, E., Kalamatianou, S., & Kadiyala, S. (2019). PROTOCOL: Plastics in the food system: Human health, economic and environmental impacts. A scoping review. *Campbell Systematic Reviews*, 15(1-2). <https://doi.org/10.1002/cl2.1033>
- Yee, M. S.-L., Hii, L.-W., Looi, C. K., Lim, W.-M., Wong, S.-F., Kok, Y.-Y., Tan, B.-K., Wong, C.-Y., & Leong, C.-O. (2021). Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials*, 11(2), 496. <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

- Yurtsever, M. (2019). Nano- ve mikroplastik' lerin insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki olası etkileri. *Menba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 5(2), 17-24.
- Yurtsever, M. (2018). Abiyotik bir su ürünü olan sofrta tuzunda mikroplastik kirliliği tehlikesi. *Ege Journal of Fisheries & Aquatic Sciences (EgeJFAS)/Su Ürünleri Dergisi*, 35, <https://doi.org/10.12714/egejfas.2018.35.3.03>
- Zada, L., Leslie, H. A., Vethaak, A. D., Tinnevelt, G. H., Jansen, J. J., de Boer, J. F., & Ariese, F. (2018). Fast microplastics identification with stimulated Raman scattering microscopy. *Journal of Raman spectroscopy*, 49(7), 1136-1144. <https://doi.org/10.1002/jrs.5367>
- Zeng, X., Liu, D., Wu, Y., Zhang, L., Chen, R., Li, R., ... & Sun, Q. (2023). Heavy metal risk of disposable food containers on human health. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 255, 114797. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114797>
- Zhang, F., Wang, X., Xu, J., Zhu, L., Peng, G., Xu, P., & Li, D. (2019). Food-web transfer of microplastics between wild caught fish and crustaceans in East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 173-182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.05.061>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L., & Kannan, K. (2021). Occurrence of polyethylene terephthalate and polycarbonate microplastics in infant and adult feces. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(11), 989-994. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, T., Hu, J. L., Duan, Y., Chen, S., Li, D., Dong, B., ... & Lin, Q. B. (2023). Identification and characterisation of microplastics released from plastic-coated paper cups using micro-Raman spectroscopy. *Food Control*, 153, 109901. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109901>
- Zhang, Z., Zhao, S., Chen, L., Duan, C., Zhang, X., & Fang, L. (2022). A review of microplastics in soil: Occurrence, analytical methods, combined contamination and risks. *Environmental Pollution*, 306, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119374>
- Zhou, G., Wu, Q., Tang, P., Chen, C., Cheng, X., Wei, X.-F., Ma, J., & Liu, B. (2023). How many microplastics do we ingest when using disposable drink cups? *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129982. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129982>
- Zuccarello, P., Ferrante, M., Cristaldi, A., Copat, C., Grasso, A., Sangregorio, D., Fiore, M., & Conti, G. O. (2019). Exposure to microplastics (< 10 µm) associated with plastic bottles mineral water consumption: The first quantitative study. *Water Research*, 157, 365-371. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.091>
- Zurier, H. S., & Goddard, J. M. (2021). Biodegradation of microplastics in food and agriculture. *Current Opinion in Food Science*, 37, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.09.001>

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Akbulut, S., Törnük, F., & Yetim, H. (2022). Gıdalara Ambalaj Malzemelerinden Olası Mikroplastik Geçışı. *Türkiye 14. Gıda Kongresi*, Online, 19-21 Ekim 2022, 161-169.(Tam Metin-Sözlü Bildiri)
2. Akbulut, S., Törnük, F., & Yetim, H. (2022). Maden Sularında Olası Mikroplastik Kirliliği. *II. Uluslararası Maden Suyu Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 17-18 Kasım 2022, 149-160.(Tam Metin-Sözlü Bildiri)
3. Akbulut, S., Akman, K, P., Tornuk, F., & Yetim, H. (2023). Determination of Microplastic Release from Disposable Plastic Cups to Beverages. *3rd International Food Chemistry Congress*. Antalya, Türkiye, 29 February - 3 March, 2024,30.(Oral Presentation)

Makaleler

1. Akbulut S, Akman PK, Tornuk F, Yetim H. (2024). Microplastic Release from Single-Use Plastic Beverage Cups. *Foods*. 13(10):1564. <https://doi.org/10.3390/foods13101564>
2. Akçay, S., Törnük, F., & Yetim, H. (2020). Mikroplastikler: Gıdalarda Bulunuşu ve Sağlık Üzerine Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (20), 530-538. <https://doi.org/10.31590/ejosat.725259>