

**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ PROSES ATIK SULARINDA MİKROPLASTİK
VARLIĞININ TESPİTİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ MODELİ YAKLAŞIMI İLE
GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

GÖZDE ABACI

**Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Danışman: Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE
İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Can Burak ÖZKAL
2024**

T.C.
TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TEKSTİL ENDÜSTRİSİ PROSES ATIK SULARINDA MİKROPLASTİK
VARLIĞININ TESPİTİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ MODELİ YAKLAŞIMI İLE
GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

GÖZDE ABACI

ORCID: 0000-0002-1710-2615

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Danışman: Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE

İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Can Burak ÖZKAL

Ocak 2024

Her hakkı saklıdır.

ÖZET

TEKSTİL ENDÜSTRİSİ PROSES ATIK SULARINDA MİKROPLASTİK VARLIĞININ TESPİTİ VE DÖNGÜSEL EKONOMİ MODELİ YAKLAŞIMI İLE GİDERİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Gözde ABACI

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE

İkinci Danışman: Araş. Gör. Dr. Can Burak ÖZKAL

Bu çalışmada öncelikle %100 geri dönüştürülmüş pet şişelerden (recycled pet, R-PET) üretilen atkı ve çözgü ipliklerinden dokunan ham kumaşın boyanması sonrasında boya banyosuna karışan mikroplastiklerin varlığı mikroskopik ve elementel analiz yöntemleri ile araştırılmıştır. Mikroplastiklerin atık suda giderilmesine yönelik yeni, sürdürülebilir adsorbent malzeme alternatifleri tekstil işletmesi selüloz esaslı tekstil teleflerinden elde edilmiştir. Adsorbent üretiminde proses koşulları sabitlenirse de geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefı üretiminden elde edilen adsorbentlerin metilen mavisi çözeltisinde tekrarlanan deneylerdeki düşük performansı sebebiyle oldukça yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri ile lyocell bazlı adsorbenti farklı oranlarda katkılandırarak ve manyetik etki altında çözelti ortamından kolay ayrılabilmesi amacıyla spinel ferrit ile de katkılandırılmış malzeme (SFNK) elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında üretilen adsorbent malzemenin elementel analizleri yapılmıştır. Laboratuvar ortamında yeniden üretilebilirliği yüksek ve en verimli giderim sonucunu veren %100 lyocell esaslı iplik telefından elde edilen adsorbent ile metilen mavisi boyar madde renk giderim çalışmaları yapılarak optimum adsorbsiyon koşulları tespit edilmiştir. Belirlenen adsorbsiyon koşullarında atık sudaki mikroplastik giderimi incelenmiştir. Mikroplastik gideriminde başarılı olan bu adsorbetin önce metilen mavisi çözeltisindeki desorbsiyon koşulları araştırılmış ve bu koşullar altında boya banyosu proses atık suyunda desorbsiyon performansı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Recycled polyester, R-PET, Mikroplastik, Karbonizasyon, Aktif Karbon Adsorbsiyon, Desorbsiyon.

ABSTRACT

DETECTION OF THE PRESENCE OF MICROPLASTICS IN TEXTILE INDUSTRY PROCESS WASTEWATER AND EVALUATION OF THEIR REMOVAL USING THE CIRCULAR ECONOMY MODEL APPROACH

Gözde ABACI

Department of Environment Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE

Co-Supervisor: Assistant Dr. Can Burak ÖZKAL

In this study, firstly, the presence of microplastics discharged from the dye bath after the dyeing of the raw fabric woven from weft and warp threads produced from 100% recycled pet bottles (R-PET) was investigated by microscopic and elemental analysis methods. New, sustainable adsorbent material alternatives for the removal of microplastics in wastewater have been obtained from textile mill cellulose-based textile waste. Although the process conditions in adsorbent production are fixed, due to the low performance of the adsorbents obtained from the production of recycled cotton/viscose blend yarn waste in repeated experiments in methylene blue solution, the solution is prepared by adding Reduced Graphene Oxide (rGO) nanoparticles, which have a very high adsorption capacity, and lyocell-based adsorbent at different rates and using the solution under magnetic influence. Material (SFNK) doped with spinel ferrite was obtained in order to be easily separated from the environment. Elemental analyzes of the adsorbent material produced within the scope of the thesis study were carried out. Optimum adsorption conditions were determined by carrying out methylene blue dyestuff removal studies with the adsorbent obtained from 100% lyocell-based yarn waste, which provides the most reproducible and most efficient removal results in a laboratory environment. Microplastic removal in wastewater was tested under specified adsorption conditions. The desorption conditions of this adsorbate, which is successful in microplastic removal, in methylene blue solution were first investigated and its desorption performance in dye bath process wastewater was examined under these conditions.

Key Words: Recycled polyester, R-PET, Microplastic, Carbonization, Activated Carbon, Adsorption, Desorbition.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	7
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	41
2. MATERYAL VE METOT	43
2.1 Materyal	43
2.1.1 Dokuma Kumaş (R-PET).....	43
2.1.2 Atık Su	45
2.1.3 Adsorbent.....	46
2.2 Metot	47
2.2.1 Dokuma Kumaş Analizleri (R-PET).....	48
2.2.1.1 Mikroskopik analiz.....	48
2.2.1.2 FTIR Analizi.....	49
2.2.2 Atık Su Analizleri	49
2.2.2.1 Atık Su Konvensiyonel Testleri	49
2.2.2.2 Islak Oksidasyon İşlemi	50
2.2.2.3 Mikroplastik Tayini Testleri.....	51
2.2.2.4 FTIR Analizi.....	52
2.2.2.5 Süzme (filtrasyon)	52
2.2.2.6 Mikroskopik analiz.....	53
2.2.3 Adsorbent Üretimi	53
2.2.4 Adsorbent Katı Madde Hesaplamaları.....	55
2.2.5 Adsorbent Karakterizasyon Çalışmaları	56
2.2.5.1 SEM Analizi	56
2.2.5.2 RAMAN Analizi.....	56
2.2.5.3 FTIR Analizi.....	57
2.2.5.4 XRD Analizi	58
2.2.5.5 BET Analizi	59

2.2.6 Adsorbsiyon Çalışmaları.....	59
2.2.6.1 Adsorbsiyon ön testleri	59
2.2.7 Desorbsiyon Çalışmaları	61
3. BULGULAR	62
3.1 Kumaş Testleri	62
3.2 Proses Testleri	64
3.3 Atık Su Testleri	65
3.3.1 Atık Su Konvensiyonel Testler	65
3.3.2 Atık Su Mikroskobik Analizler.....	66
3.3.3 Atık Su FTIR Analizleri.....	67
3.4 Adsorbent Testleri.....	68
3.5 Adsorbent Karakterizasyon Çalışmaları	75
3.5.1 SEM Analizi.....	75
3.5.2 RAMAN Analizi	76
3.5.3 FTIR Analizi	78
3.5.4 XRD Analizi	80
3.5.5 BET Analizi	81
3.6 Desorbsiyon Testleri	84
4. DEĞERLENDİRMELER	91
4.1 Kumaş	91
4.2 Proses	91
4.3 Atık Su	91
4.4 Adsorbsiyon	91
4.5 Desorbsiyon	92
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Şekillerine göre mikroplastikler (Karaçam, 2022)	8
Çizelge 1.2 Polyester lifi özellikleri (Çiftçi, 2023)	17
Çizelge 1.3 Tekstil boyama prosesi atık su karakterizasyonu (Şeker, 2007)	19
Çizelge 1.4 Farklı sıcaklık ve basınçta boyanan kumaşların oligomer tayini (%) sonuçları (Çiftçi, 2023)	20
Çizelge 1.5 Toz ve granül formdaki aktif karbonun özellikleri (Şeker, 2007).....	33
Çizelge 1.6 Manyetik karbon materyallerin boyar madde uzaklaştırmaları (Zhang, Yang, 2020).....	36
Çizelge 1.7 1.6. 0,1 M EDTA kullanılarak sorbentlerin sorpsiyon-desorpsiyon verimleri. (Bediako vd., 2020)	38
Çizelge 1.8 Cüruf ve demir kaplı cüruf (DKC) malzemelerinin desorbsiyon performansı (Sarıgül, 2022).....	41
Çizelge 2.1. Ham kumaşın yapısal özellikleri	44
Çizelge 2.2 Boyama prosesi özellikleri	46
Çizelge 2.3 Aktif karbon üretimi deney koşulları	55
Çizelge 3.1 Atık su konvansiyonel test sonuçları.....	65
Çizelge 3.2 Mikroskopik analiz sonuçları (4x büyütme)	67
Çizelge 3.3 Adsorbent katı madde (%) bulguları	68
Çizelge 3.4 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (adsorbent tayini)	69
Çizelge 3.5 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (pH optimizasyonu)	70
Çizelge 3.6 Adsorbsiyon deneyi renk giderim verimi (pH optimizasyonu).....	71
Çizelge 3.7 Adsorbsiyon deneyi adsorbent miktarı optimizasyonu renk giderim verimi	72
Çizelge 3.8 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (süre optimizasyonu)	72
Çizelge 3.9 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (adsorbent optimizasyonu).....	74
Çizelge 3.10 Proses atık suyunda adsorbent performansları	75
Çizelge 3.11 Adsorbent gözenek büyüklüğü.....	83
Çizelge 3.12 Metilen mavisi çözeltisi (20 mg/l) renk değerleri	84
Çizelge 3.13 Desorbsiyon ortamı test sonuçları (metilen mavisi çözeltisi)	84

Çizelge 3.14 Birinci desorbsiyon ortamı renk ölçümü test sonuçları (proses atık suyu çözeltisi)	85
Çizelge 3.15 İkinci desorbsiyon ortamı renk ölçümü test sonuçları (proses atık suyu çözeltisi)	85
Çizelge 3.16 Mikroskobik analiz sonuçları (4x büyütme)	89
Çizelge 3.17 Mikroplastik giderim verimi (%)	89



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Küresel elyaf üretimi (TE, 2022)	11
Şekil 1.2 Geri dönüştürülmüş elyafların oranı (TE, 2023)	12
Şekil 1.3 Küresel Hazır Giyim Endüstrisi Polyester Elyafı Pazarı (gerçekleşen, bin ton ve %) (TE, 2023).....	12
Şekil 1.4 Küresel hazır giyim endüstrisi polyester elyafı pazarı (hedef, bin ton ve %) (TE, 2023)	13
Şekil 1.5 Polyester eriyiğinin elde edilmesi (Demiryürek 2004)	14
Şekil 1.6 Eriyikten lif çekme aşamaları (Altıntaş, 2022)	15
Şekil 1.7 Yuvarlak enine kesitli polyester lifinin (a) enine, (b) boyuna kesit görüntüsü (Altıntaş, 2022).....	15
Şekil 1.8 Farklı lif enine kesit yapıları (a) yuvarlak, (b) üçgen, (c) dörtgen, (d) altıgen, (e) sekizgen, (f) derin oluklu (Altıntaş, 2022)	16
Şekil 1.9 Kumaş tipleri bazında ham kumaş, konvensiyonel yöntemle boyanmış kumaş ve süperkritik ortamda boyanmış kumaşlara ait SEM görüntüleri (Çiftçi, 2023)	21
Şekil 1.10 Tek cins mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023)	23
Şekil 1.11 İkili kombinasyon halindeki mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023).....	23
Şekil 1.12 Üçlü kombinasyon halindeki mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023)....	24
Şekil 1.13 Polyester esaslı mikroplastiklerin FTIR analizi (Akyıldız, 2023).....	24
Şekil 1.14 Atık su numunelerinin micro-FTIR analizi (Akyıldız, 2023)	25
Şekil 1.15 Elyafların micro-FTIR analizi (Akyıldız, 2023)	26
Şekil 1.16 Elyaf ve ipliklerin SEM analizi (Akyıldız, 2023)	26
Şekil 1.17 Mikroplastik elyafların SEM görüntüleri (Sait vd., 2021)	28
Şekil 1.18 Polyester (A), Polyamid (B), Asetat (C) kumaşlara ait FTIR analizi (Yang vd., 2019)	29
Şekil 1.19 Polyester, Polyamid, Asetat evsel yıkamaların filtrasyonundan elde edilen mikroskop görüntüleri (Yang vd., 2019)	29
Şekil 1.20 Poliester kaynaklı tekstil atık suyunda tespit edilen ağır metallerin tezde üretilen aktif karbon ile hazırlanan N4 numunesindeki ağır metal giderimi (Kurt, 2021)	32
Şekil 1.21 (a) FTIR analizi AC, CZF-AC, and CZF-AC (MB loaded); (b) XRD analizi CZF-AC (Zhang, Yang, 2020)	35

Şekil 1.22 (a) LF numunelerinin SEM analizleri: (i) LF 300×, (ii) LF 3000×, (iii) modifiye CMC-LF 300× ve (iv) modifiye CMC-LF 3000×. (b) LS numunelerinin SEM mikrografları: (i) LS 300×, (ii) LS 3000×, (iii) modifiye CMC-LS 300× ve (iv) modifiye CMC-LS 3000x	39
Şekil 1.23 Değiştirilmiş (kırmızı çizgi) ve değiştirilmemiş (siyah çizgi) (a) LS ve (b) LF adsorbentlerinin FTIR spektrumları (Bediako, vd. 2016)	40
Şekil 2.1 Kumaş örgü yapısı ve boyanmış kumaş	44
Şekil 2.2 Then marka kumaş boyama makinesi	45
Şekil 2.3 Çalışılan numune görselleri (1: ticari aktif karbon; 2 ve 3: iplik esaslı adsorbent; 4: kumaş esaslı adsorbent)	46
Şekil 2.4 Deney çalışmaları akış diyagramı	47
Şekil 2.5 Mikroplastik tayini deney aşamaları	48
Şekil 2.6 Işık mikroskobu (Leica DM750)	48
Şekil 2.7 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı	49
Şekil 2.8 Multimetre ölçüm cihazı (Hach 40D)	50
Şekil 2.9 Toplam Organik Karbon (TOC) Ölçüm Cihazı (NABİLTEM, 2024)	50
Şekil 2.10(a) Orjinal çözelti; (b) Çözeltiyeye 20 ml FeSO ₄ .7H ₂ O + 20 ml H ₂ O ₂ ekleme	51
Şekil 2.11 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı	52
Şekil 2.12 Naylon filtre ve vakum pompası	52
Şekil 2.13 Tüp fırını (Proterm Furnaces PZF Series)	54
Şekil 2.14 Farklı fiziksel formlardaki adsorbent numuneleri	54
Şekil 2.15 SEM Cihazı (FEI/QUANTA FEG 250) (NABİLTEM, 2024)	56
Şekil 2.16 RAMAN Cihazı (Thermo – DXR Raman) (NABİLTEM, 2024)	57
Şekil 2.17 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı	58
Şekil 2.18 XRD Cihazı (PANalytical Empyrean XRD) (DAYTAM, 2024)	58
Şekil 2.19 20 mg/l metilen mavisi stok çözeltisi	60
Şekil 2.20 Shimadzu UV1800 UV Spektrofotometri Cihazı	60
Şekil 2.21 Santrifüj cihazı (NF400)	60

Şekil 2.22 Santifüj öncesi ve sonrası deney numuneleri	60
Şekil 3.1 %100 PES elyaf 10X büyütme (a), %100 R-PET elyaf 10X büyütme (b), lyocell elyaf 10X büyütme (c), viskon elyaf 10X büyütme (d), Çözümlü ipliği, haşlısız 4x büyütme (e), 10x büyütme (f); Çözümlü ipliği haşlılı 4x büyütme (g), 10x büyütme (h); Atkı ipliği 4x büyütme (i), 10x büyütme (j)	62
Şekil 3.2 Ham ve boyalı kumaş mikroskobik analiz (4X büyütme).....	63
Şekil 3.3 FTIR analizi (1) virgin polyester elyafı ve R-Pet elyafı; (2) r-pet elyafı ve atkı-çözgü iplikleri	64
Şekil 3.4 Mikroskobik analiz 4x büyütme (a birinci deşarj; b ikinci deşarj; c üçüncü deşarj).66	
Şekil 3.5 Mikroskobik analiz 4x büyütme (kompozit atık su numunesi).....	66
Şekil 3.6 FTIR analizi (kompozit atık su numunesi).....	67
Şekil 3.7 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları	69
Şekil 3.8 Adsorbsiyon deneyi numune görselleri.....	73
Şekil 3.9 SEM Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent, 500x büyütme; (b) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent, 2000x büyütme; (c) SFNK adsorbent, 500x büyütme; (d) SFNK adsorbent, 2000x büyütme.....	76
Şekil 3.10 RAMAN Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (b) SFNK adsorbent.....	77
Şekil 3.11 RAMAN Analizi (a) lyocell iplik telefı (orijinal); (b) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (c) SFNK adsorbent.....	79
Şekil 3.12 XRD Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (b) SFNK adsorbent	80
Şekil 3.13 BET Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbente ait adsorpsiyon/desorpsiyon grafiği; (b) SFNK ya ait adsorpsiyon/desorpsiyon grafiği.....	82
Şekil 3.14 IUPAC sınıflandırmasına göre adsorbsiyon ve desorbsiyon izotermıleri (Al Othman, 2012).....	83
Şekil 3.15 FTIR analizi (a: A1 malzemesi desorbsiyon çözeltisi; b: A1 malzemesi desorbsiyon çözeltisi)	86
Şekil 3.16 A1 adsorbenti mikroskobik analizi (a: HCl ile birinci desorbsiyon sonu; b: HCl ile ikinci desorbsiyon sonu; c: NaOH ile birinci desorbsiyon sonu; d: NaOH ile ikinci desorbsiyon sonu; e: distile su ile birinci desorbsiyon sonu; f: distile su ile birinci desorbsiyon sonu)	87
Şekil 3.17 A2 adsorbenti mikroskobik analizi (a: HCl ile birinci desorbsiyon sonu; b: HCl ile ikinci desorbsiyon sonu; c: NaOH ile birinci desorbsiyon sonu; d: NaOH ile ikinci desorbsiyon sonu; e: distile su ile birinci desorbsiyon sonu; f: distile su ile birinci desorbsiyon sonu)	88

SİMGELER DİZİNİ

>	Büyüktür sembolü
rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
G	Gramaj
Mesh	Granül bir malzemenin parçacık boyutu dağılımını belirlemede sıklıkla kullanılan parçacık büyüklüğünün bir ölçümü
Kg	Kilogram
<	Küçüktür sembolü
L	Litre
M	Metre
m ²	Metre kare
mg	miligram
ml	Mililitre
mm	Milimetre
nm	Nanometre
sn	Saniye
cm ³	Santimetre Küp
°C	Sıcaklık derecesi (Celsius)
%	Yüzde sembolü

KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Aktif Karbon
AB	Avrupa Birliği
ECHA	Avrupa Kimyasallar Ajansı
EC	Avrupa Komisyonu
AYM	Avrupa Yeşil Mutabakatı
NO ₂	Azot Dioksit
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
BET	Brunauer Emmett Teller Analizi
DKC	Demir Kaplı Cüruf
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DAYTAM	Erzurum Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
ETS	Emisyon Ticaret Sistemi
H ₃ PO ₄	Fosforik Asit
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
R-PET	Geri dönüştürülmüş polietilen teraftalat
GRS	Global Recycled Standard
rGO	Grafen Oksit
HOC	Hidrofobik Organik Bileşikler
HCl	Hidroklorik asit
ICP-MS	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi
CO ₂	Karbondioksit
CNT	Karbon Nano Tüp
KOİ	Kimyasal oksijen ihtiyacı
LF	Lyocell fiber
LS	Lyocell şerit
M-CNT	Manyetik Karbon Nano Tüp
MP	Mikroplastik
NP	Nanoplastik
KOH	Potasyumhidroksit
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilonitril

PET	Polietilen teraftalat
SKDM	Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması
SFNK	Spinal Ferrit Katkılı Nano Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
ZDHC	Tehlikeli Kimyasalların Sıfır Deşarjı (Zero Discharge of Hazardous)
NABİLTEM	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı
TGA	Termo Ggravimetrik Analiz
TE	Textile Exchange
VSM	Titreşimli Numune Manyetometresi
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
NOOA	Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
XRD	X Işınları Kırınımı Spektroskopisi

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim süresince bana aldığım dersler, bilgi ve birikimiyle büyük katkıda bulunan, tez aşamasında araştırma konumun belirlenmesi, planlanması, çalışmaların yürütülmesi ve değerlendirmesinde daima sabırla yanımda olan, bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Günay YILDIZ TÖRE ve Araş. Gör. Dr. Can Burak ÖZKAL’a şükranlarımı sunarım. Çalışmada kullanılan malzemelerin tedarikini ve çalışma kapsamında belirlenen testlerin yapılmasını sağlayan, katkılarını esirgemeyen firmam CAN TEKSTİL ENTEGRE TESİSLERİ VE TARIM ÜRÜNLERİ SAN. TİC. A.Ş.’ de Sn. Sedat ERDAL başta olmak üzere firma yetkililerime, verdikleri destek ve sağladıkları iş birliğinden dolayı Ar-Ge Merkezi ve laboratuvarlardaki değerli mesai arkadaşlarıma, Çevre Mühendisi Burak SARIGÜL’e teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans eğitimimde beni her zaman destekleyen, anlayışlı değerli eşim Ahmet Erdiñ ABACI’ya, biricik kızım Zeynep ABACI’ya ve bugün bu satırları yazmamda yegâne emeği olan canım ailem annem, babam ve kardeşime candan teşekkür ederim.

Gözde ABACI

Tekstil Mühendisi

1. GİRİŞ

Tekstil ve hazır giyim endüstrisi, temel ham madde olan liflerin elde edilmesi/üretilmesi ile başlayarak tekstil yüzeylerinin üretimi, renklendirilmesi, desenlendirilmesi ile tüketici kullanımına sunulan nihai ürünlerin (konfeksiyon ürünleri, döşemelik, halı, teknik tekstil ürünleri vb.) üretimine kadar olan tüm aşamaları ve buna bağlı teknolojileri kapsamaktadır.

Dünya nüfusundaki artış ve yaşam standartlarındaki gelişmeler sonucunda tekstil ürünleri tüketiminde son yıllarda önemli bir artış söz konusudur. Tekstil ürünlerinin temel ham maddesi olan lifler (elyaf) elde edildikleri kaynağa göre “doğal” ve “sentetik” lifler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Pamuk, keten, kenevir gibi bitkisel yenilenebilir kaynaklardan ve yün, ipek, tüy gibi hayvansal kaynaklardan elde edilen lifler doğal lifler olarak sınıflandırılırken polyester, poliamid gibi ana ham maddesi petrol türevi olan sentetik polimerlerden elde edilen lifler ise sentetik lifler olarak sınıflandırılmaktadır (Textile Exchange [TE], 2023).

Küresel elyaf üretimi, 2020'de pandemi nedeniyle bir düşüşün ardından 2021'de yeniden bir rekor kırarak 113 milyon tona yükselmiştir. Bu rakam ile küresel elyaf üretimi 2000 yılında 58 milyon ton olarak gerçekleşen üretim miktarına göre son 20 yılda küresel elyaf üretiminin neredeyse iki katına çıkmıştır. Aynı dönemde 2000 yılında kişi başına düşen lif tüketim miktarı 9,4 kg iken 2021 yılında %52,1 artış ile 14,3 kg olarak gerçekleşmiştir. Dünya nüfusundaki artış ve gelişme bu hızla devam ederse küresel elyaf üretiminin 2030'da yıllık elyaf tüketim miktarının 149 milyon tona, kişi başına düşen elyaf tüketim miktarının ise 17,5 kg'a çıkması beklenmektedir (TE, 2022). Dünya pazarına bakıldığında sentetik bir lif olan polyester ve doğal bir lif olan pamuğun baskın konumda olduğu görülmektedir. 2021 yılı itibariyle dünya lif üretiminin %64'ü sentetik lifler olup, bunun %84'ünü polyester lifleri oluşturmaktadır. Pamuk ikinci en önemli lif olup, tüm lifler içerisinde %22'lik bir orana sahiptir. Poliestere olan talep son yıllarda iki katına çıkmış ve uzun yıllardır en fazla kullanılan lif olma özelliği taşıyan pamuğun yerini almıştır. Geri dönüştürülmüş elyafların payı, 2020'de %8,4'ten 2021'de %8,9'a, özellikle şişe bazlı polyester elyaftaki artışa bağlı olarak hafif bir artış göstermiş, 2021'de küresel elyaf pazarının %1'den azı, tüketici öncesi ve sonrası geri dönüştürülmüş tekstillerden elde edilmiştir. Kişi başına düşen küresel elyaf üretimi, 1975'te kişi başına 8,4 kilogramdan 2021'de kişi başına 14,3 kilograma yükselmiştir. Güncel rakamlarla 2021 yılı incelendiğinde dünya genelinde üretilen elyaf çeşitleri, üretim miktarı ve oranları verilmiştir. Dünya yapay elyaf (suni ve sentetik) üretiminin yarıdan fazlasını gerçekleştiren Çin, aynı zamanda dünyanın en büyük pamuk üreticisi ve tüketicisidir. Pamuk üretiminde en önemli ülkeler sırasıyla Çin,

Hindistan, ABD, Brezilya, Pakistan, Avustralya ve Türkiye'dir. Elyaf üretimindeki artışın, dünya ve insanlar üzerinde önemli çevresel etkileri vardır. Kaynakların daha sorumlu kullanımına ve büyümeyi kaynak tüketiminden ayırmaya yönelik acil ihtiyaç konusundaki farkındalık artmasına rağmen değişim henüz gereken ölçekte ve hızda gerçekleşmemektedir (TE, 2022).

Elyaf yardımıyla elde edilen tekstil yüzeyleri boya, terbiye aşamasında su yardımıyla yeni fiziksel özellikler kazanmaktadır. Tekstil üretiminde yüksek miktarda su kullanılır ve özellikle sentetik elyafların kullanıldığı proseslerde mikroplastik formuna geçen elyaflar atık su ile yeniden ekosisteme karışmaktadır. Bu durum, tekstil sektörünün çevresel etkileri bakımından öncelikle kaynak kullanımı, atık oluşumu ve sera gazı emisyonları açısından ilk sıralarda yer almasına sebep olmaktadır. Ülkemiz denizlerinde mikroplastik incelenmesi çalışmaları sonuçları, uluslararası çalışmaların sonuçları ile kıyaslandığında; ülkemiz denizlerindeki mikroplastik miktarının daha az tespit edilmiş olmasına rağmen, sucul ekosistemdeki mikroplastiklerin en büyük kaynağının atık su arıtma tesisleri olduğu düşünülmektedir. Ulusal ve uluslararası mevzuat, arıtma yöntemleri açısından incelendiğinde mikroplastikler ile ilgili sınır değer ve arıtımı ile ilgili yasal bir gereklilik bulunmadığından arıtma tesisleri mikroplastik giderim amaçlı tasarlanmamış ancak birçok ileri arıtma yönteminin mikroplastik gideriminde etkili olduğu görülmektedir. (Tutoğlu, 2019).

Sanayi Devrimi ile üretim teknolojilerinin gelişmesi, sürdürülebilir doğal ham madde kaynakları yerine çok çeşitli ve istenen özelliklerde sentetik hammadde üretiminin sağlanması, ekonomik ve modern yaşam koşullarında tekstil, tarım ve gıda, otomotiv, elektronik, oyuncak, spor ve medikal ürünleri gibi birçok alanda kullanım avantajları sebebiyle küresel ölçekte plastik üretimi önemli bir pazara ulaşmıştır. Dünya genelinde yaklaşık 350 milyon ton olan plastik pazarının 64 milyon tonu Avrupa'ya aittir (Fontana, Mossotti, Montarsolo, 2020). 2050 yılında toplam üretimin 33 milyar tona ulaşması tahmin edilmektedir (Horton, Walton, Spurgeon, Lahive, Svendsen, 2017). Plastiklerin faydalı ömürlerinin çok uzun olmaması, kullanıldıktan sonra çöpe atılması, biyobozunur özellikte olmaması, suya, toprağa hatta havaya karışması ile başta insan ve deniz canlıları sağlığını, dolayısıyla ekosistemi tehdit ediyor olması son yıllarda konu hakkındaki detaylı bilimsel araştırmaların hızla artmasına sebep olmuştur.

Verilere göre, denizlerde 150 milyon tondan fazla plastik bulunmaktadır, bunların %80'inin karadan, %20'sinin balıkçılık ve su ürünleri faaliyetlerinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Durumun Türkiye'de de benzer olduğu kanıtlanmış, Mersin ve İskenderun

Körfezleri'nde yapılan bir araştırmada incelenen balıkların %58'inin sindirim sisteminde mikroplastiklere rastlanmıştır. Bunların %70'i iplik formunda, %20,8'i sert plastik, %2,7'si poliamid (naylon), %0,8'i kauçuk ve %5,5'i tanımlanamayan plastik olarak kayıtlara geçmiştir (Kanlı, Kurt, 2019). Ayrıca her yıl Avrupa Birliği sınırlarından 4 ile 5 milyon ton kuru mikroplastik madde içeren atıksu miktarının atıksularla çevreye salındığı belirtilmektedir (Horton vd., 2017).

Tekstil endüstrisinin su, atık su, katı atık, emisyonlar başta olmak üzere çevresel etkilerinin kısa, orta ve uzun vadede nasıl yönetilmesi gerektiğini anlayabilmek için sektörün en fazla ihracat yaptığı Avrupa olduğundan, Avrupa Birliği stratejileri dikkatle incelenmelidir.

Bilindiği üzere iklim değişikliği ile mücadele kapsamında, ülkemizin de 24 Mayıs 2004 yılında katıldığı Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), uluslararası alanda atılan ilk ve en önemli adımdır. Bu kapsamda, 2015 yılında Paris'te düzenlenen BMİDÇS 21. Taraflar Konferansı'nda Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Ülkemiz, Paris Anlaşması'nı, 22 Nisan 2016 tarihinde, New York'ta düzenlenen Yüksek Düzeyli İmza Töreni'nde 175 ülke temsilcisiyle birlikte imzalamış olup 6 Ekim 2021 tarihinde onayladığımız Anlaşma 10 Kasım 2021 tarihinde yürürlüğe girmiş ve bu süreçte ülkemizin 2053 karbon-nötr hedefi açıklanmıştır. Bu hedefe yönelik yol haritamızı da ortaya koyan güncellenmiş Ulusal Katkı Beyanımız, 15 Kasım 2022 tarihinde 27. Taraflar Konferansı'nda (COP27) sunulmuştur. Bu çerçevede, 2030 yılı itibarıyla "artıştan azaltım" senaryosuyla %41 oranında bir emisyon azaltım taahhüdü ortaya koyulmuş olup ülke olarak iklim değişikliğine yönelik hedef ve çabalarımızın düzeyi uluslararası iklim finansmanına erişimimizi etkileyeceğinden bu gelişmeler önem arz etmektedir. Avrupa Birliği (AB) tarafından 11 Aralık 2019 tarihinde açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) ile çalışmalar hız kazanmıştır. AB Yeşil Mutabakat ile 2050 yılında iklim-nötr ilk kıta olma hedefini ortaya koymuştur. Sanayiden, finansmana, enerjiden ulaştırmaya ve tarıma uzanan bir dizi alanda AB politikalarında kapsamlı değişiklikler öngören Yeşil Mutabakat, Tek Pazar'ın tesisinden bu yana AB'nin en büyük girişimidir. Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında AB'nin yükselen hedeflerine ulaşılması amacıyla, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Sürdürülebilir Ürün İnisiyatifi kapsamında yapılan düzenlemeler, Atık Sevkiyatı Tüzük taslağı, kimyasallara ilişkin mevzuatta süren gözden geçirme süreci gibi çalışmalar Türkiye'nin AB'ye ihracatını ve Gümrük Birliği kapsamında sağlanan entegrasyonu önemli ölçüde etkileyecek niteliğe sahiptir (Ticaret Bakanlığı, 2024).

AB'nin iklim, enerji, arazi kullanımı, ulaşım ve vergilendirme politikalarının ara hedef olarak 2030 yılına kadar %55 emisyon azaltımını sağlayacak şekilde revizyonu için “Fit for 55” teklif paketi Avrupa Komisyonunca 14 Temmuz 2021’de kabul edilmiştir. Söz konusu paket içerisinde, AYM ile ülkemiz ticareti bakımından öne çıkan hususlardan biri olan, Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) mevzuat taslağı da açıklanmıştır. AB, bu mekanizma ile yeşil dönüşümün yaratacağı maliyet karşısında Avrupa’nın rekabetçiliğinin korunması ve AB’deki üretimin emisyon azaltım hedefi AB’den az olan ülkelere kaymasının önlenmesini hedeflemektedir. Mevcut durumda, SKDM Tüzük Taslağına ilişkin AB Kurumları arasındaki üçlü müzakereler 12 Aralık 2022 tarihinde tamamlanmış olup ön uzlaşısı sağlanmıştır. Yapılan açıklamalara göre, raporlama yükümlülüğü getiren geçiş dönemi 1 Ekim 2023 tarihinde başlayacaktır. Demir çelik, alüminyum, elektrik, gübre, çimento ve hidrojen sektörlerinde ve açıklanacak alt ürün gruplarında başlayacak SKDM uygulamasının, 2030 yılına kadar Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kapsamındaki diğer sektörlerle teşmil edilmesine yönelik olarak Avrupa Komisyonu tarafından değerlendirme çalışmaları yapılması öngörülmektedir. SKDM kapsamında 2026 yılında mali yükümlülüklerin uygulanmaya başlanması öngörülmektedir. Diğer taraftan, AYM’nin akabinde açıklanmış olan Sanayi Stratejisi ve Döngüsel Ekonomi Eylem Planı kapsamında hazırlanmakta olan sektörel stratejiler doğrultusunda önümüzdeki dönemde AB’de diğer bazı kapsamlı mevzuat değişiklikleri de yapılacaktır. Söz konusu mevzuatlar ile AB piyasasına arz edilecek tüm ürünler için sürdürülebilirliğin bir norm haline getirilmesi öngörülmekte olup, Gümrük Birliği kapsamına giren ürün mevzuatları açısından ülkemizin malların serbest dolaşımına ilişkin haklarının korunması/elde edilmesi bu mevzuatlara uyumu gerekli kılmaktadır. Çalışmalar neticesinde ülkemizin Avrupa Yeşil Mutabakatı’na adaptasyonunu sağlayacak bir yol haritası tespit edilmiş ve bir eylem planı oluşturularak, Çalışma Grubu ve Yeşil Mutabakat Eylem Planına ilişkin 2021/15 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi 16 Temmuz 2021 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanmıştır. Eylem Planında, AB’nin politika öncelikleri doğrultusunda, sınırda karbon düzenlemeleri, yeşil ve döngüsel bir ekonomi, yeşil finansman, temiz, ekonomik ve güvenli enerji arzı, sürdürülebilir tarım, sürdürülebilir akıllı ulaşım, iklim değişikliği ile mücadele, diplomasi ve bilgilendirme ve bilinçlendirme faaliyetleri başlıkları altında belirlenen hedeflere ulaşılması amacıyla hayata geçirilecek 81 eylem yer verilmektedir (Ticaret Bakanlığı, 2024).

Sanayiden finansmana, enerjiden ulaştırmaya ve binalardan tarıma uzanan bir dizi alanda AB politikalarında kapsamlı değişiklikler öngören Yeşil Mutabakat, Tek Pazar’ın tesisinden bu yana AB’nin en büyük girişimlerinden birisidir. Bu kapsamda, AB’nin iklim,

enerji, arazi kullanımı, ulaşım ve vergilendirme politikalarının 2030 yılına kadar 1990'daki seviyesine kıyasla %55 emisyon azaltımı sağlanacak şekilde gözden geçirilmesi için “Fit for 55 (55’e Uyum)” mevzuat değişikliği paketi Avrupa Komisyonu’nca 14 Temmuz 2021’de yayımlanmıştır. Paketin uluslararası ticareti etkileyecek en önemli unsurlarından birisi, dünyada ilk kez uygulamaya konulacak olan Sınırdaki Karbon Düzenlemesidir (SKDM/CBAM). 1 Ekim 2023 itibarıyla yürürlüğe girmesi beklenen düzenlemeye ilk etapta demir-çelik, çimento, alüminyum, gübre, elektrik ve hidrojen ürünleri dahil olacaktır. Uygulama kapsamında, 1 Ocak 2026 tarihine kadar olan geçiş döneminde, AB’ye ithal edilen söz konusu ürünlerin üretimi aşamasında salınan karbon emisyonları ile üretim süreçlerinde kullanılan elektriğin üretiminden kaynaklı (dolaylı) emisyonların raporlaması yapılacaktır. 1 Ocak 2026 tarihinden itibaren başlayacak asıl uygulama döneminde ise ithal ürünlere gömülü emisyonlar için, AB’de yetkilendirilmiş ithalatçılar tarafından AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)’ndeki haftalık karbon fiyatları dikkate alınarak karbon ücreti ödenmeye başlanacak, çimento ve gübre sektörlerinde dolaylı emisyonlar da ücretlendirmeye tabi olacaktır. SKDM kapsamında AB ETS’inde Avrupalı üreticilere sağlanmakta olan ücretsiz tahsisatlar da mali yükümlülüğü azaltacak şekilde dikkate alınacak, bir yandan AB ETS’inde ücretsiz tahsisatlar 2026-2034 döneminde belirli bir indirim takvimi çerçevesinde kaldırılırken, aynı zamanda SKDM mali yükümlülükleri bu oranda artacaktır. Bu kapsamda, iş insanlarımız tarafından dikkate alınmasında fayda görülen Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamındaki temel strateji belgeleri aşağıda sıralanmaktadır (Ticaret Bakanlığı, 2024).

1. Avrupa Yeşil Mutabakatı
2. AB İklim Yasası
3. Avrupa Yeşil Mutabakatı Metni:
4. 55’e Uyum (Fit for 55) Paketi
5. Taslak SKDM mevzuat metni (resmi onay süreci devam etmektedir)

Yeşil Mutabakatın ana unsurlarından bir diğeri ise ilgili tüm ürün mevzuatına etki edecek olan döngüsel ekonomidir. 10 Mart 2020 tarihinde AB Yeni Sanayi Stratejisi, 11 Mart 2020 tarihinde ise Döngüsel Ekonomi Eylem Planı açıklanmıştır. Böylece AB, hammadde temini aşamasından ürünlerin üretimi, tüketimi ve atık yönetimine dair döngüsel bir yaklaşım ile yeni kurallar getirileceğini açıklamış, elektronik ve bilişim teknolojileri, piller ve araçlar,

ambalaj, plastikler, tekstil, yapı ve inşaat, gıda, su ve besinler öncelikli sektörler olarak belirlenmiştir. Gümrük Birliği kapsamında ülkemizce uyum sağlanan ürün mevzuatında önemli değişiklikler getirecek olan ve 30 Mart 2022 tarihinde açıklanan Sürdürülebilir Ürün İnisiyatifi ile gıda, yem ve medikal ürünler haricinde tüm ürün grupları için sürdürülebilirliğin bir norm olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede açıklanan Yeni Eko-Tasarım Tüzüğü Taslağı ile ürünlerin daha dayanıklı, tamir edilebilir, karbon emisyonu düşük, zararlı kimyasallardan arı, geri dönüştürülebilir olmasına yönelik AB düzeyinde ortak kurallar belirlenmesi, bu doğrultuda ürünlerin AB piyasasına arzı için karşılaması gereken standartların sürdürülebilirlik ekseninde şekillendirilmesi, ürüne ilişkin söz konusu bilgilerin tüketici, piyasa gözetimi otoriteleri, geri dönüşüm sektörüncel kolayca ulaşılabilir olmasını sağlamak üzere ürüne eşlik edecek “dijital ürün pasaportları” geliştirilmesi, zorunlu yeşil satın alma kriterleri getirilmesi amaçlanmıştır (Ticaret Bakanlığı, 2024).

Avrupa Komisyonu’nun 2019 yılında yayınladığı Yeşil Mutabakat, tüm ürünlerin ortak bir metodoloji ve ilkelere dayalı döngüsel tasarımını destekleyecek bir 'sürdürülebilir ürünler' politikasını içermekte ve malzemelerin geri dönüşümünden önce azaltılmasına ve yeniden kullanılmasına öncelik vermektedir. Döngüsel ekonomi eylem planı tüm sektörlerin geçişine rehberlik edecek olsa da eylem özellikle tekstil, inşaat, elektronik ve plastik gibi kaynak yoğun sektörlerle odaklanarak diğer konuların yanı sıra kasıtlı olarak eklenen mikro plastiklerle mücadeleye yönelik tedbirlere odaklanan 2018 plastik stratejisini takip edeceği belirtilmektedir (European Commission, 2019).

Bu tez çalışması, yukarıda açıklanan önemli strateji ve hedefler doğrultusunda tasarlanarak tekstil sektörünün yakın gelecekte ihtiyaç duyacağı araştırmalara rehber olması adına hazırlanmıştır. Çalışmada öncelikle geri dönüştürülmüş elyaftan üretilen sentetik dokuma kumaş üretimi boyama işlemlerinde atık sudaki proses kaynaklı mikroplastikler araştırılmıştır. Henüz atık su arıtma tesisine ulaşmayan endüstriyel proses atık sularındaki mikroplastik varlığı tespit edilmiştir. Mikroplastik giderimi ve atık su arıtılabilirlik çalışmaları için selülozik esaslı tekstil atıklarından adsorban malzeme elde edilmiş ve mikroplastik içeren proses atık sularının arıtılabilirlik çalışmaları laboratuvar ölçeğinde deneysel olarak incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Yüksek Öğrenim Kurulu Ulusal Tez Merkezi verileri “mikroplastik” konu başlığı altında incelendiğinde, mikroplastikler ile ilgili kayıtlı 63 çalışma 2017 ile 2023 yılları arasında hazırlanmıştır. Bu tezlerin 10 adedi doktora tezleri iken kalan 53 adedi yüksek lisans tezleridir. En yaygın çalışmaların yapıldığı Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda için 4’ü doktora olmak üzere 23 yüksek lisans tezi mevcuttur. Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda “mikroplastik” konu başlığı altında 6 adet doktora tezi ve 38 adet yüksek lisans tezi, Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda ise 2019 ve 2023 yılında yayınlanan sadece 2 adet tez erişime açıktır.

Mikroplastikler için Türk Dil Kurumu Sözlüğü’nde bir tanım bulunmamakla birlikte en genel anlamda plastik esaslı tüketim materyallerinin parçalanması sonucu oluşan küçük parçalardır (Kanlı vd., 2019). Atık formuna gelmiş plastikler parçacık büyüklüğüne göre 100 mm’den büyük olanlar “mega”, 20 mm’den büyük olanlar “makro”, 5 ile 20 mm arasındakiler “mezo” ve 5 mm’den küçük olanlar “mikro” olarak sınıflandırılmaktadır. Mikroplastikler (MP) için en geçerli tanım 5 mm’den küçük partiküllerdir, alt sınır ise spesifik olarak tanımlanmamıştır ancak 1µm’den küçük partiküllerin çevresel kaynaklardan alınan numunelerde tespit edilebilirken, çok az bir çalışma yöntem kısıtı sebebiyle küçük partikülleri 50 µm’den küçük olarak tanımlamaktadır (Horton vd., 2017). 1 ile 5 mm arası “büyük mikroplastikler”; 1 mm’den küçük olanlara “küçük mikroplastikler” ve 1 ile 100 nm arasındakilere “nanoplastikler” olarak tanımlanmıştır (Fontana vd., 2020).

Mikroplastik (MP) terimi genellikle boyutu 5 mm ile 1µm arasında olan plastik parçasını ifade eder, mikroplastik boyutu 1µm’den küçük ise nanoplastik (NP) olarak isimlendirilir. Boyutları çok küçük olan nanoplastiklerin incelenmesi ve geri kazanılması zor olduğundan araştırmacılar çalışmalarında mikroplastik parçalarından gelen kirlilik üzerine yoğunlaşmışlardır. “mikroplastik” terimi ilk kez 1968 yılında Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri Malzeme Laboratuvarı tarafından plastik bir malzemenin deformasyonunu tanımlamak için kullanılmıştır. 1972 yılında ise dünya su ekosistemindeki mikro boyutlu ilk plastik kirlilikte bahsedilmiştir. Mikroplastik terimi bugünkü tanımı ile ilk kez 2004 yılında Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOOA) tarafından raporlanmıştır. Birincil mikroplastikler, mikroskobik boyutta üretilen plastiklerdir ki bunlara örnek olarak kozmetik ürünleri (cilt temizleme peeling malzemeleri, diş macunları gibi) verilebilir. Ayrıca giysilerin yıkanması işlemi ile suya karışan mikro elyaflar da bu gruptadır. İkincil mikroplastikler ise

büyük ebattaki plastiklerin fiziksel, kimyasal, fotokatalitik ve biyolojik faktörlerle parçalanması sonucunda oluşmaktadır. Birincil mikroplastikler her türlü küresel, gelişigüzel ya da lifli şeklinde ve renkte iken ikincil mikroplastikler gelişigüzel bir forma sahiptir. Çizelge 1.1.'de mikroplastiklerin şekilsel kategorileri tanımlanmıştır. (Karaçam, 2022). Mikroplastikleri kategorize ederken renkleri esas alınabilir, ayrıca mikroplastığın rengi sahip olduğu kimyasal kontaminasyonu hakkında bilgi vermektedir. En yüksek kirletici seviye sarı ve siyah renkli mikroplastiklerde rastlanmıştır. Mikroplastiklerin yoğunlukları ise yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) 0,94-0,97 g/cm³, poliamid (nylon 6, PA) 1,12-1,14 g/cm³, poliamid (nylon 6,6 PA) 1,13-1,38 g/cm³, polietilen tereftalat (PET) 1,30-1,50 g/cm³ şeklindedir, mikroplastiklerin yoğunlukları göz önünde bulundurulduğunda deniz suyuna (deniz suyu yoğunluğu 1,025 g/cm³) karışıtlarında HDPE hariç tüm mikroplastikler batma eğilimindedir (Karaçam, 2022).

Çizelge 1.1 Şekillerine göre mikroplastikler (Karaçam, 2022)

Tür	Tanım
Pelet (granül)	Çapı 5 mm'den 1 µm'ye kadar olan küçük küresel plastik parçası
Fragment	En uzun boyutu 5 mm ile 1µm arasında olan düzensiz şekilli plastik parçası
Fibre (filament)	En uzun boyutu 5 mm ile 1µm arasında olan düzensiz şekilli plastik parçası
Film (sheet)	En uzun boyutu 5 mm ile 1µm arasında olan ince bir levha veya membran benzeri plastik parçası
Köpük (foam)	En uzun boyutu 5 mm ile 1µm arasında olan sünger, köpük veya köpük benzeri plastik malzeme parçası

Mikroplastikler, boyutsal tanımlamanın dışında “birincil” ve “ikincil” olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar. “Birincil mikroplastikler” mikrometre boyutunda üretilmiş krem ve peeling ajanları gibi kosmetik endüstrisindeki kişisel hijyen ürünleridir. “İkincil mikroplastikler” ise mezo ve makro boyutunda, plastiklerin uygun olmayan atık yönetimi uygulamaları neticesinde UV radyasyona, kimyasala, deniz dalgalarına maruz kalarak parçalanmasıyla meydana gelir. İkincil mikroplastikler için diğer önemli bir kaynak sentetik karışımli kumaşlardır. Giysinin bir kez yıkanması ile 1900 adet lif dökülebilir (Horton vd., 2017). Yaşam döngüsü süresince yıkamaya maruz kalan tekstil ürünleri kaynaklı tekstil mikro lifleri, birçok araştırmaya göre sucul ortamlar için yüksek mikroplastik kirliliğin en önemli sebebidir (Belzagui, Crespi, Álvarez, Gutiérrez-Bouzán, Vilaseca, 2019). Sentetik tekstil

kaynaklı kirlilik kaynaklarında polyester ve naylon polimerleri, kozmetik kaynaklı kirliliklerde de polietilen veya polipropilen yaygın olarak görülmektedir (Horton vd., 2017).

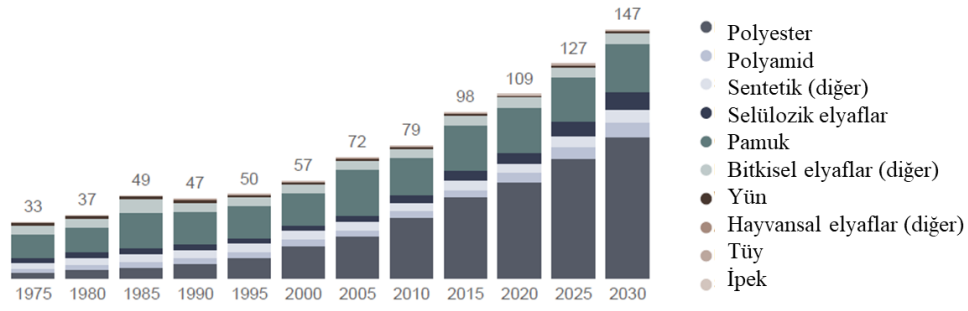
Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) güncel verilerine göre plastik ürünlerin kullanımından her yıl yaklaşık 42.000 ton mikroplastik çevreye karışmaktadır. Kirliliğin en büyük kaynağı suni çim sahalarda kullanılan ve 16.000 tona kadar salınan granüler dolgu malzemesidir. Buna ek olarak, kasıtsız olarak oluşan mikroplastiklerin (daha büyük plastik parçalarının aşınması ve yıpranması sonucu) Avrupa yüzey sularına yılda yaklaşık 176.000 ton mikroplastik karıştığı olduğu tahmin edilmektedir.

Avrupa Komisyonu'nun (EC) Plastik Stratejisi 16 Ocak 2018 tarihinde yayınlanmıştır. "Plastik atıkların ve çöplerin kontrol altına alınması" politikası kapsamında tekstil sektörünü de kapsayan "mikroplastik kirliliğini azaltmaya yönelik eylemler" yer almaktadır. Avrupa Komisyonu'nun (EC), döngüsel, sürdürülebilir ve dirençli tekstil endüstrisinin ortaya çıkışını desteklemek ve tüketicilere daha sürdürülebilir ürünler sunmak için genel bir çerçeve olarak Sürdürülebilir ve Döngüsel Tekstiller için AB Stratejisi geliştirme taahhüdü kapsamında sektördeki paydaşlar, tekstil ürünlerinin daha sürdürülebilir üretimi ve kullanımını sağlamak için politika ve düzenleyici çerçevelerin gözden geçirilmesi ve uyumlaştırılması çağrısında bulunarak hem AB'ye ithal edilen yeni ürünlerin küresel değer zincirlerinde hem de ihraç edilen kullanılmış tekstil ürünlerinin alt değer zincirlerinde adil çalışma koşullarının ve çevrenin korunmasının sağlanması ihtiyacı olumlu değerlendirilmektedir. Paydaşların stratejinin geliştirilmesinde önemli olduğunu vurguladığı politika araçlarından bazıları arasında yaklaşmakta olan Sürdürülebilir Ürünler Girişimi, AB Ticaret Politikası, Sürdürülebilirlik için Kimyasal Strateji, REACH yönetmeliği, Tüketici Gündemi yer almaktadır. Paydaşlar genel olarak tekstilde döngüsellüğün teşvik edilmesini destekliyor ve stratejinin, daha yüksek ürün kalitesini, dayanıklılığı, ürünlerin yeniden kullanımını ve onarımını teşvik eden girişimler yoluyla tekstil ürünlerini ekonomide mümkün olduğu kadar uzun süre tutmayı hedeflemesi gerektiğini ifade etmektedir. Ayrıca endüstrinin malzeme üretiminin azaltılması, atıkların önlenmesi, ayrı toplama, yeniden kullanım ve geri dönüşüm (örneğin uyumlaştırılmış bir EPR kapsamında), sürdürülebilirlik ve döngüsel standartları karşılaması gereken ürünler ve kimyasalların azaltılması yönünde çağrılar da vardı. Döngüselligi artırma çağrıları, sürdürülebilirliğin sosyal boyutuna (örneğin, Avrupa ve küresel değer zincirlerinde makul çalışma koşulları ve ücretler) verilen destekle birlikte değerlendirilmektedir. Sektördeki taraflar, mikroplastik salınımını azaltmak için ürün tasarımı zorunlu gereklilikler ve

kontrollü endüstriyel ön yıkama gibi önleme tedbirleri yoluyla tekstillerden elyaf dökülmesinin/salınmasının azaltılması çağrısında bulunmuştur. Ayrıca Ecodesign Direktifi gerekliliklerinin bir sonraki turu kapsamında, çamaşır makinelerinde ve kurutucularda olduğu gibi boru sonu çözümlerinin mikrofiber filtreler için zorunlu gereksinimler olması gerektiğini görüşülmüştür (EC, 2022).

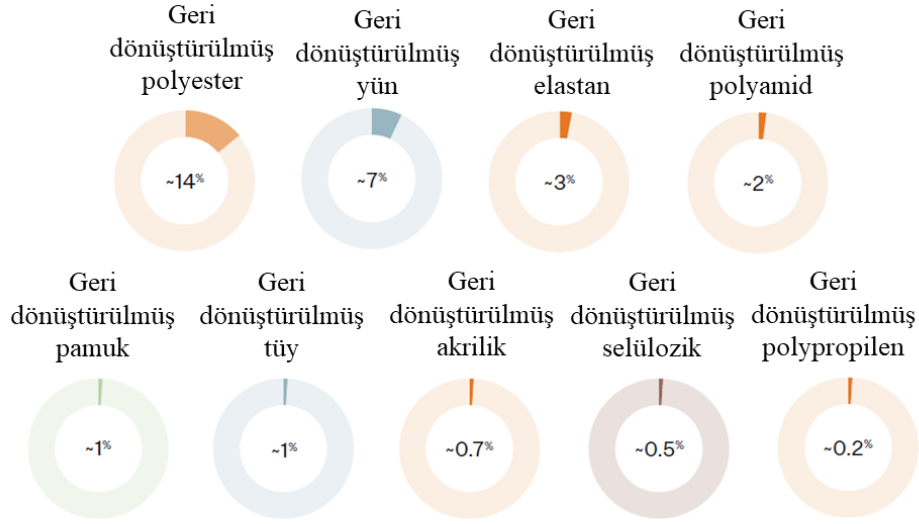
Çeviki, Kıdeyş, Tavşanoğlu, Kankılıç ve Gündoğdu (2022) araştırmasında her yıl dünya çapında muazzam miktarlarda plastik üretilmektedir. 2019 yılında dünya çapında plastik üretimi 368 milyon ton iken buna tekstil sektörünün de eklenmesi ile yaklaşık 420 milyon tona ulaşmaktadır. 2019'da 7,7 milyar olan insan nüfusunun 2040'ta 9,2 milyona artmasıyla, plastik üretiminin de 2050 yılına kadar 589,3 milyon ton olacağı ve daha da önemlisi üretimden sonra ise tüketim sonrası plastik atık miktarının da paralelde artması kaçınılmaz olacağı tahminlenmektedir. 2010'da 4,8-12,7 milyon ton plastik atığın kara kaynaklarından okyanuslara karıştığı tahmin edilirken su ortamlarındaki plastik kirliliği, mevcut üretim, tüketim ve atık yönetimi uygulamalarıyla olağan iş senaryosu kapsamında 2016'daki yıllık 19-23 milyon tondan 2030'a kadar neredeyse üç katına çıkarak atık formda birikmiş plastik hacminin küresel balık avcılığından daha yüksek olacağı öngörülmektedir (Çevik, Kıdeyş, Tavşanoğlu, Kankılıç, Gündoğdu, 2022).

Textile Exchange, tekstil endüstrisi mikroplastik varlığı probleminin büyüklüğü için küresel tekstil elyaf üretimi verileri raporuna göre 1975 yılında 33 milyon ton olan elyaf üretimi 2000 yılında 57 tona, 2020 yılında ise 109 tona çıkarak son 45 yılda üç katından fazla artmıştır. 2022 yılında toplam lif üretiminin %65'inin sentetik lifler ki bunun %54'ünün sadece polyester, %5'inin polyamid, ve kalan kısmının diğer sentetiklere ait olduğu bildirilmektedir. Toplam lif üretiminde bitkisel lifler %27'lik pay ile ikinci sırayı alırken pamuk lifi %22'lik pay ile ilk sırada yer almaktadır. Toplam lif üretiminde kalan dağılım %6,3 ile selülozik liflere, %1,6 ile hayvansal liflere ve %1'in altındaki oranlar tüy ve ipek liflerine aittir (TE, 2023).



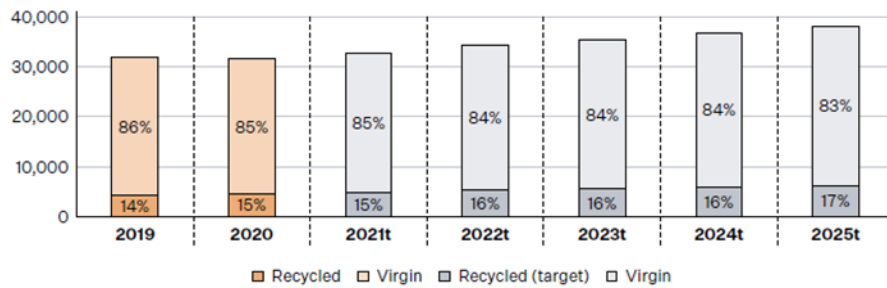
Şekil 1.1 Küresel elyaf üretimi (TE, 2022)

Tekstil ürünlerinde tekstilden geri dönüştürülmüş elyaf alımının artırılması, endüstrinin 2030 yılına kadar sera gazı emisyonlarını %45 oranında azaltmasına yardımcı olacak temel bir stratejidir ve bu sayede iklim değişikliğini azaltmak, biyolojik çeşitlilik kaybını önlemek ve toprak üzerindeki olumsuz etkileri durdurmak hafifletmek için büyük bir potansiyele sahiptir çünkü elyaf ve ham madde üretiminden kaynaklanan su ve enerji tüketimi azalmaktadır. Uzun yıllar devam eden büyümenin ardından geri dönüştürülmüş elyafların pazar payı 2021 yılında %8,5 iken 2022'de %7,9'a gerilemiştir. Üretilen tüm elyafların %7,3'ü plastik şişelerden elde edilen geri dönüştürülmüş polyesterdi ve genel olarak, 2022 yılında küresel elyaf pazarının sadece %1'den azı tüketici öncesi ve sonrası geri dönüştürülmüş tekstillerden oluşmuştur. İşlenmemiş (virgin) elyaf üretim hacmi, esas olarak işlenmemiş fosil bazlı elyafların 2021'de 63 milyon tondan 2022'de 67 milyon tona yükselmesinin etkisiyle 2021'de 102 milyon tondan 2022'de 107 milyon tona yükselmiştir. Polyester, 2022'de yaklaşık %14 ile en yüksek geri dönüştürülmüş elyaf oranına sahip olmuştur. Geri dönüştürülmüş polyesterin yaklaşık %99'u PET şişelerden geldi. Geri dönüştürülmüş elastanın toplam elastan üretiminin yaklaşık %3'ünü, geri dönüştürülmüş poliamidin yaklaşık %2'sini, geri dönüştürülmüş akriliğin yaklaşık %0,5'ini ve geri dönüştürülmüş polipropilenin yaklaşık %2'sini oluşturduğu tahmin edilmektedir. Yün elyafı ise 2022'de yaklaşık %7 ile ikinci en yüksek geri dönüştürülmüş elyaf payına olmuştur. Geri dönüştürülmüş pamuk ve geri dönüştürülmüş kuş tüyü pazar paylarının, toplam pamuk ve kuş tüyü üretim hacminin yaklaşık %1'i olduğu tahmin edilmektedir. 2022 yılında geri dönüştürülmüş selülozik elyaf pazar payı yalnızca %0,5'ini oluşturduysa da bu payın gelecek yıllarda artması beklenmektedir (TE, 2023).

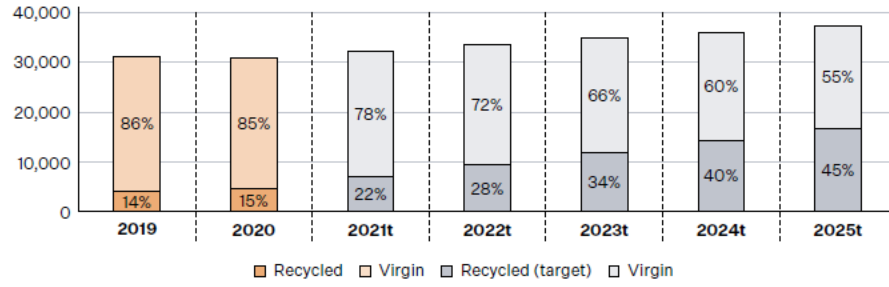


Şekil 1.2 Geri dönüştürülmüş elyafların oranı (TE, 2023)

İlk defa 2022 yılı Haziran ayında yayınlanan “2025 Recycled Polyester Challenge” raporunda petrol esaslı elyafların çevreye verdikleri zararlar bilinmesine rağmen, pazarı karşılayacak alternatif bir ürün olmadığı için polyester elyafı piyasaya sürülmeye devam etmektedir. Sektör için öncelikli hedefin ikincil bir petrol türevi elyaf yerine geri dönüştürülmüş (recycled) ve regeneratif yollarla üretilmiş elyaflar olacağı belirtilmektedir. Öncelikle geri dönüşüm için elde edilecek ham maddenin pet şişelerden tedarik edilmeyeceği, ikinci aşamada hazır giyim endüstrisinden-tüketicilerin atık haline gelmiş ürünlerinin geri dönüştürülerek ham madde stoklarını beslemesi gerektiği ve üçüncü aşamada yeni nesil biyosentetik malzemelerin kullanılmasıdır. 2019 yılında üretilen 58 milyon ton polyester elyafın 32 milyon tonu tüketilmiş ve sadece %14’ü geri dönüştürülmüştür. Bu oranın 2025 yılında %45’e, 2030 yılında ise %90’a ulaşması beklenmektedir. Bu hedef sayesinde şirketlerin karbon emisyonlarının da azaltılacaktır.



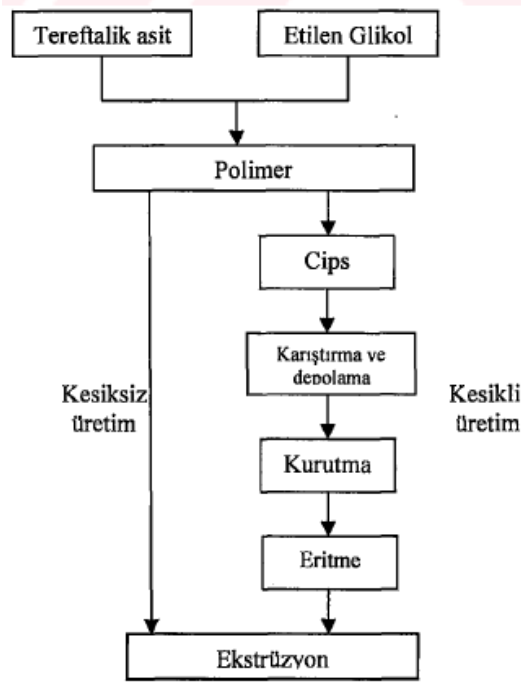
Şekil 1.3 Küresel Hazır Giyim Endüstrisi Polyester Elyafı Pazarı (gerçekleşen, bin ton ve %) (TE, 2023)



Şekil 1.4 Küresel hazır giyim endüstrisi polyester elyafı pazarı (hedef, bin ton ve %) (TE, 2023)

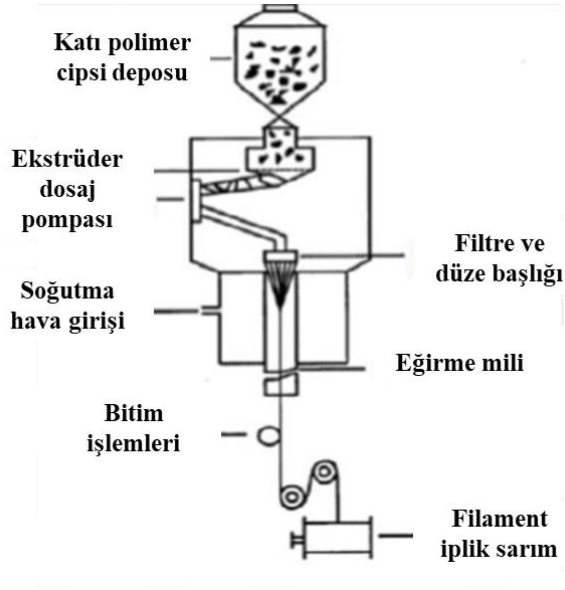
İlk ticari elyaf olan polyester, 1941'de İngiltere'de Calico Printers Birliği'nde çalışan Dickson ve Whinfield tarafından geliştirilmiştir. Etilen glikol (1,2-etandiol) ve tereftalik asidin (1,4-benzendikarboksilik asit) yoğunlaştırılmasıyla üretilmiştir. Bu ürünün üretim hakları ICI ve DuPont tarafından satın alınmıştır. Ancak İkinci Dünya Savaşı nedeniyle polyester elyafı 1948'e kadar pazarlanamamıştır. ICI firmasının ürününün ticari adı Terylene ve DuPont firmasının ürününün ticari adı Dacron'dur. Etilen glikol ve tereftalik asitten elde edilen polyestere polietilentereftalat (PET) denir. Başka bir deyişle, polietilen tereftalat termoplastik polyester ailesinin ana üyesi, bilim camiasında en çok tanınan, yaygın ticari ve endüstriyel uygulamalara sahip olan polyester lifidir (Çiftçi, 2023).

Polyester lifi organik bir asit ile bir alkolün polikondenzasyon reaksiyonu ile elde edilir. Bugün polyester lif ailesinde ilk elde edilen ve en fazla kullanılan lif polietilentereftalat (PET) lifidir. PET üretiminde en yaygın kullanılan yöntem eriyikten lif çekim yöntemidir. Bu yöntemin esasında; tereftalik asit ile etilen glikolün reaksiyonu sonucu ortaya çıkan granül (cips) halindeki polimerler erime noktası üzerindeki sıcaklığa ısıtılarak eritilip sıvı hale getirilir ve sonrasında filtrelenip bir dozaj pompası yardımıyla eşit basınç altında düzelerden püskürtülür. Düzelerden çıkan filament halindeki lifler hava ile soğutulur ve kullanım amacına göre bitim işlemlerine tabii tutularak filament iplik veya kesik (stapel) elyaf olarak üretimi tamamlanır (Altıntaş, 2022). Şekil 1.5'te ana hatlarıyla polyester eriyiğinin elde edilme aşamaları gösterilmiştir.



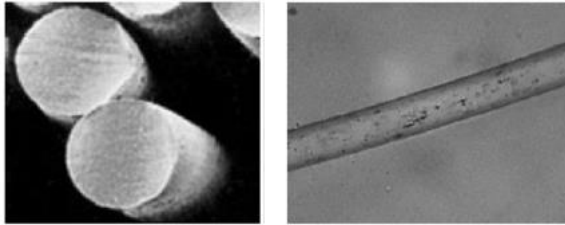
Şekil 1.5 Polyester eriyiğinin elde edilmesi (Demiryürek 2004)

Ekstrüder kullanılarak eriyikten lif çekme ünitesinin görünümü Şekil 1.4' te verilmiştir. Depodaki katı haldeki polyester cipsleri ekstrüdere beslenir. Ekstrüder içerisinde cipsler ısıtılarak eriyik hale getirilir ve belirli bir ön basınç ile dozaj pompasına iletilir. Dozaj pompasında polyester eriyiğine daha fazla basınç kazandırılır ve eriyik içindeki safsızlıklardan arındırılmak için filtreden geçirilir. Eriyik halindeki basınç kazandırılmış polyester eriyiği filament biçiminde akmasını sağlayan çok küçük deliklerin olduğu düze başlığından geçirilir. Düzeden çıkışta hava ile soğutularak filament halinde iplik formuna getirilir. Statik elektriklenmeyi engellemek, ipliğe düzgünlük vermek için bağlayıcı kimyasalları ve farklı bitim işlemleri uygulandıktan sonra çıkan filament iplik bobinlere sarılır (Altıntaş, 2022).



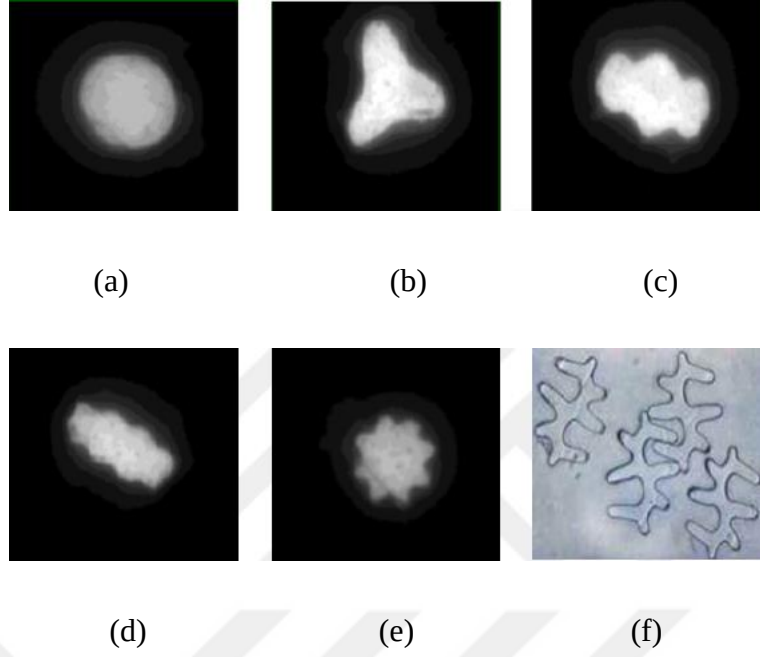
Şekil 1.6 Eriyikten lif çekme aşamaları (Altıntaş, 2022)

Üretilen polyester lifinin boyuna kesiti düz pürüzsüz ve çubuğa benzer bir yapı göstermektedir (Şekil 1.7). Lifin enine kesiti ise eriyikten lif çekimi sırasında kullanılan düze üzerinde yer alan deliklerin şekline göre yuvarlak (round), üçgen (trilobal), beşgen (pentagonal), sekizgen (octagonal), içi boş (hollow) ve delik sayısına göre monofilament, multifilament, şerit gibi farklı özellikler gösterebilmektedir (Altıntaş, 2022).



Şekil 1.7 Yuvarlak enine kesitli polyester lifinin (a) enine, (b) boyuna kesit görüntüsü (Altıntaş, 2022)

Lif kesitinin iplik üretimi ve üretilen ipliğin kalitesinin yanı sıra ipliğin ve bu iplikten üretilmiş ürünün gösterdiği fiziksel ve fonksiyonel özellikler üzerinde etkisi büyüktür. En fazla bilinen ve kullanılan düze deliği (tip) profili yuvarlak (round) olmasına rağmen günümüzde istenilen iplik ve kumaş özellikleri doğrultusunda birçok farklı lif kesit şekilleri ortaya çıkmıştır (Altıntaş, 2022).



Şekil 1.8 Farklı lif enine kesit yapıları (a) yuvarlak, (b) üçgen, (c) dörtgen, (d) altıgen, (e) sekizgen, (f) derin oluklu (Altıntaş, 2022)

Filament polyester iplik üretimi sırasında farklı lif enine kesit şekillerinin kullanılmasının ipliğin ve dolayısıyla bu iplikten üretilen kumaşın fiziksel, yapısal, fonksiyonel özelliklerini ve performansını etkilediği için tekstil sektöründe kullanımı hızla artmaktadır. Polyester iplikler; giyim, ev tekstili, perdeler, döşemelik kumaş, battaniye, özel dikiş iplikleri, kürk imitasyonları gibi çok çeşitli alanlarda kullanıldığı gibi teknik tekstil alanında koruyucu kumaşlar, tenteler, brandalar, filtre, keçe, yelken bezi üretimi gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Uysaltürk, 2013). Araştırmacılar lif enine kesit yapısındaki değişimin kumaş yapısal ve fonksiyonel özelliklerine etkileri üzerine birçok geniş kapsamlı çalışmalar yürütmüştür.

PET yüksek erime sıcaklığı (270°C) ve yarı kristalin polimer yapısının bir sonucu olarak iyi mekanik performans ile yüksek mukavemete sahiptir. Polar olmayan karakteri sebebiyle polyester liflerinin nem alımı %0,4 su (20°C , %65 rh) gibi nispeten düşüktür. Polyester lifler hidrofobiktir, bu nedenle sadece çok az miktarda su emerler ve ıslandıklarında çekme özelliklerinde önemli bir değişiklik olmaz. Polyester malzemeler çok düşük su emme özelliğinden dolayı çabuk kururlar. Çekme özellikleri sıcaklığa göre değişir; 180°C 'de lif, oda sıcaklığında sahip olduğu mukavemetin yaklaşık yarısını korur ve esnekliği artar. Orta mukavemetli iplikler, kaynar suda yaklaşık %6, aynı sıcaklıkta sıcak havada ise yalnızca %3 oranında çekerler; benzer farklılıklar daha yüksek sıcaklıklarda da gözlemlenir. Bununla

birlikte polyester lifler yüksek sıcaklıkta bozulduğunda kalıcı deformasyona uğramış olurlar. Polyester lifi 600 saat güneş ışığına maruz kalabilir ve elyaf mukavemeti hala orijinal mukavemetinin %60-70'i civarında korunur. Polyester diğer lif özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir (Çiftçi, 2023).

Çizelge 1.2 Polyester lifi özellikleri (Çiftçi, 2023)

	Yoğunluk (g/cm ³)	Mukavemet (cN/dtex)	Kopma Dayanımı (daN/mm ²)	Uzama (%)	Termal Bozulma (°C)
PET	1,36-1,41	3-9,5	35-130	8-55	283-306

Polyester lifinin kimyasal özellikleri incelendiğinde, oksitleyici ve indirgeyici maddelere karşı dirençleri mükemmeldir ve sonuç olarak sodyum klorit, sodyum hipoklorit veya hidrojen peroksit kullanan ağartma işlemleri uygulanabilir. Konsantre formik asit, asetik ve oksalik asitlerle 80°C'de 72 saat işlemden sonra sırasıyla %15, %6 ve %8'lik güç kayıpları oluşur ancak mineral asitlerin seyreltik çözeltilerine 100°C'de bile dirençlidir. Işığa karşı dayanımları oldukça iyidir. Ancak ultraviyole ışık karşısında zarar görebilirler. Uzun süreli ışığa maruz kaldıklarında dayanımları düşse de diğer liflerle kıyaslandığında başlangıç dayanımları yüksek olduğu için özellikle perde ve güneşlik yapımında kullanımı yaygındır. Polyester lifler, 100°C'ye kadar sıcaklıklarda seyreltik alkalilerle muamele edilebilir ve merserizasyonda kullanılan güçlü alkali koşullara dayanabilir. Bununla birlikte, kostik çözeltileri aslında polimere saldırır ve hidrolize eder, ancak kaynama noktasına kadar olan sıcaklıklarda bu tür saldırı lifin yüzeyi ile sınırlıdır; bu özel nitelik ipek benzeri polyester üretimlerinde kullanılmıştır. Polyester polimerler tipik ester reaksiyonlarını gösterirler ve seyreltik alkali veya asit varlığında veya tek başına su ile hidrolize edilebilirler. Banyo pH'ı 7'ye yakın tutulduğu sürece, 130°C'de bir ila iki saat boyunca boyanmış elyafta ciddi bir değişiklik olması beklenmez. Bununla birlikte, pH'ı 4'ün altında olan bir asidik banyoda veya bir alkalın banyosunda, daha hızlı saldırı meydana gelecektir. pH 8'in üzerinde, yüksek sıcaklıktaki boya banyoları, işlem uzun sürerse polyester liflerinin ciddi şekilde bozulmasına neden olabilmektedir (Çiftçi, 2023).

Polyesterin boyama prosesinden önce mamul kumaşlara bazı ön hazırlık işlemleri gerekir ki bu işlemler;

- Antistatik işlemler, yağ ve kirlerin uygun yıkama prosedürleri ile temizlenmesi,

- Dokuma kumaşlarda uygulanan haşılın sökülmesi,
- İç gerilim altındaki iplik ve kumaşlarda daha sonraki yıkama prosedürleri sırasında düşük boyutsal stabilitenin bir sonucu olarak, kontrolsüz gevşeme meydana gelebilir bu sebeple ısı işlem uygulanması gerekir.

Bu nedenle, boyama öncesi ön terbiye aşamaları, haşıl sökme, yıkama ve termal stabiliteyi içerir. Dispers boyaların polyestere difüzyonu, serbest hacim teorisi ile tanımlanır. Bu teoriye göre, dispers boyalar lif yüzeyinde adsorbe edilir ve yeterli termal enerji sağlandığında tekstil malzemesindeki polimer zincirlerinin segmental hareketinden kaynaklanan geçici geçişler yoluyla lifin içine yayılır. Sağlanan sürekli termal enerji ile elyaf ve boya banyosundaki boyarmadde dağılımı dengeye ulaştıktan sonra sistem sıcaklığı düşürüldüğünde, polimer zincirlerinin titreşimi ve kayması zayıflar ve son olarak elyaftaki boyalar elyafın içinde bloke olur. Basitleştirilmiş haliyle boyama işlemi aşamaları:

- Dispers boya ilavesi
- Dispers boyanın mobilizasyonu (çözünme ve süblimasyon)
- Elyaf yüzeyinde sorpsiyon
- Elyaf matrisine difüzyon
- Boyanmış malzemenin indirgen (redüktif) yıkanması.

Çoğu tekstil boyama prosesi boyarmaddenin sulu çözeltiden elyaf yüzeyine transferini içeren adsorpsiyon adı verilen süreçten oluşur. Sonrasında boya yavaş yavaş elyaf içerisine yayılabilir. Bu durum lifin iç yapısına bağlı olarak alt gözenekler veya lifin polimer molekülleri arasında meydana gelir. Boyarmaddenin life adsorpsiyon ve penetrasyonunun genel sürecine absorpsiyon denir. Absorpsiyon geri dönüşümlü bir süreçtir. Bu nedenle boya, desorpsiyon adı verilen bir işlem olan yıkama sırasında boyalı malzemeden sulu ortama geri dönebilir. Doğrudan absorpsiyonun yanı sıra, bir elyafın renklendirilmesi, elyafın içinde bir boyanın çökmesini veya elyaf ile kimyasal reaksiyonunu da içerebilir. Bu ikinci tür işlem yıkamaya karşı daha iyi haslık sağlamaktadır çünkü bunlar esasen geri döndürülemez işlemlerdir (Çiftçi, 2023).

Dispers boyama prosesini etkileyen başlıca faktörler sıcaklık, zaman, pH ve yardımcı maddelerdir. Polyester, diğer sentetik lifler gibi oldukça kristalli ve fazlaca hidrofobiktir. Dispers boyama için, polimerin camlaşma geçiş sıcaklığının (T_g) aşılması gerekmektedir. PET'in camlaşma geçiş sıcaklığı 70 °C'ye yakındır. Bu sıcaklık lifteki moleküler yapının

düzenine bağlıdır. İzotropik amorf PET, 68 °C'de camlaşma geçişi sergilerken, yüksek oranda kristalin lifler 100 °C'ye kadar camlaşma geçişi sergilemektedir (Çiftçi, 2023).

Tekstil endüstrisinde boyama işlemi kumaşa renk vermek için yapılır. Boyalı atıksuların karakterizasyonu, boyaların kimyasal yapısındaki farklılıklardan ve boyama prosesinin değişim göstermesinden dolayı oldukça zordur. Çizelge 1.3'te farklı elyafların konvensiyonel yöntemlere göre boyandığı boyahane atık sularının karakterizasyonuna ilişkin değerler verilmektedir. Tekstil boya ve terbiye işlemlerinde tek bir boyama işlemi için farklı kimyasal sınıftaki boyar maddelerin ve farklı kimyasalların birlikte kullanılabilir olması atık suyu bileşimini daha da karmaşık hale getirmektedir. Boyama prosesi çıkış sularındaki kimyasal yük, prosesin kimyasının yanı sıra boyama işleminin kesikli ya da sürekli olmasına bağlı olarak da farklılıklar göstermektedir (Şeker, 2007).

Çizelge 1.3 Tekstil boyama prosesi atık su karakterizasyonu (Şeker, 2007)

Elyaf cinsi	Boyar madde cinsi	pH	BOİ (mg/l)	TOK (mg/l)	AKM (mg/l)
Polyester	Dispers	10,2	198	360	76
Pamuk	Reaktif (çektirme)	11,2	-	150	32
	Reaktif (kontinü)	9,1	102	230	9
Viskon	Reaktif	6,6	15	140	26
Akrilik	Bazik	4,5	210	255	13
Polyamid	Asidik	5,1	240	315	14

PET'in bağıl nem oranı sadece %0,4'tür ve bu nedenle hidrofobik bir malzemedir. Camlaşma geçiş sıcaklığının üzerinde bile su penetrasyonu minimumdur. Bu nedenle PET, iyonik boyaların sulu çözeltilerinden etkilenmez. Ayrıca PET polimerinde yüklü fonksiyonel grupların olmaması ve önemli sayıda hidroksil veya amino gruplarının bulunmamasından dolayı, boyanması dispers boyalar ile gerçekleştirilir. Dispers boyalar sadece çok sınırlı miktarda suda çözünürlüğe sahiptir. 100 °C'de boyaların poliestere difüzyon hızı çok düşüktür ve boyama yavaştır. Bunun nedeni, polimerin amorf bölgelerindeki polimer zincirlerinin, boya moleküllerinin yayılabileceği kadar büyüklükte boşluklar oluşturmak için hala yeterli hareketliliğe sahip olmamasıdır. Ancak boyama sıcaklığının 100 °C'den 130 °C'ye çıkarılması boyama hızı üzerinde çok olumlu bir etkiye sahiptir. PET' in basınç altında boyanması (HT

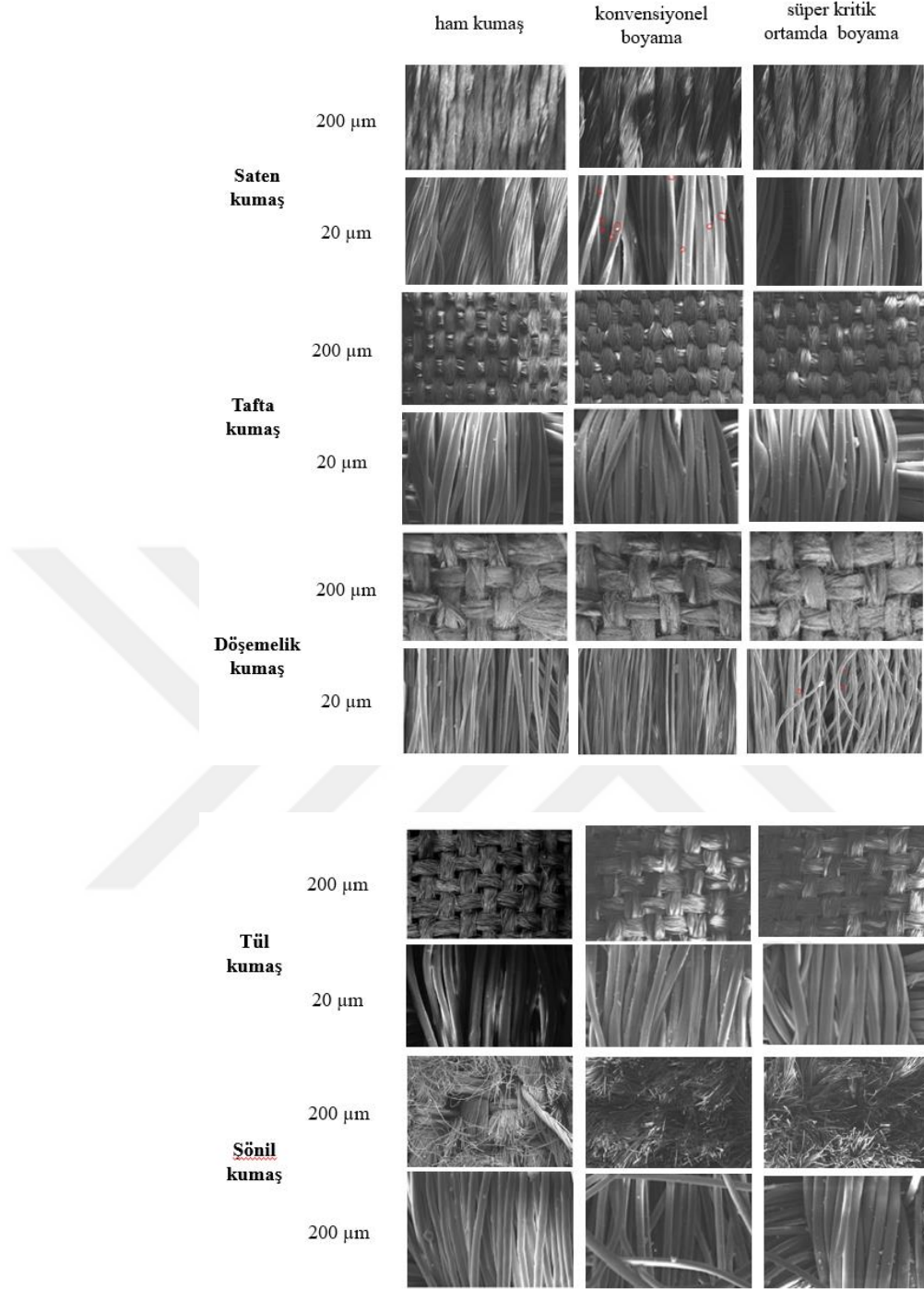
boyama) yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Yine de bu koşullar altında bile, kullanılan boyalar, liflere kabul edilebilir bir difüzyon hızı sağlamak için diğer boya türlerine kıyasla her zaman küçük moleküler boyutta olmak zorundadırlar. Bunun yanı sıra polyester liflerinin şişirilip boyarmaddenin life erişebilirliğini artırmak için carrier adı verilen ajanlar da kullanılmaktadır. Ancak günümüzde carrier kullanımı çevre dostu ve ekolojik bir uygulama olmaması gibi nedenlerle azalmaktadır (Çiftçi, 2023). Boya banyosunun pH'ı genellikle ya asetik asit tek başına ya da diğer asitlerle kombinasyon halinde kullanılarak 4,5-5,5 arasında ayarlanır. Asidik koşullar, yüksek sıcaklıkta alkaliye duyarlı kimyasal gruplara sahip bazı dispers boyaların indirgenmesini ve hidrolizini en aza indirebilir (Çiftçi, 2023).

Çiftçi (2023) çalışmasında %100 polyester döşemelik, şönil, saten, tül ve tafta kumaşların süperkritik ortamda boyanmasını incelemiş ve kumaş yapılarını ileri görüntüleme teknikleri ile araştırmıştır. Kumaşların süper kritik ortam ile konvensiyonel çektirme yöntemine göre test sonuçları incelenmiştir. Bu çalışmada polyesterin konvensiyonel yöntemle boyanmasında ortaya çıkan oligomer tayini yüzdesi de incelenmiştir. Her iki yöntemle boyanan kumaşlarda en fazla oligomer saten kumaşta tespit edilmiştir, Çizelge 1.4.'te verilmiştir.

Çizelge 1.4 Farklı sıcaklık ve basınçta boyanan kumaşların oligomer tayini (%) sonuçları (Çiftçi, 2023)

Kumaş Cinsi / Boyama Yöntemi	Saten	Tafta	Döşemelik	Tül	Şönil
Konvensiyonel	1,898	1,354	1,252	1,122	1,064
Susuz Boyama	0,943 250 bar, 100°C	0,903 280 bar, 130°C	1,235 250 bar, 100°C	0,337 240 bar, 130°C	0,609 280 bar, 120°C

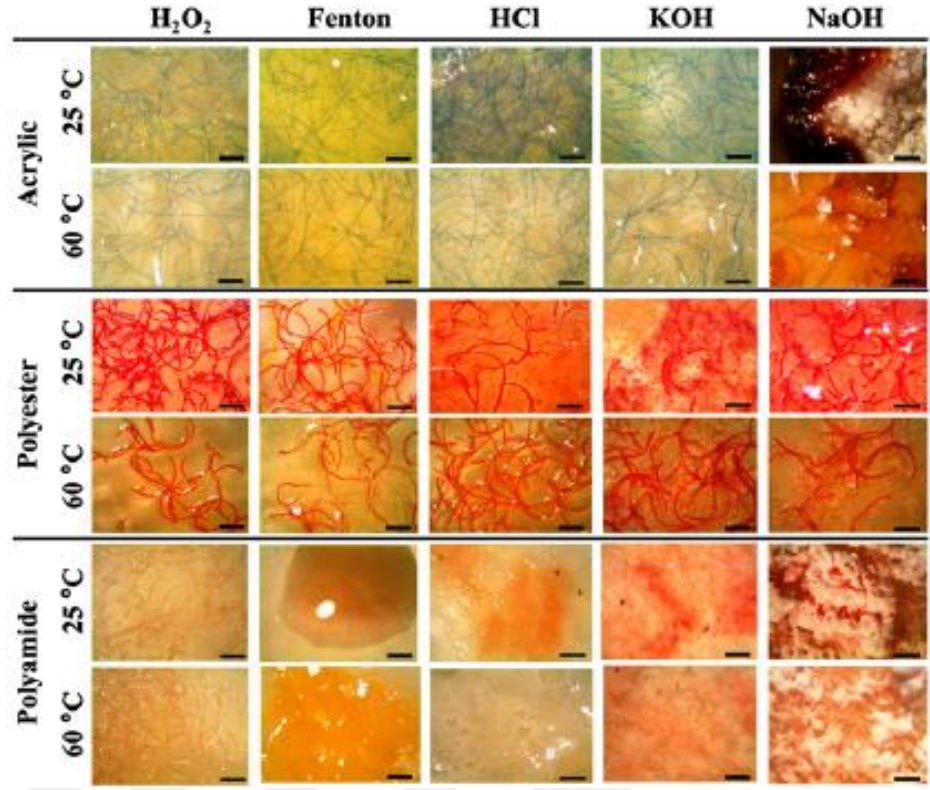
Kumaşların boyama sonrası elde edilen SEM görüntüleri ile Şekil 1.9.'da verilmiştir. Konvensiyonel boyama yönteminde kumaş yüzeyinin daha düzgünsüz bir yapı aldığı ancak polyester liflerinin hacimsel olarak büyüdüğü görülmektedir. Konvensiyonel boyama işlemi sonrasında lif üzerinde boyarmadde molekülleri de tespit edilmiştir (Çiftçi, 2023).



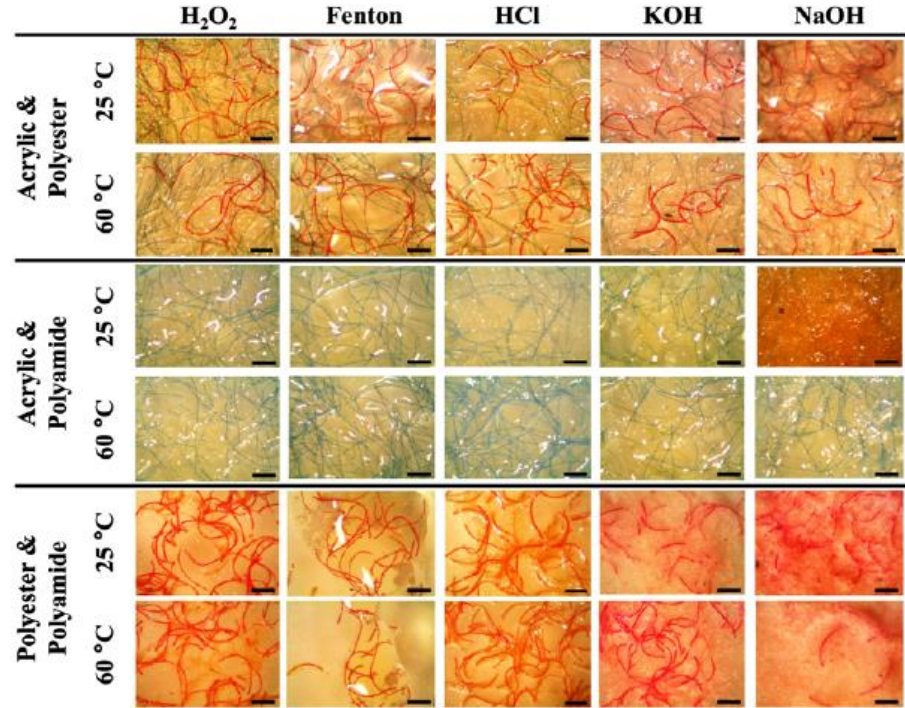
Şekil 1.9 Kumaş tipleri bazında ham kumaş, konvensiyonel yöntemle boyanmış kumaş ve süperkritik ortamda boyanmış kumaşlara ait SEM görüntüleri (Çiftçi, 2023)

Akyıldız (2023) çalışmasında, birinci adımda çeşitli sentetik liflerin (akrilik, polyester ve poliamid) değişken sıcaklıklarda ve sürelerde, uygun şartlar altında boyanması sağlanmış, ekstra mikrolifler ile zenginleştirilen boyama suyundan yapay bir atıksu elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, ilk aşamada seçilen en etkili ön işlemin ardından bu kez endüstriyel tekstil atık suyundaki mikroliflerin uzaklaştırılması ve analizi süreçleri

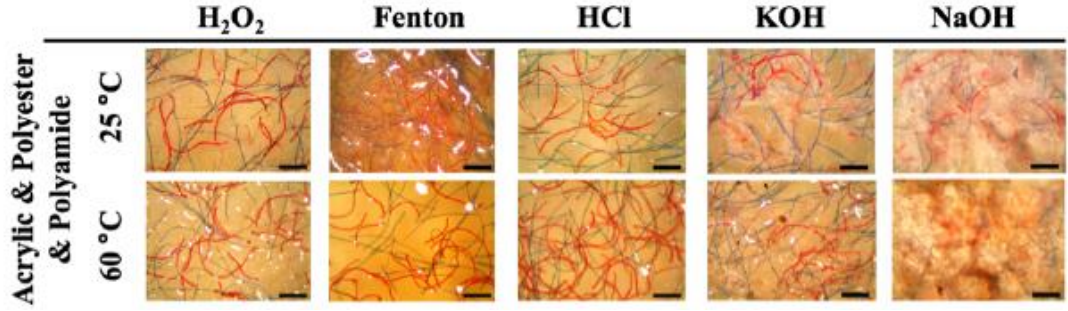
incelenmiştir. Çalışmanın son aşaması kullanım safhasına (tüketici davranışları) odaklanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle kumaşların yapısal özellikleri dikkate alınmış, kumaşların örgü yapısı, gramajı, kalınlığı ve hammaddesi gibi özelliklerin lif salınımı için ne denli etkili olabileceği irdelenmiştir. Çalışmada kumaş üreten bir tekstil firmasının fizikokimyasal yöntemle göre çalışan atık su arıtma tesis girişinden ve çıkışından 5'er litre numune alınmıştır. Akrilik ve polyester örme kumaş yapısı ile akrilik, polyamid, polypropilen, polyester ve geri dönüştürülmüş polyester dokuma kumaş numuneleri seçilmiştir. Deneylerin başlangıcı yapay olarak hazırlanan boyama sonu atık su çözeltilerine mikro elyaflar eklenmiştir. Organik içeriklerin uzaklaştırılmasında en etkili yöntemin tespiti için NaOH, H₂O₂, KOH ve Fenton reaktifi ile deneyler yapıp optimum deney koşulları araştırılmıştır. Ön işlem için 5 gün boyunca 25°C'de %15 H₂O₂ ile işlem görmesi en verimli yöntem olmuştur. Atık su arıtma tesisinden alınan atık su numuneleri yoğunluk ayırma yöntemine göre 6.000 devirde 20 dakika santrifüj yardımıyla ayrıştırılmıştır. Mikroliflerin analizi ise ışık mikroskobu ve mikro-FTIR yardımıyla analiz edilmiştir. Kumaşların yıkama kaynaklı mikroplastik salınımını laboratuvar ortamında EN ISO 105-C06:2010 test standardı koşullarına göre modellenmiştir. Mikroliflerin kalitatif analizi için filtre kağıtları Zeiss marka merceği olan Sony kamera ile hem gün ışığında hem de UV ışığında resimleri alınmıştır. MATLAB PCA analizörü yardımıyla veri setleri sonuçları incelenmiştir. Tek cins lif ile hazırlanan atık su çözeltileri mikroskopta incelendiğinde Şekil 1.10.'deki görüntüler elde edilmiştir. Resimlerin altındaki siyak yatay çubuk 0,5 mm ölçeğini göstermektedir. Elde edilen görüntüler incelendiğinde hem akrilik hem de polyester liflerinin alkali dayanımı düşük olduğu için elyaf parçalanmıştır. KOH, NaOH ile çalışılan numunelerde ise kırmızı polyester elyafı kaynaklı mikrolif tespiti oldukça zordur. Tüm lif tipleri açısından sıcaklıktan bağımsız olarak H₂O₂ ile ön işlem iyi bir görüntüleme analizi imkânı vermektedir. Şekil 1.12'de verildiği üzere üçlü kombinasyon içeren mikroliflerin tespiti ise H₂O₂ ve HCl yardımıyla daha kolay yapılabilir. Şekil 1.10'de polyester, akrilik ve polyamid karışımından oluşan çözeltinin mikroskop analizi görülmektedir.



Şekil 1.10 Tek cins mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023)

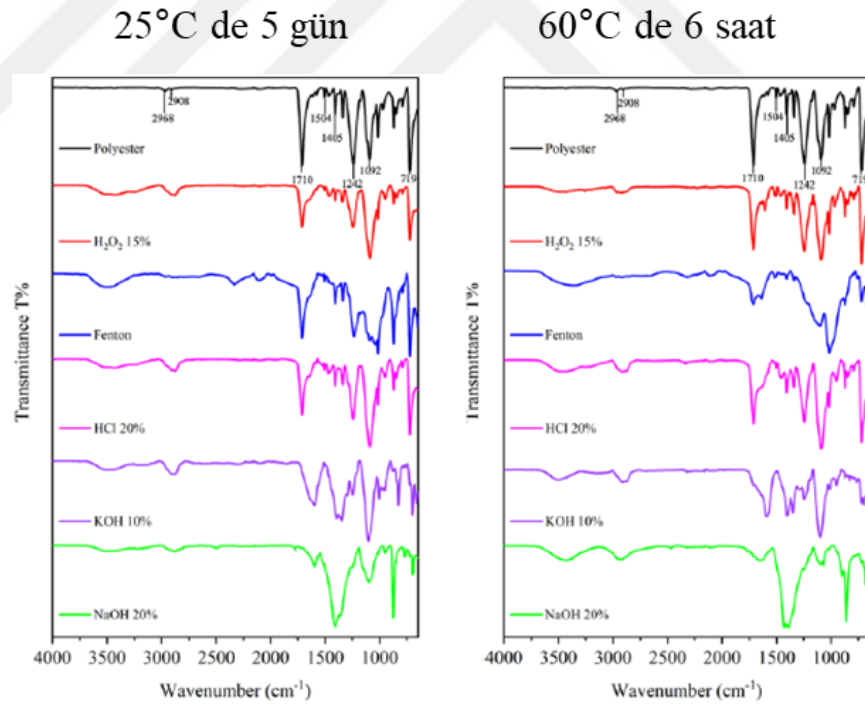


Şekil 1.11 İkili kombinasyon halindeki mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023)

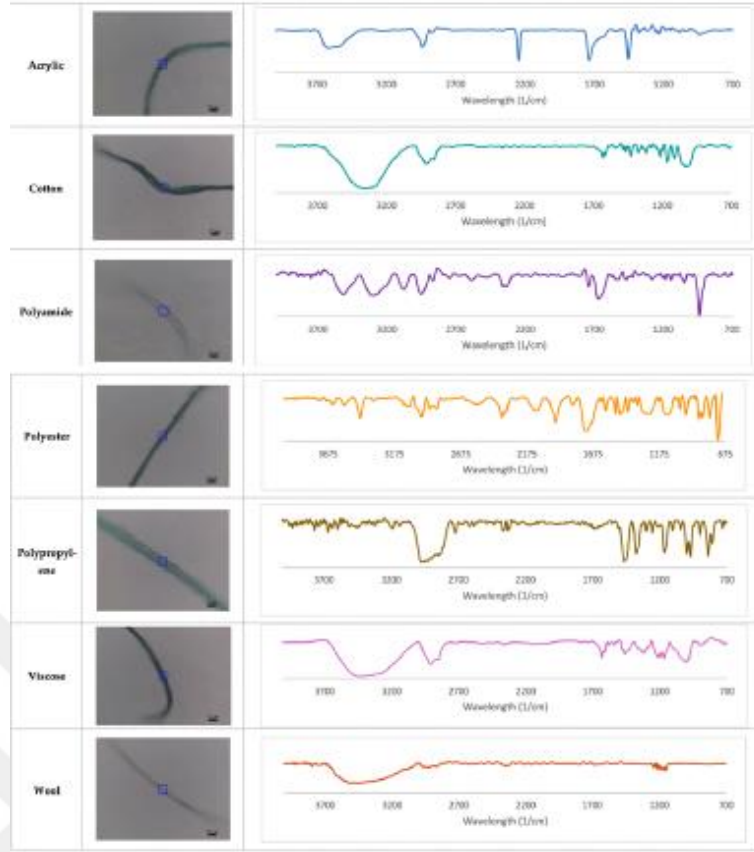


Şekil 1.12 Üçlü kombinasyon halindeki mikroliflerin mikroskop analizi (Akyıldız, 2023)

Bu çalışmada prosesten alınan atık su numunelerinin farklı ön işlem koşullarındaki polyester kaynaklı mikroplastiklerin FTIR analizleri de incelenmiş ve Şekil 1.13'te verilmiştir. Polyester elyafı zayıf asitlere, alkali ve organik çözücülere karşı dayanıklı olduğu için ön işlem elyafa zarar vermeden organik bileşenleri uzaklaştırarak mikroplastik tayinine izin vermektedir. Araştırmacı, farklı zamanlarda aldığı atık su numunelerinde farklı tipte elyafları tespit ettiği için her bir elyaf bazında micro FTIR analizlerini de yapmıştır, Şekil 1.14'te verilmektedir.

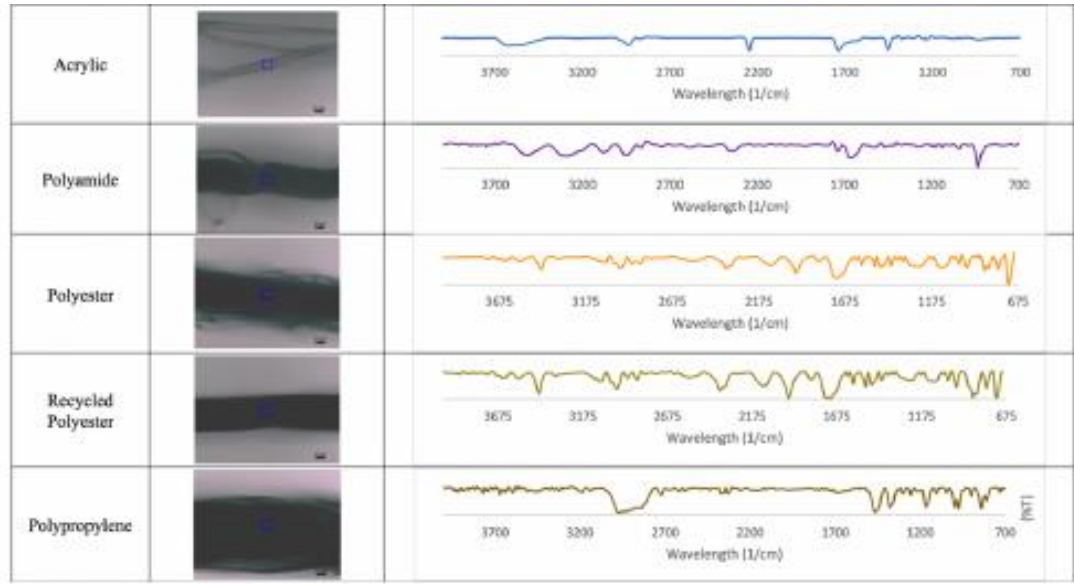


Şekil 1.13 Polyester esaslı mikroplastiklerin FTIR analizi (Akyıldız, 2023)

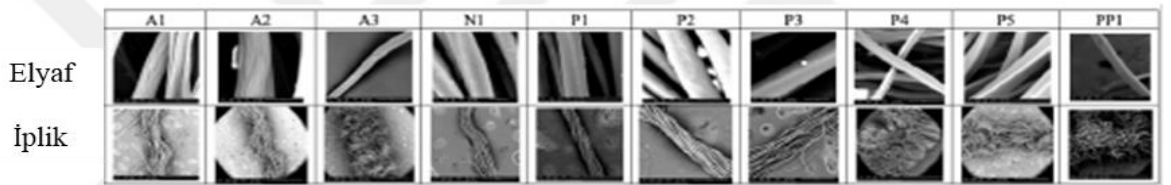


Şekil 1.14 Atık su numunelerinin micro-FTIR analizi (Akyıldız, 2023)

Aynı çalışmada, belirli periyotlarda alınan atık su numunelerindeki mikroplastik tayini için filtrasyon sonucu mikroskopta görsel sayma yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çalışmanın yapıldığı tekstil işletmesindeki atık su arıtım tesisi mikroplastik giderimi için yetersizdir ve mikroplastiklerin %62'den fazlası drenaja gitmektedir. Ön yıkama, yıkama ve durulama işlemleri kadar mikroplastik salınımına sebep olmaktadır. Örme kumaşlar, dokuma kumaşlara göre daha az mikroplastik salınımına sahiptir. Elyaf türü bazında en fazla salınım sırasıyla akrilik, polypropilen ve polyesterde tespit edilirken recycle polyesterden kaynaklanan mikroplastik salınımı virgin polyesterden kaynaklanan salınımına göre yüksektir.



Şekil 1.15 Elyafların micro-FTIR analizi (Akyıldız, 2023)



Şekil 1.16 Elyaf ve ipliklerin SEM analizi (Akyıldız, 2023)

Karadağ (2022) çalışmasında, %100 geri dönüştürülmüş polyester (R-PET) ve klasik yöntemlerle elde edilmiş (virgin) polyester (PET) atkı iplikleri kullanılarak farklı konstrüksiyonlarda üretilen dokuma kumaşların bazı performans özellikleri karşılaştırılmıştır. Çözüde %100 polyester, atkıda geri dönüşüm polyester ve virgin polyester iplik kullanılarak farklı konstrüksiyonlarda dokuma kumaşlar üretilmiştir. Numune kumaşlarda 100 denye, 36 filament, 450 tur/m bükümde tekstüre çözgü ipliği kullanılarak, çözgü sıklığı 60 tel/cm olarak sabit tutulmuştur. Atkı ipliği olarak 150 denye, 48 filament ve 450 tur/m bükümde tekstüre geri dönüştürülmüş polyester ve 150 denye, 48 filament ve 450 tur/m bükümde tekstüre virgin polyester olmak üzere iki farklı atkı ipliği kullanılmıştır. Kumaşlar 16 atkı/cm, 20 atkı/cm ve 24 atkı/cm atkı sıklıkları ile bezayağı, dimi (4/1) ve 5'li saten örgü yapılarında üretilmiştir. Virgin polyester atkı ipliği ile dokunan kumaşlarda, gramajın R-PET atkı ipliği ile dokunan kumaşlara göre daha yüksek olduğu ancak kumaş kalınlıklarında durumun tam tersi olduğu tespit edilmiştir. Virgin PET atkı iplikleriyle dokunan kumaşların çözgü yönündeki kopma mukavemetinin R-PET atkı iplikleriyle dokunan kumaşların çözgü yönündeki kopma mukavemetinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, virgin PET atkı iplikleriyle

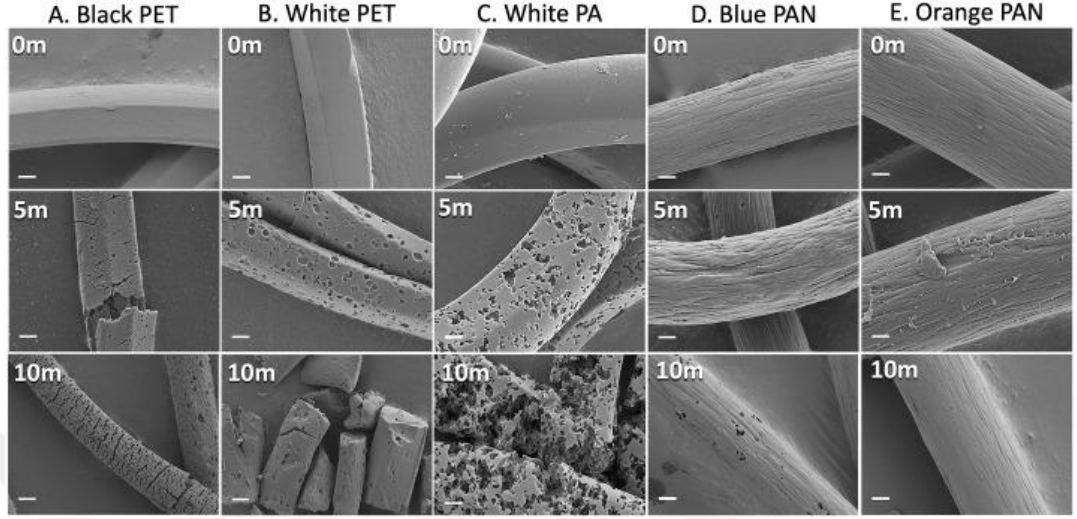
dokunan kumaşların atkı yönündeki kopma mukavemeti de R-PET atkı iplikleriyle dokunan kumaşların atkı yönündeki kopma mukavemetinden daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışmada yürütülen testler sadece dokuma ham kumaşa test edilmiştir, boyama sonu performans özellikleri bu sebeple çalışma kapsamında mevcut değildir.

Karaçam (2022) tez çalışmasında mikroplastik açısından daha kritik noktaları kapsayacak şekilde dere, deniz deşarjı ve derin deniz deşarjı noktalarından Marmara Denizi'nde yer alan toplam 46 istasyondan iki mevsim boyunca Eylül 2020 ve Aralık 2020 olmak üzere mikroplastik örneklemeleri yapılmıştır. FTIR analiz sonuçlarına göre su yüzeyinde tespit edilen mikroplastiklerin %43'ü polietilen, %22'si polipropilen, %12'si yüksek yoğunluklu polietilen, %10 polistiren, %4 natural latex rubber, %3 etilen propilen ve %2 kauçuk ve etilen vinil asetat tespit edilmiştir.

Çelik (2021) araştırmasında, evsel tip çamaşır makinesi ile pamuk, polyester karışumlu tekstil ürünlerinin (kazak, sweatshirt, tshirt gibi farklı ürünler) 5 yıkama döngüsü çalışılmıştır. Gravimetrik analiz sonuçlarına göre, yıkama başına ve yıkanan kilogram tekstil başına elyaf salınımı belirlenmiştir. Sonuçlara göre, pamuk tekstil materyali, polyestere göre daha fazla elyaf dökme eğilimi göstermektedir. Elyaf salınımı yıkanan tekstil materyalinin % karışımına bağlı olarak 13.1 mg/kg ile 15.6 mg/kg arasında değişmektedir. Toplam elyaf salınımı (T, mg elyaf/kg tekstil ürünü) filtrede kalan elyaf miktarının yıkama banyo hacmi (litre) ile çarpımının tekstil ürününün toplam ağırlığına bölünmesi ile hesaplanmıştır. En fazla elyaf salınımı 4. yıkamada gözlenmiştir. Tutulan elyafın büyük bir kısmının 100 µm filtre ile tutulması, fiberlerin çoğunun 100-200 µm aralığında olduğunu göstermektedir.

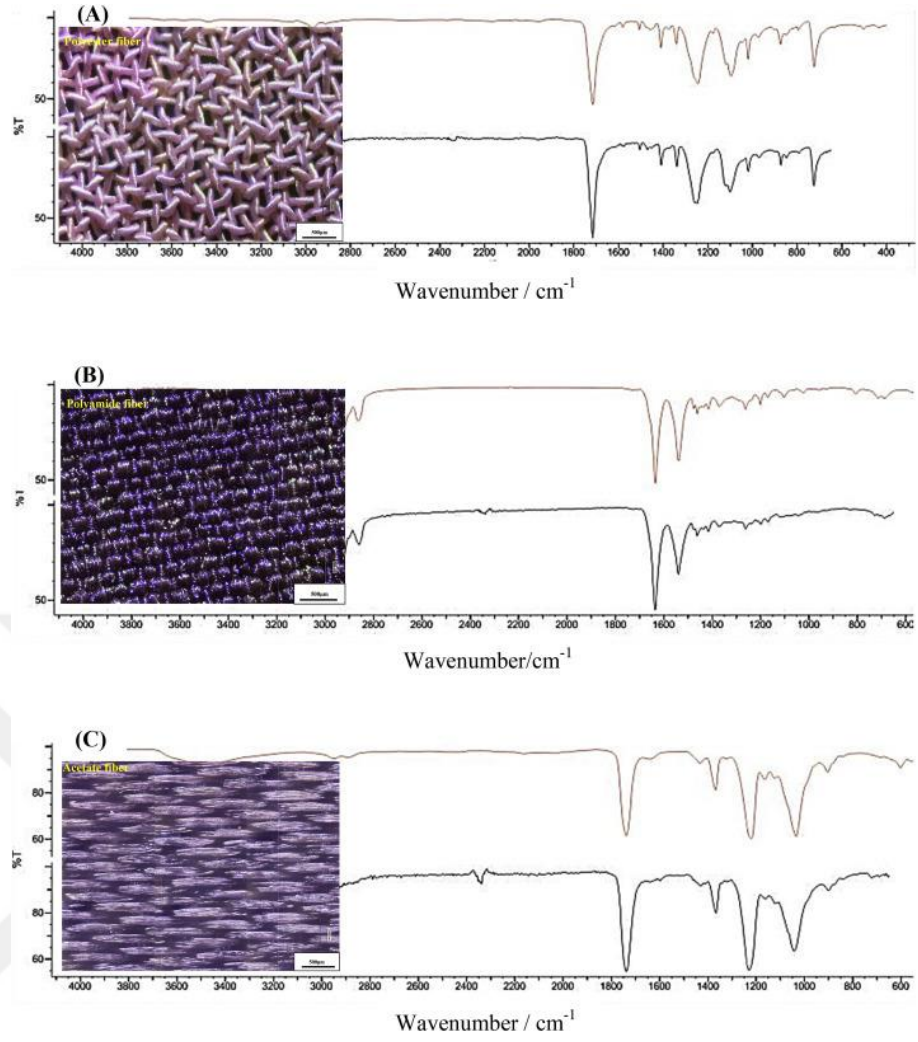
Sait, Sørensen, Kubowicz, Vike-Jonas, Gonzalez, Asimakopoulos ve Booth (2021) çalışmasında, yaygın MPF'lerin çevreyle ilgili fotodegradasyonunu araştırmıştır. Polyester (PET), poliamid (PA) ve poliakrilonitril (PAN) esaslı mikroplastik elyaf içeren süzüntüleri deniz suyu ve tatlı su ortamında 10 aydan fazla ultraviyole (UV) ışığa maruz bırakılmıştır. PET ve PA esaslı mikroplastik elyaf, UV'ye maruz kalmanın ardından önemli parçalanma ve yüzey değişiklikleri gösterirken PA, kimyasal değişikliklere dair kanıtlar göstermiştir. PAN aynı maruz kalma döneminde önemli bir fotodegradasyona uğramamıştır. PET ve PA için gözlenen bozulmanın daha hızlı olduğu ileri olması sentetik tekstillerde arzu edilen bir özelliktir. Çalışmanın en farklı yanı, sentetik elyaflara oranla yün liflerinde daha yüksek oranda bisphenol (BP) ve benzophenol (BzP) tespit edilmiştir. Şekil 1.18'de deniz suyunda UV'ye maruz kalmadan önce (0m) ve 5 aylık (5m) ve 10 aylık (10m) sonra yüzey morfolojisindeki

değişiklikleri gösteren SEM mikroagrafları görülmektedir, görüntüler 2000x büyütmede çekilmiştir. A siyah PET'tir, B beyaz PET'tir, C beyaz PA'dır, D mavi PAN'dır ve E turuncu PAN'dır. Ölçek çubukları 5 mm'yi temsil etmektedir.

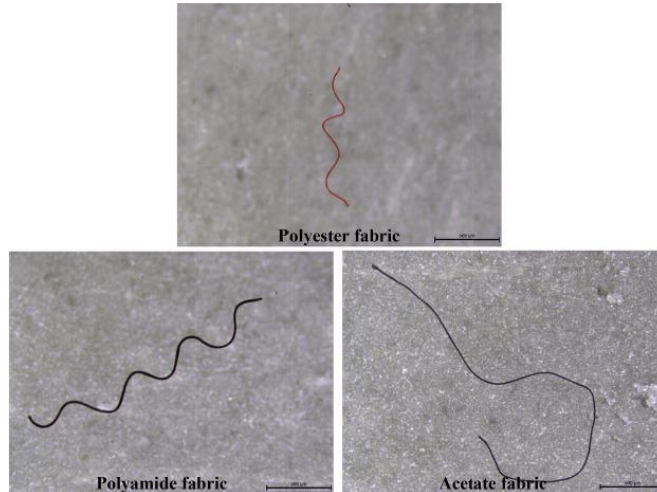


Şekil 1.17 Mikroplastik elyafların SEM görüntüleri (Sait vd., 2021)

Yang, Qiao, Lei, Li, Kang, Cui ve An (2019) araştırmasında tekstil endüstrisinde en çok kullanılan üç sentetik kumaştan (polyester, poliamid ve asetat esaslı) mikrofiber salınımı analiz etmişlerdir. Sonuçlar, merdaneli çamaşır makinesiyle yıkamada düz çamaşır makinesine kıyasla daha fazla mikrofiberin salındığını gösterdi. Mikrofiberler tüm malzemelerden dökülse de, yıkama başına 74.816 ± 10.656 mikrofiber/m²'ye kadar çıkan en fazla sayıda mikrofiber asetat esaslı kumaştan salınmıştır. Ayrıca, yıkama sıcaklığının artmasıyla birlikte sentetik kumaşlardan dökülen mikro liflerin sayısında da bir artış eğilimi olduğu ve kumaşların yalnızca su yerine deterjanla yıkanması durumunda daha fazla mikro lif salınımı tespit edilmiştir. Sıcaklık ve deterjan ayrıca, özellikle polyester kumaştan mikro elyaf salınımını artırarak 60°C'de yıkandığında, 30°C veya 40°C'ye göre önemli ölçüde daha fazla mikro elyaf suya karışmıştır. 30°C'de yıkamalar haricinde, deterjan eklendiğinde mikrofiberlerin sayısı sıra ile; asetat kumaş>poliamid kumaş>polyester kumaş. En fazla sayıda mikrofiber, 60°C'de yıkandıktan sonra 74.816 ± 10.656 ürün/m² salınan asetat kumaştan dökülmüştür. Şekil 1.18 kumaşlara ait FTIR analizini ve Şekil 1.19 evsel yıkamaların filtrasyonundan elde edilen mikroskop görüntülerini göstermektedir.



Şekil 1.18 Polyester (A), Polyamid (B), Asetat (C) kumaşlara ait FTIR analizi (Yang vd., 2019)



Şekil 1.19 Polyester, Polyamid, Asetat evsel yıkamaların filtrasyonundan elde edilen mikroskop görüntüleri (Yang vd., 2019)

Çalışmada evsel yıkamalar için kullanılan filtre torbaları tarafından etkili bir şekilde tutulamayan daha kısa mikro elyaflar, kanalizasyon sistemleri yoluyla su ortamlarına karışmaktadır. Pekin'deki tipik bir kanalizasyon arıtma tesisinin atık sularında tespit edilen 9,40-11,33 adet/litre mikrofiber ile karşılaştırıldığında, yıkama atık suyundaki mikrofiber konsantrasyonlarının polyester elyaf için yaklaşık 20 kat, asetat kumaşlar için 150 kat, poliamid kumaşlar için ise 200 kata yakın fazla olduğu tahmin edilmektedir. Tekstil kaynaklı mikroplastiklerin çevredeki oranının, artan küresel üretim ve sentetik elyaf kullanımının artması nedeniyle %20 ila %34,8 arasında değiştiği tahmin edilmektedir ki bu da çamaşır yıkamadan elde edilen mikro elyafların çevremizde en sık karşılaşılan mikroplastik kaynağı olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, toplam elyaf üretiminin %60'ını oluşturan sentetik elyaf üretimiyle örtüşmektedir. 2012 yılında yayınlanan Sentetik Elyaf Küresel Ticaret Analizi Raporu'na göre, polyester elyaf, poliamid kumaş (Naylon) ve asetat kumaşın (akrilik elyaf) küresel üretim kapasiteleri sıra ile 53, 5,5 ve 2,3 milyon tondur. Bu nedenle, merdaneli çamaşır makinesi kullanılarak bir kez yıkandıktan sonra polyester kumaşlardan yaklaşık 36,04-636 ton, poliamid kumaştan 434,5-660 ton ve asetat kumaştan 133,4-232,3 ton mikrofiberin salındığı tahmin edilmektedir. Pulsatörlü çamaşır makinesinde yıkama sonucu polyester kumaştan 40,81-1060 ton mikrofiber, poliamid kumaştan 489,5-929,5 ton mikrofiber ve asetat kumaştan 174,8-418,6 ton mikrofiber bir kez yıkandıktan sonra açığa çıkabilmektedir. Sonuç olarak bu mikrofiberler, su ortamında, tortularda, atık sularda ve hatta organizma dokularında tespit edilen mikroplastiklerin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Elbette sentetik kumaşlar sadece kıyafetlerde değil, mobilya, jeotekstil, kumaş, spor malzemeleri, sırt çantaları, pelüş oyuncaklar, binalar ve tarımsal uygulamalarda da kullanılmaktadır. Bununla birlikte, artan yıkama döngüsü sayısı ile birlikte polyester kumaş ve asetat kumaş için lif kaybında istikrarlı bir azalma bulunmuştur, bu da çeşitli tekstillerden mikrofiber salınımının aynı zamanda yıkama süresi sayısı ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Sentetik elyafların kalıcı doğası nedeniyle, salınan mikro elyaf sayısının fazla tahmin edilip edilmediğine bakılmaksızın, tekstillerin evde yıkanmasından kaynaklanan girdilerin azaltılmasına daha fazla dikkat edilmelidir. Bir alternatif, kumaş tasarımında sentetik-doğal kombinasyonunun kullanılmasıdır. Örneğin, polyester-pamuk karışımı, akrilikten yaklaşık %80 daha az mikro elyaf açığa çıkarmıştır (Yang vd., 2019).

Dünya çapında plastik kirliliği hem çevreyi hem de insan sağlığını tehdit eder hale geldiği için doğaya, akabinde besin zincirine farklı yollarla gelen mikroplastikler (MP) için literatürde giderim yöntemleri araştırıldığında verimli ve çevre dostu giderim tekniklerine ihtiyaç

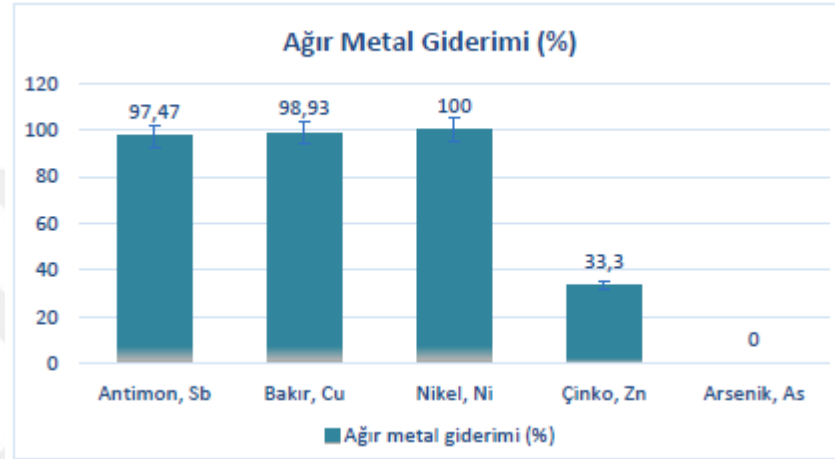
duyulmaktadır. Günümüzde boya atıksu arıtma yöntemleri olarak kimyasal oksidasyon, kuagülasyon, biyolojik arıtma, fotodegradasyon, membran filtreleme ve adsorpsiyon sayılabilir. Bu yöntemler arasında adsorpsiyonun verimlilik açısından yüksek, düşük maliyetli ve kolay işletilebilir olduğu düşünülmektedir (Jiang, Liang, He ve Wang 2015).

Adsorpsiyon, katı bir adsorbanın çözeltideki bir bileşeni fiziksel veya kimyasal bir etkileşim yoluyla yüzeyine çektiği ve böylece bileşeni sıvı fazdan uzaklaştırdığı bir prosestir. Bir fazda bulunan iyon ya da moleküllerin, bir diğer fazın yüzeyinde yoğunlaşması ve birikmesi işlemi adsorpsiyon olarak tanımlanır. Birikim gösteren maddeye adsorbat, adsorplayan maddeye adsorbent denilmektedir. Adsorpsiyon; sıvı-sıvı, sıvı-gaz, sıvı-katı ya da gaz- katı gibi iki faz arasında oluşur. Bu iki fazı ayıran yüzeyler “ara yüzey” olarak isimlendirilir. Çevre bilim dalı, genellikle bir sıvı ile bir katı arasındaki arakesit tipi ile ilgilenirler. Katı-sıvı adsorpsiyonu içme suyu ve atık su arıtımında önemli rol oynar. Adsorpsiyon; değişim adsorpsiyonu, biyolojik, fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon olarak dörde ayrılır. Fiziksel adsorpsiyonun en güzel örneklerinden birisi aktif karbon adsorpsiyonudur. Adsorpsiyona etki eden faktörlerin başlıcaları; karıştırma hızı, adsorbentin özellikleri, adsorbatın çözülebilirliği, adsorbent moleküllerin boyutu, pH ve sıcaklıktır (Şeker, 2007).

Atık su arıtma tesis tasarımı ve maliyet açısından değerlendirildiğinde, adsorban bir malzeme uygun maliyetli, çevre dostu ve işleme adımları ve atık su arıtma mekanizmalarında basit olmalıdır. Bu, çevresel iyileştirme uygulamaları için daha az işleme gereksinimi olan atık biyokütleler, tarımsal atıklar ve bitki kalıntıları gibi uygun maliyetli adsorban materyallerin bulunmasına çaba gösterilen araştırmalar artmaktadır. İlave olarak, gerekli diğer özellikler arasında adsorbatlara karşı yüksek kapasite ve afinite, seçicilik, hızlı kinetik ve akışlı sistemlerde uygulanabilirlik yer almaktadır. Bu özellikler, bir adsorbanın ticari araştırmaya uygunluğuyla doğrudan ilişkilidir ve tekstil endüstrisinde kullanılan adsorban lifler, özellikle hızlı kinetikleri ve akışlı sistemlerdeki yüksek performansları nedeniyle bu kriterleri karşılamaktadır (Bediako, Wei ve Yun 2016).

Kurt (2021) çalışmasında sera örtü altı tarım üretimi sonunda kalan domates gövdesi atıkları aktif karbon üretiminde ham madde olarak tercih edilmiştir. Elde edilen aktif karbonun fiziksel ve kimyasal değişimlerini belirlemek için morfolojik ve karakteristik özellikleri incelenmiştir. Ham maddenin element kompozisyonu ve karakterizasyonu elementel analiz ile, bozunma sıcaklığının tespiti Termogravimetrik Analiz (TGA) ile belirlendi. Üretilen aktif karbonların termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile, spektrofotometrik

karakterizasyonları Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FT-IR) analizleri ile, kristal yapısı X-Işını Difraksiyon (XRD) analizi ile, morfolojik özellikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile, yüzey ve gözenek karakterizasyonu Brunauer Emmett Teller (BET) analizi ile incelenmiştir. Ek olarak üretilen aktif karbonun tekstil endüstrisi temiz üretim uygulamaları kapsamında polyester kaynaklı tekstil atık suyundaki bazı ağır metalleri adsorplama derecesi, İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi (ICP-MS) ile incelenmiştir.



Şekil 1.20 Poliester kaynaklı tekstil atık suyunda tespit edilen ağır metallerin tezde üretilen aktif karbon ile hazırlanan N4 numunesindeki ağır metal giderimi (Kurt, 2021)

Deneyde kullanılan tekstil atık suyundan antimon ağır metal miktarının genel olarak azaldığı, 3 g adsorban ile 16 ve 24 saat deney sonrası elde edilen N1 ve N2 numuneleri arasında az bir fark olduğu görülmektedir. Buradaki fark N3 ve N4 numunelerinde bariz bir şekilde açılmakta ve antimon gideriminin artmasıyla N3: 0.015 mg/l ve N4: 0,012 mg/l tespit edilmiştir. Tekstil terbiye işlemlerinde özellikle poliester esaslı elyaf, iplik, kumaş boyamacılığında antimon salınımının önemli bir çevresel problem olduğu bilinmektedir ve atık sulardan %100 giderimi oldukça zordur (Ungureanu vd., 2015). Poliester kaynaklı bu çevresel problemde, yapılan çalışma sonucu olumlu etkisi görülmüş ve ZDHC limit hedefine ulaşılmıştır.

Aktif karbon ve özellikle karbon en eski ve en yaygın olan adsorbentlerden biridir. Gerçekten arıtım amaçları için karbonların ilk kullanımı eski mısır medeniyetine kadar uzanmaktadır. Bununla beraber 18. y.y. fizikçiler ve kimyacılarının sıvılardan renk giderimi, gaz adsorpsiyonu konularına merak duymaya başladıkları tarihtir. Aktif karbonun kullanımında ticari bir yükselme eğilimi vardır. Bu belki turba, linyit, ağaç, Hindistan cevizi kabuğu ve diğer karbon içeren maddeler gibi doğal kaynak sahasından veya kömürden yapılmış olan aktif

karbonun kullanımı ve üretimine yönelen yaygın ilgi ile meydana gelmiş olabilir. Kirlenmiş sıvı ve gazların arıtımı için adsorpsiyon prosesini uygulama fikri birçok yıldan beri bilinmesine rağmen, adsorpsiyon çoğu yeni kimya mühendisliği uygulamalarından biri olarak görülür. Bunun sebebi sorpsiyon prosesindeki adsorbent maddelerin fiziksel özelliklerinin ve yüzey kimyasının bu olaydaki rolünün yavaş yavaş anlaşılmasıyla ilgilidir. Bu proseste yüzey değişikliği, yüzey alanı, porozite özelliği ve adsorbentlerin temel karakterizasyonuna çok dikkat etmek gerekir. En zor adsorpsiyon olayı adsorbat madde molekülünün, adsorbent madde boşluklarına eşit olduğu zaman meydana gelir. Moleküle kıyasla boşluklar daha küçük olursa, çekme kuvveti daha büyük olur. Ancak boşluklar adsorbe edilen moleküllerin girişine, zorluk vermeyecek veya adsorpsiyonu çok fazla azaltacak küçüklükte olamaz. Aktif karbonun boşluk yapısı adsorbe edici özelliklerin belirlenmesinde son derece önemlidir. Çizelge 1.4.'te toz ve granül formdaki aktif karbona ait genel özellikler verilmiştir (Şeker, 2007).

Çizelge 1.5 Toz ve granül formdaki aktif karbonun özellikleri (Şeker, 2007)

Özellik	Toz aktif karbon	Granül aktif karbon
Yüzey alanı (m ² /g)	0	900-1100
Partikül boyutu	8-9 mikron	8x30 ile 12x40
Benzerlik katsayısı	0	1,8
Etkili boyut (mm)	0	0,85-1,05 ile 0,55-0,75
Görünür yoğunluk (lb/ft ³)	36+4	35-37 ; 27-29
İyod sayısı (mg/g)	800+100	850-1050
Partikül yoğunluğu (g/cm ³)	1,4-1,5	1,45-1,55; 1,3-1,4
Elekt analizi		
100 mesh geçen %	99-100	
200 mesh geçen %	97-99	
325 mesh geçen %	92-98	

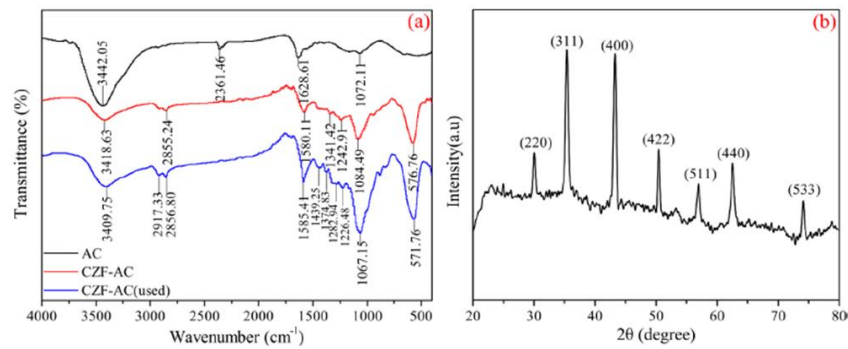
Adsorban malzemelerin gelişmiş gözenek yapısı, geniş spesifik yüzey alanı, kararlı kimyasal özellikleri ve mükemmel adsorpsiyon performansı, özellikle toz aktif karbonun aynı zamanda yüksek adsorpsiyon hızı ve düşük maliyet avantajları mevcuttur. Adsorban olarak

aktif karbon (AC), biyosorbentler, zeolitler, nano-perflorooktil alümina, çok duvarlı karbon nanotüpler ve selüloz bazlı atıkların kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca $MnFe_2O_4$, Fe_3O_4 , $g-Fe_2O_3$ ve gibi manyetik parçacıklar ile Fe_3xLaxO_4 aynı zamanda radyoaktif maddeleri absorbe edebilen iyi adsorbanlardır. Ancak bu adsorbanlar adsorpsiyon kapasiteleri ve desorpsiyon kabiliyeti açısından düşük performansla sahip olabilirler. Adsorpsiyon işleminden sonra adsorbanın kolaylıkla ayrılması gereklidir. Ayrılma işlemi için filtreleme veya santrifüjleme prosedürleri uygulanabilir. AC ve manyetik parçacıkların dezavantajlarının üstesinden gelmek için, çok çeşitli organik kirleticileri gidermek üzere adsorban olarak kullanılabilecek manyetik kompozitler üretmek üzere bunları bir araya getirmek için emprenye etme, bilyalı öğütme, kimyasal birlikte çöktürme ve hidrotermal yöntem gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Geniş bir pH aralığında çalışır ve manyetik ayırma teknolojisi ile uygun bir şekilde ayrılır. Birçok türde manyetik parçacık ve AC kompozit sentezlenerek ve boyaların uzaklaştırılmasında adsorban olarak kullanılmıştır. Jiang ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışmada, aktif karbon/ $NiFe_2O_4$ (AC/ $NiFe_2O_4$) manyetik kompoziti, kolay bir hidrotermal yöntemle sentezlemiş ve azo boyar madde modeli olarak metil oranj (MO) seçilmiştir. AC/ $NiFe_2O_4$ manyetik kompozitin adsorpsiyon özelliğini araştırmak için AC içeriği, MO çözeltisinin pH'ı ve konsantrasyonu, temas süresi, sıcaklık, adsorban dozajı ve iyonik kuvvet, toplu adsorpsiyon deneyleriyle sistematik olarak araştırılmıştır. MO giderim verimliliği %93'e ve sıcaklıkta ilk 2 dakika ve 30 dakika içinde %99'a ulaşmaktadır. MO'nun AC/ $NiFe_2O_4$ kompoziti üzerine dikkat çekici adsorpsiyon kapasitesi, MO ve AC arasındaki hidrojen bağı etkileşimi ile açıklanabilmektedir. $NiFe_2O_4$ kompoziti için rejenerasyon deneyi AC/ $NiFe_2O_4$ kompozitinin MO'nun altı kez uzaklaştırılması için adsorban olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kompozit kolaylıkla harici olarak uygulanan bir mıknatısta dağıtılır, ayrılır ve çıkarılır (Şeker, 2007).

Tang, Zhang, Su, Wu, Zhao ve Xie, (2021) çalışmada ilk kez manyetik karbon nanotüpler (M-CNT'ler) adsorbat olarak sentezlenmiştir. Karbon nanomalzemeleri, çevre kirliliği kontrolünde önemli rol oynayan yeni bir adsorpsiyon malzemesi türüdür ve geniş spesifik yüzey alanına sahiptir. Bunlar arasında karbon nanotüpler (CNT'ler), esas olarak kimyasal yapıları, yüksek yüzey alanları ve büyük en boy oranlarından kaynaklanan, yaklaşık 1 nm çapında ve yüzlerce mikrometre uzunluğunda hidrofobik polimerlerdir. İlgili çalışmalar, CNT'lerin su ortamındaki MP'ler gibi hidrofobik organik bileşik maddelere (HOC) karşı son derece yüksek afiniteye ve adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Manyetik karbon nanotüpler (M-CNT'ler) manyetik alanda kolayca ayrılabilir ve bunlara yüklenen

manyetik malzemeler (örneğin demir oksit)-CNT'ler kirleticilerin adsorpsiyon oranını daha da artırır. Nanopartiküllerin manyetik olarak ayrılması, santrifüj ve filtrasyon yöntemlerinden daha hızlıdır ve ayrıca nanopartiküllerin doğal çevreye ve insan hücrelerine girmesini etkili bir şekilde önler. MP'lere göre CNT'ler, hidrofobik etkileşim yoluyla polietilen (PE), polietilen (PP), polietilen tereftalat (PET) dahil olmak üzere polar olmayan MP'lere bağlanabilir. Bu çalışmada, M-CNT'ler polietilen (PE), polietilen tereftalat (PET) ve poliamid (PA) üzerine etkili bir şekilde adsorbe edilmiş ve tüm MP'ler/M-CNT kompozitleri, manyetik kuvvetle sulu çözeltilerden kolayca ayrılmıştır. 5 g·L⁻¹ M-CNT eklendiğinde, hedef MP'ler (5 g·L⁻¹) 300 dakika içinde tamamen çıkarılmıştır. PE, PET ve PA'nın maksimum adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 1650, 1400 ve 1100 mg-M-CNTs·g⁻¹ idi. Bu süreç COD, NH₃-N ve PO₄'ten neredeyse hiç etkilenmemiştir. Bir mutfak atık arıtma tesisinden boşaltılan atık sudan 3- madde ve tüm MP'ler tamamen uzaklaştırılmıştır. Ayrıca, adsorbe edilen M-CNT'ler ısıtıl işlem (600 °C) yoluyla geri dönüştürülebilir ve bu M-CNT'ler aynı özelliklere sahiptir. Dört kez kullanıldıktan sonra M-CNT'ler hala test çözümündeki toplam MP'lerin ~%80'ini uzaklaştırmıştır bu da M-CNT'lerin MP'lerin kontrolü için umut verici teknikler olduğunu göstermektedir.

Zhang ve Yang (2020) çalışmasında CuFe₂O₄/aktif karbon kompozit ve karbon/ZnFe₂O₄ nanokompozitlerini aktif karbona göre yüksek verimli adsorbanlar olarak araştırdığından CuZnFe₂O₄ yüklü bir aktif karbon kompozit (CZF-AC) basit bir tek kap hidrotermal yöntemle sentezlenmiştir. Elde edilen malzeme X-ışını kırınımı (XRD), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve titreşimli numune manyetometresi (VSM) ile karakterize edilerek iyi bir manyetik tepkiye sahip olduğunu ve orijinal aktif karbonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruduğunu kanıtlanmıştır.



Şekil 1.21 (a) FTIR analizi AC, CZF-AC, and CZF-AC (MB loaded); (b) XRD analizi CZF-AC (Zhang, Yang, 2020)

Metilen mavisi, malakit yeşili ve rodamin B gibi katyonik boyalar, elde edilen manyetik aktif karbon kullanılarak sulu çözeltilerden uzaklaştırılmıştır. Bu katyonik boyaların CZFAC üzerindeki adsorpsiyon davranışı, dinamik ve denge adsorpsiyon deneyleri yoluyla sistematik olarak incelenmiştir. Çizelge 1.5.'te manyetik karbon materyallerin boyar madde uzaklaştırmalarına ait koşul ve performansları verilmiştir. Sentezlenen CZF- için iyi adsorpsiyon kapasitesi (100 ila 970 mg boya/g CZF-AC), hızlı adsorpsiyon kinetiği (20 dakika içinde dengeye ulaşır) ve mükemmel yeniden kullanılabilirlik (4 adsorpsiyon-desorpsiyon turundan sonra bile adsorpsiyon performansı kaybı yok) gözlemlenmiştir. Bu çalışma manyetik karbon adsorbanların yapımı için kolay bir yöntem olmakla birlikte aynı zamanda diğer fonksiyonel malzemeler için potansiyel bir yeşil mıknaatıslanma stratejisi de sağlamaktadır (Zhang, Yang, 2020).

Çizelge 1.6 Manyetik karbon materyallerin boyar madde uzaklaştırmaları (Zhang, Yang, 2020)

Adsorban Malzeme	Karakteristik Özellikleri	Adsorbat	Koşullar	Kapasite/Desorpsiyon
manyetik aktif karbon	$S_{BET}=722,34 \text{ m}^2/\text{g}$; $M_s=6,22 \text{ emu/g}$	malahit yeşili	adsorban miktarı 1 g/L; pH = 3,72 ve çalkalama 150 rpm	$Q_m=1.106,40 \text{ mg/g}$
nitrojenle zenginleştirilmiş manyetik gözenekli karbon	$S_{BET}=465,7 \text{ m}^2/\text{g}$; $M_s=22,9 \text{ emu/g}$	Rodamin B (RhB)	$T = 30^\circ\text{C}$; adsorban miktarı 0,2 g/L	$Q_m=137,1 \text{ mg/g}$; dokuz adsorpsiyon döngüsünden sonra adsorpsiyon kapasitesinde 137,1'den yaklaşık 100 mg/g'a bir azalma
Fe ₃ O ₄ nanopartikülleri işlevselleştirilmiş karbon	$S_{BET}=1.200 \text{ m}^2/\text{g}$; $M_s=16,5 \text{ emu/g}$	Rodamin B (RhB); metilen turuncusu (MO)	$C_0 = 250 \text{ mg/L}$; $T = 25, 35, 40 \text{ ve } 50^\circ\text{C}$; pH = 7; adsorban miktarı 1,0 g/L	$Q_m=182.48 \text{ mg/g}$ RhB için; $Q_m=150.35 \text{ mg/g}$ MO için.
gözenekli karbon/kobalt ferrit (C/CFO) nanokompozit	$S_{BET}=137,48 \text{ m}^2/\text{g}$; $M_s=8,0 \text{ emu/g}$	metilen mavisi (MB) kongo kırmızı (CR)	pH = 3–11; 25, 35 ve 45 °C; $C_0 = 50 \text{ ve } 200 \text{ mg/L}$ MB ve CR; adsorban miktarı 0.6 g/L	$Q_m = 43,05 \text{ mg/g}$ MB; $Q_m = 270,64 \text{ mg/g}$ CR için; CR ve MB için başlangıçtaki adsorpsiyon kapasitesinin %97,6 ve %75,3'ü üçüncü döngüde tutulabilir.
Fe ₃ O ₄ @AMCA-MIL-53(Al) nanokompozit	$S_{BET}=197,8 \text{ m}^2/\text{g}$;	metilen mavisi (MB) ve malahit yeşili (MG)	pH=8.9 ve 6.8; $C_0=25 \text{ mg/L}$; $T=45^\circ\text{C}$; adsorban miktarı 0.8 g/L	$Q_m = 381.38 \text{ mg/g}$ MB için; $Q_m = 328.43 \text{ mg/g}$ MG için; desorpsiyon performansı MB için %84 ve MG için %90.
gözenekli manyetik biyokömür	$S_{BET}=80,1 \text{ m}^2/\text{g}$; $M_s=38,7 \text{ emu/g}$	malahit yeşili (MG)	$C_0=100 \text{ mg/L}$; adsorban miktarı 0.25 g/L; 25 °C; pH = 6	$Q_m = 515.77 \text{ mg/g}$; yedi döngüden sonra bile >%90 temiz kalmaktadır.

Çizelge 1.6 Manyetik karbon materyallerin boyar madde uzaklaştırmaları (Zhang, Yang, 2020) (devam)

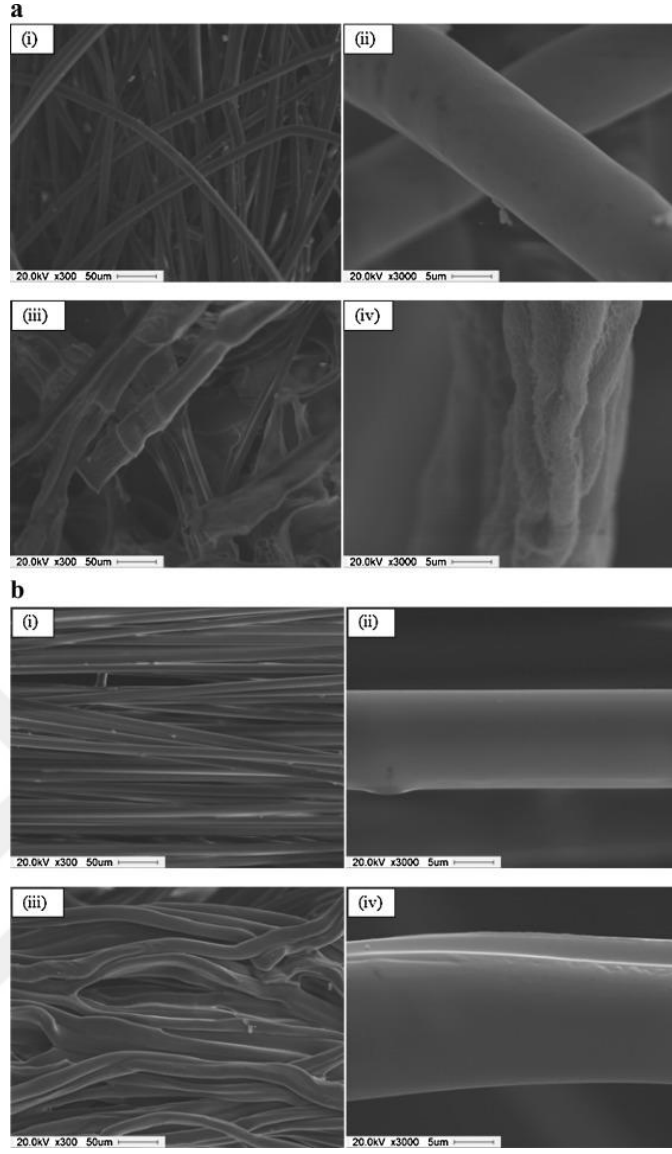
algıl karbon/Fe3O4	aktif S _{BET} =126,77 m ² /g; M _s =26,57 emu/g	metilen mavisi (MB) ve metil moru (MV)	C0 = 10 mg/L; adsorban miktarı 1.5 g/L; 25 °C; pH = 7; ultrasonik frekans 45 kHz	Qm = 60.60 mg/g MB için; Qm = 59.88 mg/g MV için; yedinci döngüden sonra adsorbsiyon performansı boyar maddede <%3 şeklindedir.
CuZnFe2O4/aktif karbon	S _{BET} =209,0 m ² /g; M _s =23,13 emu/g	metilen mavisi (MB), malahit yeşili (MG) ve Rodamin B (RhB)	pH = 7; T = 25 °C; adsorban miktarı 0.5 g/L	Sıra ile Qm = 100,91, 970.87 ve 174.83 mg/g; dördüncü döngüde performans kaybı yoktur.

Bediako, Wei ve Yun (2016) araştırmasında lyocell esaslı lif ve kumaşların yüzey modifikasyonu ile yüksek performanslı adsorban geliştirilmiştir. Elde edilen malzeme ile Cd(II) uzaklaştırılmıştır. Çalışmada, Lyocell lif şeritleri (LS) Kore’de bulunan bir elyaf üreticisi tüketim öncesi elyaf eğirme atıkları ve Lyocell kumaşlar (LF) da yine aynı tesisin dokuma proseslerinden kaynaklanan atıkları kullanılmıştır. Orijinal ve modifiye edilmiş Lyocell numunelerinin yüzey morfolojilerindeki olası değişiklikleri için SEM analizi, fonksiyonel grupları incelemek için de FTIR analizinde incelenmiştir. SEM analizinde orijinal lifler (LS), 300x ve 3000x büyütmelede çok düzgün ve ince morfolojik görünüm sergilerken modifiye edilmiş CMC-LS sorbentleri kronolojik yönelimlerde doğrusal olarak hizalanırken, CMC-LF sorbentleri düzensiz morfolojiler göstermiştir. Üstelik, CMC-LF sorbentleri bazı noktalarda çok küçük sahte gözeneklere sahip kırışık yüzeylere sahipken, CMC-LS sorbentleri neredeyse orijinal formları kadar pürüzsüzdür. CMC-LF sorbentleri ayrıca düğüm noktalarındaki fiber iplikleri arasında topaklanmalar oluşturarak çok fazla kümelenmiştir. Bununla birlikte, CMC-LS ve CMC-LF'nin ortalama kalınlığı sırasıyla 12,4'ten 19,3 µm'ye ve 13,1'den 16,6 µm'ye yükseldi. LS'nin LF'ye göre daha yüksek şişme derecesi, LF yapısının çapraz düzenlemeleri olduğu tahminlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, başlangıç metal konsantrasyonu aynı zamanda sorpsiyonu da etkilemiştir. Adsorbentler yeniden üretilebilir ve adsorbsiyon kapasitelerinde önemli bir düşüş olmaksızın birkaç döngü boyunca yeniden kullanılır. Ağır metal giderimi için özellikle de atık malzemelerden elde edildiğinden düşük maliyetlidir. Bu çalışmada potansiyel eluent olarak 0,1 M EDTA, HCl ve tiyoüre, sorbat olarak ise 100 mg/l Cd(II) çözeltisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, EDTA ve HCl'nin her ikisinin de %100 desorpsiyon verimi elde

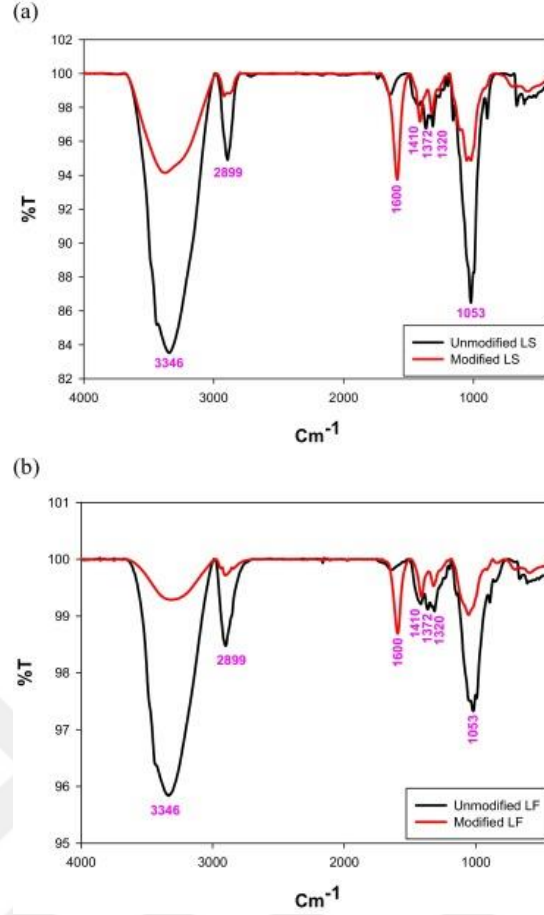
edebildiğini ancak tiyoürenin desorbe edemediğini (yani %0 desorpsiyon) ortaya çıkarmıştır. Tiyoürenin desorpsiyondaki verimsizliğinin nedeni, Cd(II) iyonları ile tiyoürenin protonlanmış amin grupları arasındaki itici kuvvetlerle açıklanabilir. EDTA hafif alkali ortamda çözündüğü için pH'ı stabilize etmek daha kolay ve dolayısıyla sonraki sorpsiyon-desorpsiyon döngüleri için kullanılmıştır. Sorpsiyon veriminin hesaplanmasında ilk sorpsiyon %100, sonraki sorpsiyonların her biri ise birincinin yüzdesi olarak alınmıştır. Benzer şekilde, desorpsiyon verimliliği, her bir sorpsiyondan sonra desorbe edilen metal iyonlarının yüzdesi olarak hesaplanmıştır. Çizelge 1.6.'da görülebileceği gibi, her üç sorbent de üç döngüden sonra neredeyse %100 emme ve desorpsiyon verimliliğini korumuştur ve bu, bunların iyi bir yeniden kullanılabilirlik potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1.7 1.6. 0,1 M EDTA kullanılarak sorbentlerin sorpsiyon-desorpsiyon verimleri. (Bediako vd., 2020)

Numune Malzeme	1. döngü		2. döngü		3. döngü	
	%sorpsiyon	%desorpsiyon	%sorpsiyon	%desorpsiyon	%sorpsiyon	%desorpsiyon
CMS-LS	100,0	101,1	99,5	100,3	99,1	100,4
CMC-LF	100,0	100,8	99,1	100,1	98,9	100,0
DM-3	100,0	100,5	100,0	100,1	100,0	100,3



Şekil 1.22 (a) LF numunelerinin SEM analizleri: (i) LF 300 $\times$, (ii) LF 3000 $\times$, (iii) modifiye CMC-LF 300 $\times$ ve (iv) modifiye CMC-LF 3000 $\times$. (b) LS numunelerinin SEM mikrografları: (i) LS 300 $\times$, (ii) LS 3000 $\times$, (iii) modifiye CMC-LS 300 $\times$ ve (iv) modifiye CMC-LS 3000 $\times$



Şekil 1.23 Değiştirilmiş (kırmızı çizgi) ve değiştirilmemiş (siyah çizgi) (a) LS ve (b) LF adsorbentlerinin FTIR spektrumları (Bediako, vd. 2016)

Sarıgül (2022) çalışmasında modifiye edilmiş tekstil atıklarının tekstil atık suundaki giderim verimliliğini araştırmıştır. Demir kaplı cüruf (DKC) malzemesi için optimum adsorpsiyon koşulları; 100 ml numune hacminde, 8 mg/L başlangıç konsantrasyonunda (metilen mavisi), 2,5 gr DKC, 60 dakika ve 25°C 'de %80 boyar madde giderim verimi elde edilmiştir. Adsorbent maddeler deney sonunda filtre edildikten sonra etüvde 60 dakika boyunca kurutulmuştur. Kurutulan DKC malzemesi 100 ml numune hacimlerinde ve 150 rpm çalkalama hızında 60 dakika boyunca 0,1 HCL, 0,1 NaOH ve distile su çözeltileri kullanılarak desorpsiyon çalışılmıştır. Desorpsiyon işleminden sonra yeniden adsorpsiyon çalışmaları tamamlanmıştır. 0,1 N HCl , 0,1 NaOH ve distile su için boyar madde giderim verimleri sırasıyla % 55 , %73 ve %47 olarak hesaplanmıştır. Bundan sonraki desorpsiyon çalışmalarına; desorpsiyon çözelti olarak 0,1 N NaOH seçilmiştir. Cüruf malzemesi için en iyi adsorpsiyon koşulları; 100 ml numune hacminde, 8 mg/L başlangıç konsantrasyonunda (metilen mavisi), 10 gram cüruf, 60 dakika ve 25°C' de çalışılarak %61 boyar madde giderim verimi elde edilmiştir. Adsorbent maddeler deney sonunda filtre edilmiş ve etüvde kurutulmuştur. Kurutulan cüruf malzemeleri

100 ml numune hacimlerinde, 150 rpm çalkalama hızında 60 dk boyunca 0,1 HCl, 0,1 NaOH ve distile su çözeltileri kullanılarak çalışılmıştır. Desorpsiyon işleminden sonra tekrar adsorpsiyon çalışmaları yapılmış olup 0,1 N HCl, 0,1 NaOH ve distile su için boyar madde giderim verimleri sırasıyla %49, %23 ve %7 olarak hesaplanmıştır. Bundan sonraki desorpsiyon çalışmalarına; desorpsiyon çözelti olarak 0,1 N HCl seçilmiştir. Çalışmada birincil ve ikincil desorbsiyon sonuçları Çizelge 1.8 de verilmiştir.

Çizelge 1.8 Cüruf ve demir kaplı cüruf (DKC) malzemelerinin desorbsiyon performansı (Sarıgül, 2022)

Boyar madde giderim verimliliği %				
Adsorbent malzeme	Desorbsiyon çözeltisi	Adsorbsiyon ¹	Adsorbsiyon ²	Adsorbsiyon ³
Curuf	0,1 N HCl	61	49	20
DKC	0,1 N NaOH	80	73	50

¹ Optimum şartlarda birinci adsorpsiyonu ifade eder.

² Birinci adsorpsiyon sonrası, desorpsiyon işlemi yapıldıktan sonra ikinci adsorpsiyonu ifade eder.

³ Birinci adsorpsiyon, desorpsiyon, ikinci adsorpsiyon, desorpsiyon, üçüncü adsorpsiyon çalışmalarını ifade eder.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Dünya nüfusunun artması ve insanlığın temel ihtiyaçlarından biri olan tekstil ürünlerindeki talebin karşılanması amacıyla doğal liflerin birincil alternatifi, dünya lif üretiminde ilk sırada yer alan polyester ve polyesterin sürdürülebilir ikamesi geri dönüştürülmüş pet esaslı ham madde kullanımının yaygınlaşması ile tekstil işletmelerindeki değişen çevre boyutlarının incelenmesini gündeme getirmektedir. Ancak yapılan literatür araştırmalarında tekstil endüstrisinde yapılan güncel araştırmaların daha çok evsel yıkama koşullarında yürütüldüğü, endüstriyel kirlilik ve çevreye daha duyarlı ve döngüsel ekonomi modeline uygun giderim yöntemleri kapsamında bir boşluk tespit edilmiştir.

AB'nin 2019 yılında açıkladığı Avrupa Yeşil Mutabakatı ile AB üretim ve tüketim politikalarında kapsamlı bir değişikliğe gidilmektedir. Yeni düzenlemelere geçiş ve sektörel entegrasyonun zamanında ve eksiksiz olabilmesi ancak endüstriyel işletmelerde problemin büyüklüğünün tanımlanması, laboratuvar ve pilot ölçekli deneysel çalışmaların tamamlanarak

seri üretim değişikliklerinin uygulanması neticesinde sağlanabilir. Bu amaçla çalışmada seçilen kumaş, Avrupa Birliğine üye ülkelerden birinin Türkiye’den tedarik ettiği, Türkiye’de yerleşik farklı illerde yer alan tekstil üretim işletmelerinde yüksek miktarda (her bir tesiste en az >3.000.000 metre/yıl) retimi gerçekleştirdiği ev tekstili ürünüdür.

Geri dönüştürülmüş pet kaynaklı elyaf kullanımının başta enerji ve sera gazı emisyonları üzerine etkileri literatürde sıklıkla yer bulurken, bu zgn çalışmada öncelikle geri dönüştürülmüş pet (R-PET) esaslı dokuma kumaş boyama prosesi kaynaklı mikroplastik salınımının tespit edilmesi, ikinci aşamada tekstil üretim atıklarından adsorban madde eldesi ve son olarak da bu adsorban madde ile mikroplastik gideriminin deneysel olarak araştırılması hedeflenmiştir.

Çalışma Türkiye’de dokuma kumaş üretimi yapan entegre tekstil işletmelerinde doğrudan üretimden alınan atık su ve tekstil materyalleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada %100 R-PET esaslı dokuma kumaş ektirme yöntemi boyama prosesi atık suyundan alınan kompozit numune ile çalışılmıştır. Çalışmaya n yıkama ve apre işlemleri dahil değildir. Adsorban madde eldesinde yine işletmede kullanılan geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi, lyocell ipliği telefi, lyocell kumaş telefleri seçilmiştir. İşletmenin atık su deşarjında tespit edilen mikroplastik kirliliğin yine işletme kaynakları ile döngüsel model çerçevesinde çözüm bulabilmesi hedeflenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Materyal

Çalışmanın ilk aşamasında, tekstil üretiminden kaynaklanan mikroplastik tespiti için %100 R-PET atkı ve çözgü ipliklerinden üretilen saten konstrüksiyonunda ham dokuma kumaşın mamul kumaş elde edilmesi amacıyla boyama prosesinden kaynaklanan kompozit atık su numunesi ile çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında adsorban eldesi için işletmede kullanılan geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi, lyocell ipliği telefi, lyocell kumaş telefi kullanılmıştır. Adsorbent üretiminde proses koşulları sabitlense de geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi üretiminden elde edilen adsorbentlerin metilen mavisi çözeltisinde tekrarlanan deneylerdeki düşük performansı sebebiyle oldukça yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri ile lyocell bazlı adsorbenti farklı oranlarda katkılandırarak ve manyetik etki altında çözelti ortamından kolay ayrılabilmesi amacıyla spinel ferrit ile de katkılandırılmış malzeme (SFNK) elde edilmiştir.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında elde edilen malzeme mikroplastik arıtılabilirliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan dokuma kumaş, proses atık suyu ve adsorban eldesi için selülozik esaslı tekstil materyalleri ile hindistan cevizi kabuğundan elde edilmiş ticari aktif karbon (coconut based aktif carbon) Tekirdağ ili Ergene ilçesinde faaliyet gösteren Can Tekstil Entegre Tesisleri ve Tarım Ürünleri San. Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir.

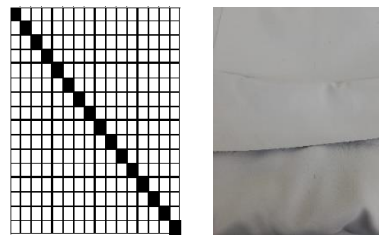
2.1.1 Dokuma Kumaş (R-PET)

Atkı ve çözgü iplikleri %100 R-PET esaslı saten dokuma kumaştır. Filament iplikler Çin menşeli olup, Global Recycled Standard (GRS) belgelendirme standartlarına uygun üretilmiştir. Çözgü ipliklerine haşıl işlemi uygulanmamıştır. Boyama ve apre işlemi tamamlanmış mamul kumaşın ağırlığı 230 gr/m²'dir. Kumaş konstrüksiyonundaki atkı ve çözgü iplikleri teknik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Ham kumaşın yapısal özellikleri

Çözü		Atkı		Çözü	Atkı	Örgü
İpliği		İpliği		Sıklığı (1 cm)	Sıklığı (1 cm)	Yapısı
Harman	%100 R-PET	%100 R-PET				
Karışımındaki Oranı	%60	%40				
Üretim Teknolojisi*	Eriyikten çekimi	lif	Eriyikten çekimi	lif		
Numara**	75 denye	150 denye		141	52	Saten
Filament Sayısı*	72 filament	48 filament				
Enine kesiti*	lif Yuvarlak	Yuvarlak				
Parlaklık*	Tam mat	Yarı mat				
Renk	Beyaz	Siyah				
Tekstüre	Evet	Evet				
Punta	Soft; < 94	Strong; > 94				
Sertifika	Global Recycled Standard (GRS)	Global Recycled Standard (GRS)				
Menşei	Çin	Çin				

*İplik teknik bilgileri tedarikçi firma tarafından sağlanmıştır. ** İplik teknik bilgileri, İplik Test Laboratuvarında in-house kontrol edilmiştir.



Şekil 2.1 Kumaş örgü yapısı ve boyanmış kumaş

2.1.2 Atık Su

Ham dokuma kumaşa haşıl işlemi uygulanmamıştır. Ham kumaş, boyama işlemindeki kumaşın boyutsal değişimin engellemek için boyama işlemi öncesi 20 metre/dakika hız ile 195°C’de termofikse prosesine alınmıştır. Çalışmada çektirme yöntemine göre polyester boyama yöntemi uygulanmıştır. Boyama işlemi Then marka ht tipi boyama makinesinde 130°C’de 3 saatte tamamlanmıştır. Şekil 2.2. de verilmiştir.



Şekil 2.2 Then marka kumaş boyama makinesi

Makinede toplam net ağırlığı 306,30 kg olan 926,6 metre ham kumaş boyanmıştır. Çizelge 2.2. de verilmiştir. Boyama flotte oranı 1/3’tür. Boyamada dispers blue (CAS No: 68608-26-4) %0,0155, rubine %0,007 ve yellow %0,032 toplamda %0,055 oranında dispers boyar madde ile toplamda 7,1 g/l tekstil yardımcı kimyasalları kullanılmıştır. Boyama prosesinde kullanılan dispers boyar maddeler ile yardımcı kimyasallar Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC) kimyasal gerekliliklerine göre Seviye 3 (Level 3) sertifikalandırılmış ve Inditex the List kategorisine göre bebek giyiminde kullanılabilir-A seviye çevreye duyarlı kategoride yer almaktadır.

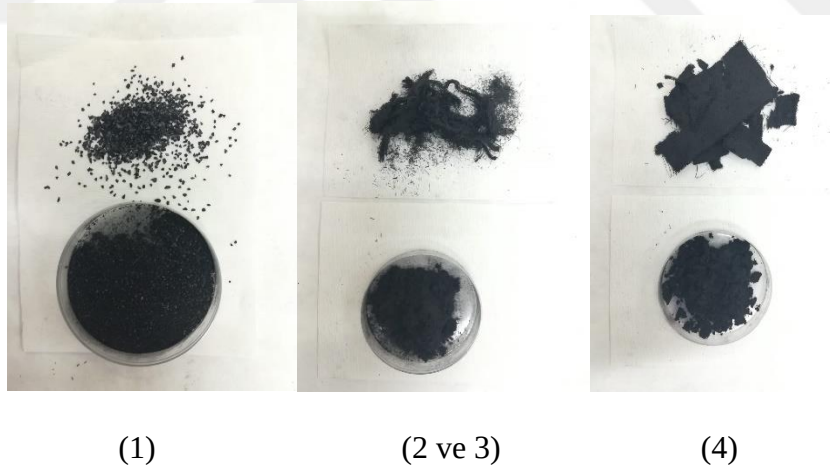
Çizelge 2.2 Boyama prosesi özellikleri

Materyal	Makine Markası	Boyama İşlemi Öncesi Ön İşlem	Boyama Yöntemi	Boyama Sıcaklığı, Süresi	Flotte Oranı	Boyamaya Alınan Toplam Kumaş Miktarı	Boya Banyosu Durulama Sayısı	Boya Banyosu Toplam Flotte Hacmi
%100 R-PET ham kumaş	THEN	Termo-fiksaj 195°C	Çektirme	135°C 3 saat	1/3	306,3 kg	3 kez	2.756,7 litre

Boyama prosesinden gelen atık sulardan toplamda 5 litre hacminde kompozit olarak alınmıştır. Kompozit atık su numunesinin konvensiyonel parametreler test değerleri kayıt altına alınmıştır.

2.1.3 Adsorbent

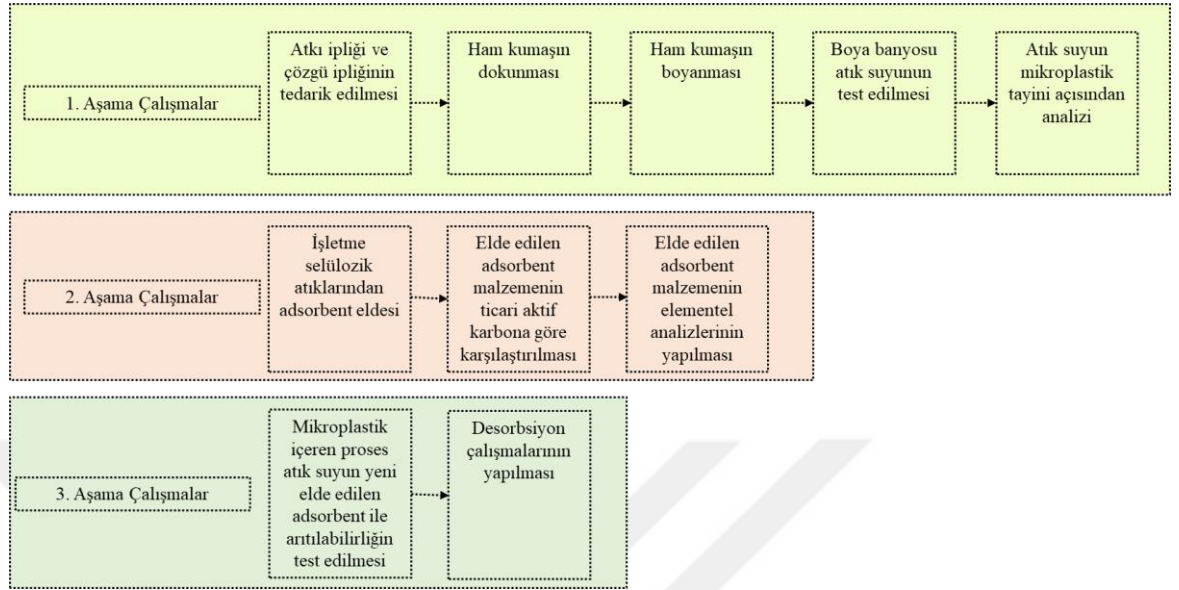
Çalışmada hindistan cevizi kabuğundan elde edilmiş granül formda ticari aktif karbon ile geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi, lyocell ipliği telefi, lyocell kumaş teleflerinden üretilen adsorbent malzemeler kullanılmıştır. Malzeme görselleri Şekil 2.3 te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Çalışılan numune görselleri (1: ticari aktif karbon; 2 ve 3: iplik esaslı adsorbent; 4: kumaş esaslı adsorbent)

2.2 Metot

Planlanan deney çalışmaları Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.

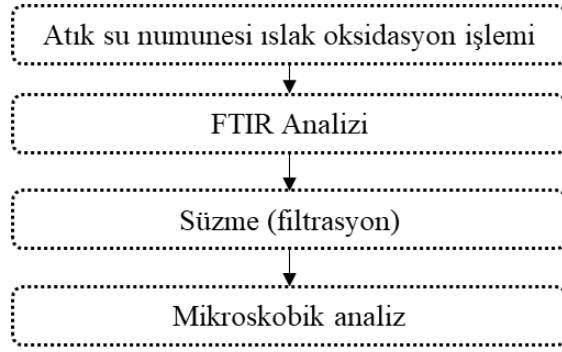


Şekil 2.4 Deney çalışmaları akış diyagramı

Çalışmanın ilk aşaması olan mamul, diğer bir ifade ile boyanmış kumaş üretimi için kullanılan iplikler ve ham kumaş teknik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Boyama prosesi teknik parametreleri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir. Ham kumaşın boyanması ise mamul kumaş elde edilmiş ve boya banyosu atık sularından kompozit şekilde numune alınmıştır. Kompozit atık su numunesinde pH, sıcaklık, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Askıda Katı Madde (AKM) gibi parametreler in-house yöntemlere göre, Toplam Organik Karbon (TOC) ise Shimadzu Yöntemine göre Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı (NABİLTEM) de gerçekleştirilmiştir.

Proses atık suyundan alınan numunelerin mikroplastığın tayini için bir yöntem kılavuzu olan ve mikroplastik ile ilk kez 2004 yılında raporlama yapan Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOOA) protokolü takip edilmiştir.

Mikroplastik tayini için deneysel planlama Şekil 2.5’te verilmektedir.



Şekil 2.5 Mikroplastik tayini deney aşamaları

Çalışmanın ikinci aşamasında, sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi stratejisi kapsamında entegre tekstil işletmesinde geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi, lyocell ipliği telefi, lyocell kumaş telefleri kullanılarak aktif karbon elde edilmiştir. Elde edilen yeni aktif karbonun ticari aktif karbona göre adsorbsiyon özelliği deneysel olarak karşılaştırmalı araştırılmıştır. Üretilebilirlik ve adsorbsiyon kapasitesi yüksek lyocell iplik teleflerinden elde edilen aktif karbonun elementel analizleri (SEM, RAMAN, X-RD, BET) tamamlanmıştır.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında mikroplastik içeren proses atık suyu elde edilen yeni adsorban malzeme ile arıtılabilirliği araştırılmıştır.

2.2.1 Dokuma Kumaş Analizleri (R-PET)

2.2.1.1 Mikroskopik analiz

Çalışmada mikroskopik analizler için Leica marka DM750 model ışık mikroskobu kullanılmıştır. Tekstil materyallerine ait elyaf, iplik ve kumaş analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.6 Işık mikroskobu (Leica DM750)

2.2.1.2 FTIR Analizi

Çalışmada tekstil numuneleri (elyaf ve iplik) alınarak Şekil 2.6.'da görülen Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ile analiz edilmiştir. Bu yöntemde bir molekül veya bileşik yapısında bulunan kimyasal bağlar hakkında tanımlayıcı bilgiler elde edilmektedir.

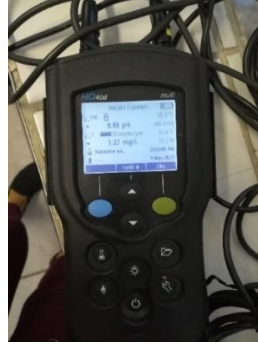


Şekil 2.7 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı

2.2.2 Atık Su Analizleri

2.2.2.1 Atık Su Konvensiyonel Testleri

Kumaş boyama prosesi boya banyosu hacmi, boyama makinesine yüklenen kumaş miktarı (kg) ile flotte oranının çarpılması ve durulama miktarı kadar doldur-boşalt hacminin eklenmesi ile deşarj edilen atık su miktarı hesaplanmaktadır. Çalışmada seçilen üretim partisi için 3 ayrı deşarjda toplam 2.756,7 litre atık su deşarjı yapılmıştır. Her bir deşarjdan 5'er litre hacminde atık su numuneleri alınmıştır. ISO 7887:2011 standardına göre 3 ana renkte maksimum adsorbsiyonu veren dalga boyları sarı 436 nm, kırmızı 525 nm, mavi 620 nm dir. Sadece Toplam organik karbon (TOK) testleri Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Merkezi Laboratuvarı'nda diğer testler Can Tekstil Entegre Tesisleri ve Tekirdağ yürütülmüştür. Firma laboratuvarı ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi ve ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi kapsamında belgelidir, tüm cihazların kalibrasyon raporları mevcuttur, ancak laboratuvar akreditasyona sahip değildir. NABİLTEM ise ISO 17025:2107 akreditasyonuna ve ISO 9001 Kalite Yönetim Belgesine sahiptir.



Şekil 2.8 Multimetre ölçüm cihazı (Hach 40D)

Toplam Organik Karbon analizinde kullanılan TOC- L serisi, 680°C’de yakma katalitik oksidasyon metodu ile çalışmaktadır. 4 µg/L ile 30,000 mg/L arasında ultra geniş bir ölçüm aralığı sunan bu analizörler ile, NDIR ile koordineli olarak 4 µg/L lik dedeksiyon limitlerine kadar inilebilmektedir. Bu yakma katalitik oksidasyon metodu ile elde edilebilen en yüksek hassasiyet seviyesidir. İlave olarak, yakma katalitik oksidasyon metodu sayesinde yalnızca kolay dekompoze olabilen düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerin değil aynı zamanda çözünmeyen dekompoze olması zor ve makromoleküler organik bileşiklerin de verimli bir şekilde okside olmasını mümkün kılmaktadır. Otomatik seyreltme, asidifikasyon ve sparj etme özellikleri ile yüksek hassasiyet ve oksidasyon performansına sahiptir (NABİLTEM, 2024).

Toplam Organik Karbon (TOK) ise Shimadzu Yöntemine göre TOC-L CPH/CPN marka SSM 5000A model cihazda NABİLTEM’ de gerçekleştirilmiştir.

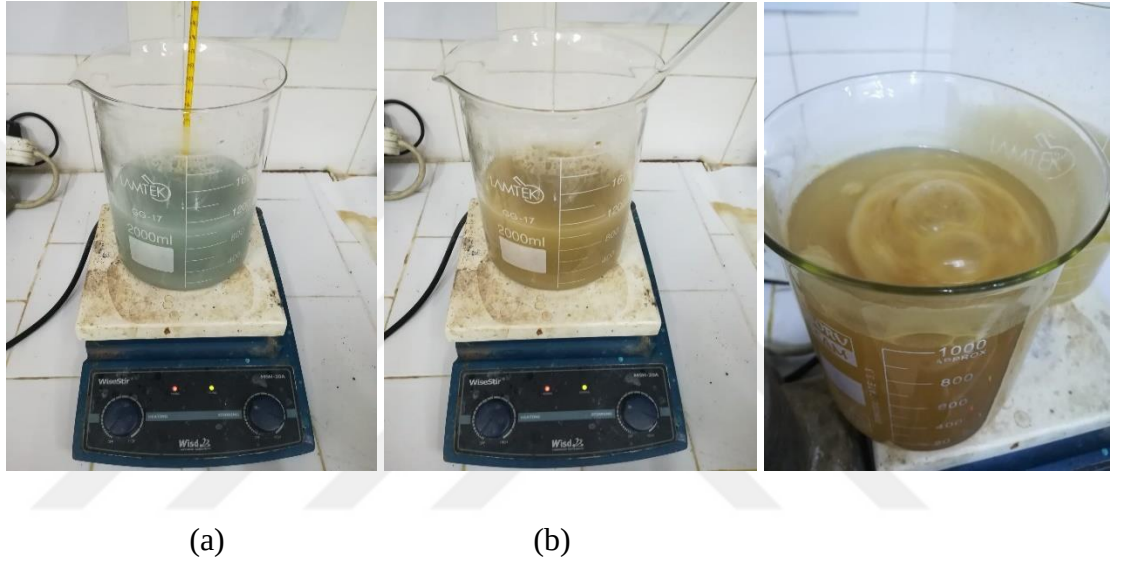


Şekil 2.9 Toplam Organik Karbon (TOC) Ölçüm Cihazı (NABİLTEM, 2024)

2.2.2.2 Islak Oksidasyon İşlemi

Islak oksidasyon işlemi için Masura (2015) protokolü takip edilmiştir. Öncelikle 0,05M Fe(II) çözeltisi hazırlamak için 500 mL distile suya 7,5 g FeSO₄.7H₂O (=278,02 g/mol) ve 3 mL konsantre sülfürik asit ilave edilmiştir. 5 litre hacminde toplanan atık su numunesinden 1

litrelik numune cam behere alınarak 20 mL 0,05M Fe(II) çözeltisi ve 20 mL %30'luk H₂O₂ (peroksit) eklenir ve çözelti ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda >75°C olacak şekilde kaynatılmıştır. Yüzeyde gaz kabarcıkları görüldüğü anda beheri ısıtıcı plakadan çıkartılarak ve kaynama bitene kadar çeker ocakta bekletilmiştir. 30 dakika daha 75°C'ye ısıtılarak doğal organik malzeme görüldüğü için tekrarlayan sıklıkla 20'şer mL daha %30 hidrojen peroksit eklenmiştir. Bu işlem hiçbir doğal organik malzeme görünmeyene kadar 4 saat boyunca tekrar edilmiştir. Devam eden proses boyunca beher alüminyum folye ile kapatılmıştır. Islak oksidasyon sonrasında pH ölçümü tekrarlanmıştır.



Şekil 2.10(a) Orjinal çözelti; (b) Çözeltiyi 20 ml FeSO₄.7H₂O + 20 ml H₂O₂ ekleme

2.2.2.3 Mikroplastik Tayini Testleri

Proses atık suyundan alınan numunelerdeki mikroplastik tayini için bir yöntem kılavuzu olan ve mikroplastik ile ilk kez 2004 yılında raporlama yapan Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOOA) adına Masura ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yayınlanan protokol takip edilmiştir. Boya banyosu ile alıcı ortama deşarj edilen mikroplastik miktarının hesaplanabilmesi için her bir boşaltmadan alınan numuneler kompozit su numunesi olarak birleştirilmiştir.

2.2.2.4 FTIR Analizi

Çalışmada atık su numuneleri Şekil 2.6.'da görülen Thermoscientific marka ve model Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile analiz edilmiştir. Bu yöntemde bir molekül veya bileşik yapısında bulunan kimyasal bağlar hakkında tanımlayıcı bilgiler elde edilmektedir.



Şekil 2.11 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı

2.2.2.5 Süzme (filtrasyon)

Islak oksidasyon işlemi tamamlanmış atık su numuneleri 200 mikron gözenek büyüklüğüne sahip naylon filtre ile vakum pompası yardımıyla süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroskop analizinde filtrede kalan mikroplastiklerin alansal taramasının nispeten daha kolay gerçekleştirilmesi için filtre alanı sınırlandırılmıştır.



Şekil 2.12 Naylon filtre ve vakum pompası

2.2.2.6 Mikroskopik analiz

Çalışmada mikroskopik analizler için Leica marka DM750 model ışık mikroskobu kullanılmıştır. Tekstil proses atık suyunda mikroskopik analiz gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görsel Şekil 2.2’de verilmiştir. Mikroskop altında fiber ve fragment formdaki mikroplastikler göz ile sayılmış ve not edilmiştir. Mikroplastiklerin renkleri bazında ayırım yapılmamıştır. Her bir filtrenin 1/8 i mikroskop altında incelenmiş, sayılar tespit edildikten sonra önce 8 ile sonra da proses banyo hacmi ile çarpılarak hesaplanmıştır.

2.2.3 Adsorbent Üretimi

Ticari aktif karbon performansı esas alınmak üzere farklı aktif karbonların adsorbsiyon kapasitelerini değerlendirmek ve çalışmaya yön verecek doğru malzemeye karar vermek amacıyla entegre tekstil işletmesinden seçilen selülozik esaslı tekstil telefleri şunlardır:

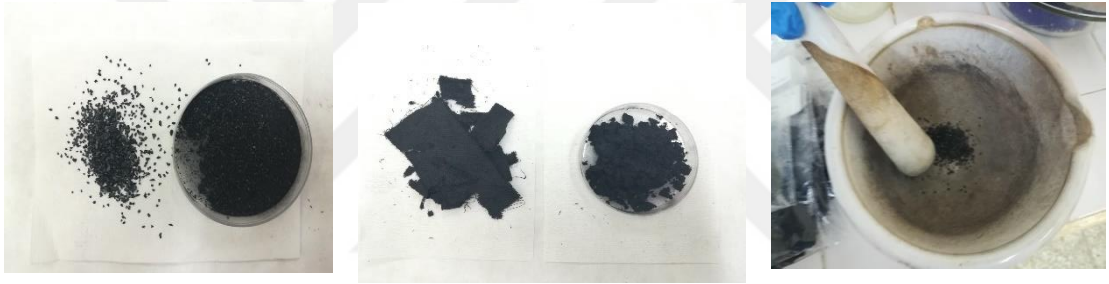
1. viskon elyaf telefi,
2. lyocell elyaf telefi,
3. geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi,
4. lyocell ipliği telefi,
5. lyocell ham kumaş telefi.

Seçilen bu malzemeler %10-%40 arasında farklı konsantrasyonlarda H₃PO₄ ile farklı süre ve sıcaklıklardaki çözeltilerde işlem gördükten sonra taşarlı yıkama ile durulanmış ve etüvde 40°C de kurutulmuştur. Kurutulan numuneler özenle düzeltilerek Proterm Furnaces PZF Series marka tüp fırının içerisine yerleştirilerek aktif karbon numuneleri üretilmiştir. Numuneler, 1,5 l/dk akış hızında azot gazı ortamında karbonlaştırılmıştır. Fırın sıcaklığı 5-10°C/dk artış olacak şekilde yükseltilerek, karbonlaşma için 300-650°C arasında sıcaklıklarda farklı denemeler yapılmıştır. Karbonizasyon sıcaklığı ve programlanan dakikadaki sıcaklık artışına göre işlem süresi değişmekte ve daha sonrasında fırın soğumaya geçmektedir. Karbonizasyon işleminin ardından elde edilen numuneler flokan tüplerde saklanmıştır. Üretilen adsorbent katı madde yüzdesi hesaplanmıştır. Tüp fırını Şekil 2.13.’te gösterilmektedir. 4 farklı tekstil materyali ile farklı koşullarda sentezlenen numunelere ait deney planı Çizelge 2.3.’te verilmektedir.



Şekil 2.13 Tüp fırını (Proterm Furnaces PZF Series)

Tüm deneylerde yüzey adsorbsiyonunu arttırmak için farklı fiziksel formlarda elde edilen, Şekil 2.14 te verilen aktif karbon numuneleri seramik havan yardımıyla ince toz forma getirilmiştir.



Şekil 2.14 Farklı fiziksel formlardaki adsorbent numuneleri

Adsorbent üretiminde proses koşulları sabitlense de geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi üretiminden elde edilen adsorbentlerin metilen mavisi çözeltisinde tekrarlanan deneylerdeki düşük performansı sebebiyle oldukça yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri ile lyocell bazlı adsorbenti farklı oranlarda katkılandırarak ve manyetik etki altında çözelti ortamından kolay ayrılabilmesi amacıyla spinel ferrit ile de katkılandırılmış malzeme (SFNK) elde edilmiştir. Malzemelerin manyetik alan etkisi altında özelliği test edilmiştir, mıknatıs ile ortamdan ayrılabilir. Karbon bazlı bileşen= $X+rGO$ dan oluşmak üzere, karbon bazlı bileşenlerin spinel ferrite ağırlıksak oranı 1:1 olarak sabit tutulmuştur. Adsorbent üretimi deney koşulları Çizelge 2.3 de verilmiştir.

Çizelge 2.3 Aktif karbon üretimi deney koşulları

Numune Adı	Kimyasal aktivasyon	Karbonizasyon koşulları	Fiziksel aktivasyon
viskon elyaf telefi (T1)	%10 K ₂ CO ₃ ; 2 saat bekleme; pH<2	450°C – 90’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı
	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat bekleme; pH<2	550°C – 90’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı.
lyocell elyaf telefi (T2)	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat bekleme; pH<2	550°C – 135’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı.
	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat 60°C bekleme; pH<2	525°C – 130’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı.
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	%15 H ₃ PO ₄ ; 8 saat 35°C bekleme; pH<2	550°C – 135’karbonizasyon- 5°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı.
	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat bekleme; pH<2	500°C – 205’karbonizasyon- 5°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	780°C de CO ₂ 2 l/dk
lyocell ipliği telefi (T4)	%25 H ₃ PO ₄ ; 8 saat 35°C bekleme; pH<2	650°C karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1 l/dk	780°C de CO ₂ 2 l/dk
	%25 H ₃ PO ₄ ; 8 saat 35°C bekleme; pH<2	650°C karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1 l/dk	Uygulanmadı.
lyocell ham kumaş telefi (T5)	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat bekleme; pH<2	550°C – 135’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	Uygulanmadı.
	%15 H ₃ PO ₄ ; 2 saat bekleme; pH<2	525°C – 135’karbonizasyon- 10°C/dk soğuma - N ₂ akış hızı 1,5 l/dk	750°C de CO ₂ 2 l/dk

Ticari aktif karbon, viskon elyaf telefi, lyocell elyaf telefi, geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi, lyocell ipliği telefi ve lyocell ham kumaş telefi sırayla T0, T1, T2, T3, T4, T5 şeklinde isimlendirilmiştir. Fiziksel aktivasyon uygulanan numuneler T0’, T1’, T2’, T3’, T4’ ve T5’ şeklinde isimlendirilmiştir.

2.2.4 Adsorbent Katı Madde Hesaplamaları

Tekstil materyallerinden karbonizasyon deney sonucundaki katı ürün verimleri aşağıda verilen eşitlikle hesaplanmıştır.

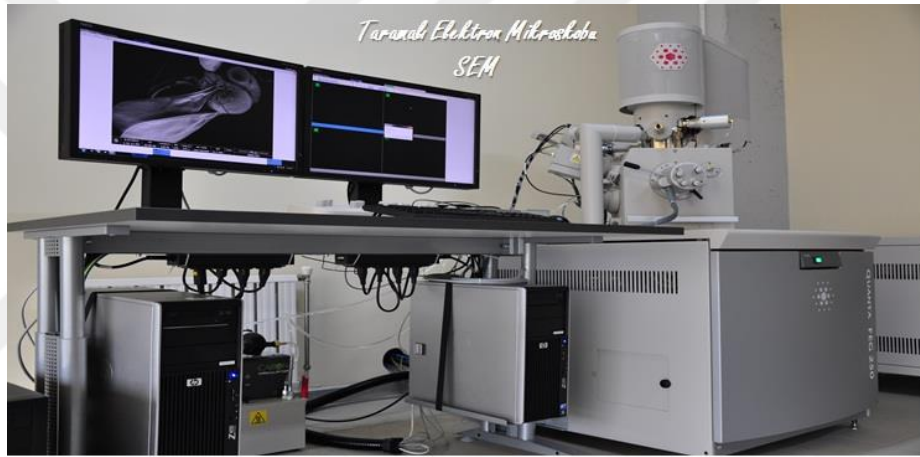
$$\text{Katı Madde (\%)} = \frac{\text{Son Tartım}}{\text{İlk Tartım}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.5 Adsorbent Karakterizasyon Çalışmaları

Tekstil işletmeleri teleflerinden elde edilen adsorbentlerin elementel analizleri Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM ve Erzurum Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) Laboratuvarlarında yapılmıştır.

2.2.5.1 SEM Analizi

Adsorbentlerin morfolojik özellikleri Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Laboratuvarında bulunan FEI/QUANTA FEG 250 marka/model SEM Taramalı Elektron Mikroskobu ile görüntüleri alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.15 SEM Cihazı (FEI/QUANTA FEG 250) (NABİLTEM, 2024)

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir (NABİLTEM, 2024).

2.2.5.2 RAMAN Analizi

Adsorbentlerin morfolojik özellikleri Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Laboratuvarında bulunan Thermo DXR Raman Raman spektroskopisi ile görüntüleri alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.16 RAMAN Cihazı (Thermo – DXR Raman) (NABİLTEM, 2024)

Raman spektroskopisi, bir numunenin GB veya yakın-IR monokromatik ışından oluşan güçlü bir lazer kaynağıyla ışınlanmasıyla saçılan ışının belirli bir açıdan ölçümüne dayanır. Molekül ve kristal örgülerdeki bağlı atomların elektron bulutlarının, gelen ışıkla etkileşerek titreşmesi sonucunda meydana gelen Raman saçılma sürecine dayanmaktadır. Raman spektrumundan organik ve inorganik maddelerin bağları hakkında kalitatif ve kantitatif bilgilerin yanı sıra madde veya malzeme yapısını meydana getiren ilgili fonksiyonel gruplar hakkında da bilgi edinilebilmektedir. Son teknoloji olan DXR Raman cihazı, katı, sıvı veya toz şeklindeki organik, inorganik maddelerin ve malzemelerin makroskopik ve mikroskopik karakterizasyonuna imkân vermektedir. Numunelerin mikrometre çözünürlükte titreşimsel spektroskopisini belirlemektedir. Numune hazırlamayı gerektirmez, çok az bir numune ölçüm için yeterlidir (NABİLTEM, 2024).

2.2.5.3 FTIR Analizi

Adsorbentlerin kimyasal bağları analizi Denge Kimya ve Tekstil A.Ş. laboratuvarında bulunan Termoscientific marka cihazda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.17 Thermoscientific marka ve model Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) cihazı

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) katı veya sıvı numunelerden, kızılötesi (infrared) spektrumu, akademik alanda ve endüstri laboratuvarlarında çok geniş uygulama alanına sahip olan bir tekniktir. Bu yöntemde bir molekül veya bileşik yapısında bulunan kimyasal bağlar hakkında tanımlayıcı bilgiler elde edilir. Bu teknik ile organik veya inorganik yapıdaki katı, sıvı veya gaz örneklerin, IR aktif molekül özellikleri kullanılarak kalitatif ve kantitatif analizlerini yapmak mümkündür. Merkezimizde bulunan FTIR spektrometresinin optik sisteminin vakumuyla, orta, yakın ve uzak IR/THz bölgelerinde herhangi bir su buharı ya da CO₂ soğurmasının sebep olduğu zayıf spektrum özellikleri kaygısı olmaksızın ölçümler gerçekleştirilebilir (DAYTAM, 2024).

2.2.5.4 XRD Analizi

Adosrbentlerin morfolojik özellikleri Erzurum Atatürk Üniversitesi DAYTAM Laboratuvarında bulunan Thermo DXR Raman spektroskopisi ile görüntüleri alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.18 XRD Cihazı (PANalytical Empyrean XRD) (DAYTAM, 2024)

Doğada maddelerin çoğu bileşik halinde ve %95 yakını kristal yapıda bulunur. XRD sisteminde, hızlandırılmış elektron demetinin bakır levhaya çarptırılması ile elde edilen karakteristik X- ışını demeti, toz, ince film, nanomalzeme ya da katı numuneler üzerine gönderilerek yansıyan veya kırınımına uğrayan ışınlar dedektör yardımı ile kaydedilip, kristal yapıya özgü oluşan kırınım deseni incelenerek yapısal ve kimyasal özellikleri belirlenebilmektedir (DAYTAM, 2024).

2.2.5.5 BET Analizi

Adsorbentlerin BET analizi ile yüzey alanları, gözenek hacimleri, gözenek çapları gibi yüzey ve gözenek özellikleri Erzurum Atatürk Üniversitesi DAYTAM Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.2.6 Adsorbsiyon Çalışmaları

2.2.6.1 Adsorbsiyon ön testleri

Çalışmada üretilen adsorbentlerin adsorbsiyon kapasiteleri test edilmiştir. Uygun deney koşullarını tespit edebilmek amacıyla ilk çalışmalar 20 mg/l metilen mavisi stok çözeltisi ile yapılmıştır. Stok çözeltinin UV-Spectro ölçümleri kayıt altına alınmıştır. Her biri toz hale getirilmiş adsorbentlerden önce belirlenen miktar tartım alınıp erlenlere konuldu. Adsorban malzemeler konulmadan çözeltinin pH ı NaOH ve H₂SO₄ ile pH ayarlanmıştır. Her bir malzeme için optimum stok çözelti eklendi. Adsorbent üretimi ile elde edilen malzeme oldukça az miktarda elde edilebildiği için deneysel çalışmalardaki adsorbent miktarı en az düzeyde kullanılmıştır. 2 dakika çalkalayıcıda karışan numunelerin pH kontrolleri yapılarak kayıt altına alınmıştır. Ardından tüm çözeltiler 2 saat boyunca 150 rpm'de 2 saat karıştırıldı. Karışım sonunda numuneler santrifüjde 4000 rpm'de 5 dakika işlem gördükten sonra UV-1800 SHIMADZU Spektrofotometride renk ölçümleri kayıt altına alınmıştır. Renk giderimi için verim hesabı $[(\text{giriş}-\text{çıkış}) / \text{giriş} * 100]$ formülasyonu ile hesaplanmıştır.



Şekil 2.19 20 mg/l metilen mavisi stok çözeltisi



Şekil 2.20 Shimadzu UV1800 UV Spektrofotometri Cihazı



Şekil 2.21 Santrifüj cihazı (NF400)



Şekil 2.22 Santifüj öncesi ve sonrası deney numuneleri

2.2.7 Desorbsiyon Çalışmaları

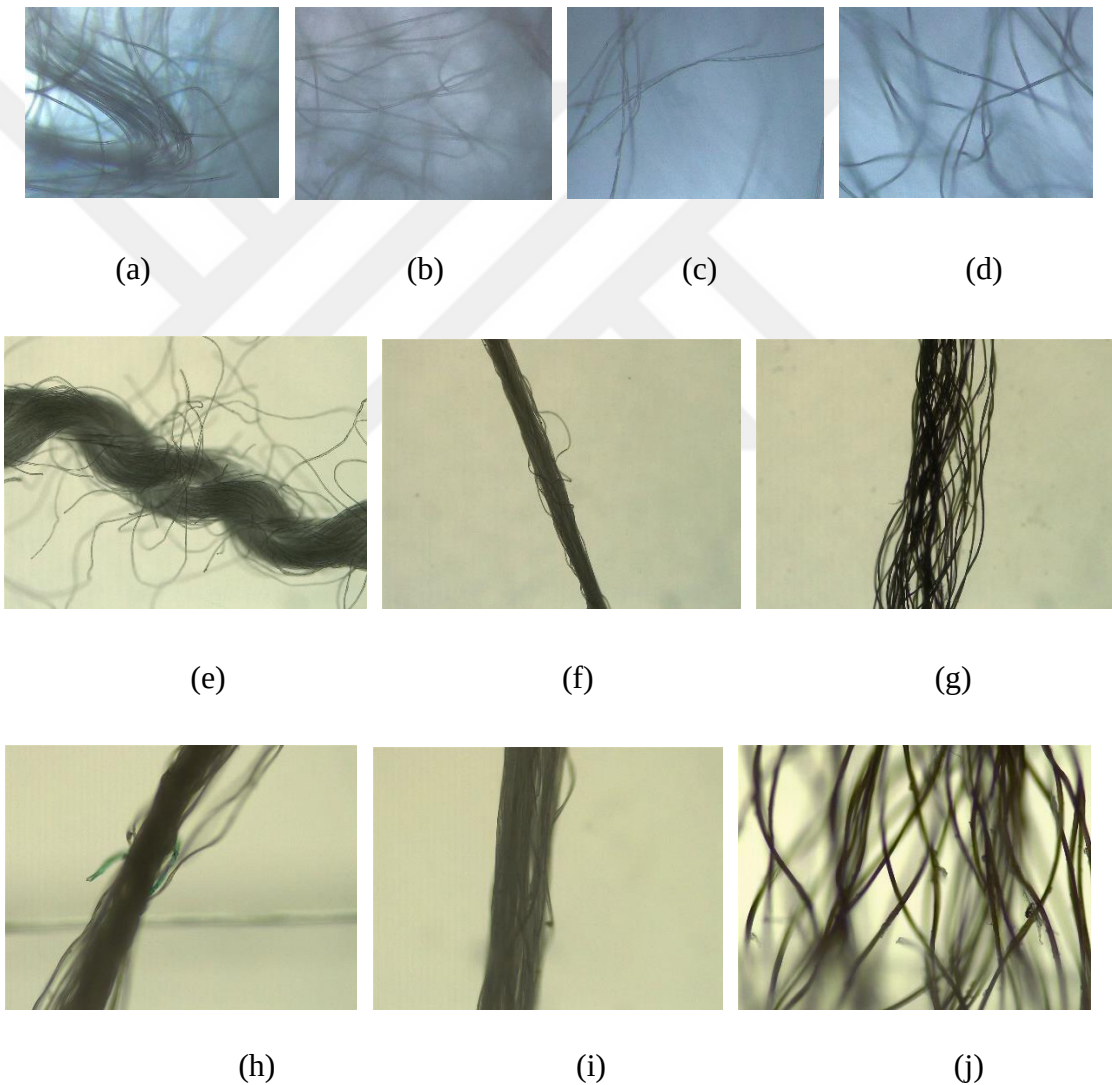
Çalışmada üretilen adsorbent ve spinal ferrit katkılı nanokompozit malzeme (SFNK) için adsorpsiyon işleminden sonra desorbsiyon ile yeniden kullanılabilirliği 0,1 N HCl, 0,1 NaOH ve distile su kullanılarak ilk aşamada metilen mavisi boyar madde ile sonraki çalışmalarda ıslak oksidasyonu tamamlanmış proses atık suyu ile test edilmiştir. En uygun çözeltinin tespit edilmesi ile neticesinde yeniden kullanım (reuse) çalışması yürütülmüştür.



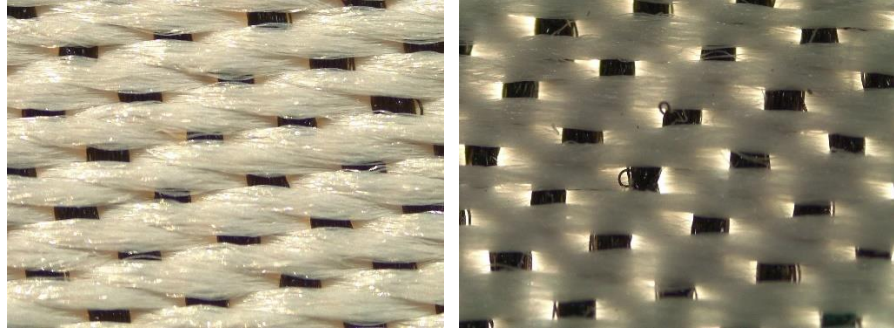
3. BULGULAR

3.1 Kumaş Testleri

Çalışmada kullanılan kumaşa ait ham madde elyaf, iplik ve kumaşlar ışık mikroskobu yardımıyla analiz edilmiştir. %100 virgin PES elyaf (10X büyütme), %100 R-PET elyaf (10X büyütme), lyocell elyaf (10X büyütme), viscon elyaf (10X büyütme), %100 R-Pet dokuma kumaş atkı ve çözgü iplikleri mikroskobik analiz (4X ve 10X büyütme), %100 R-pet ham dokuma kumaş ve boyanma sonu dokuma kumaş mikroskobik analiz (4X büyütme) ve FTIR sonuçları Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3 de verilmiştir.



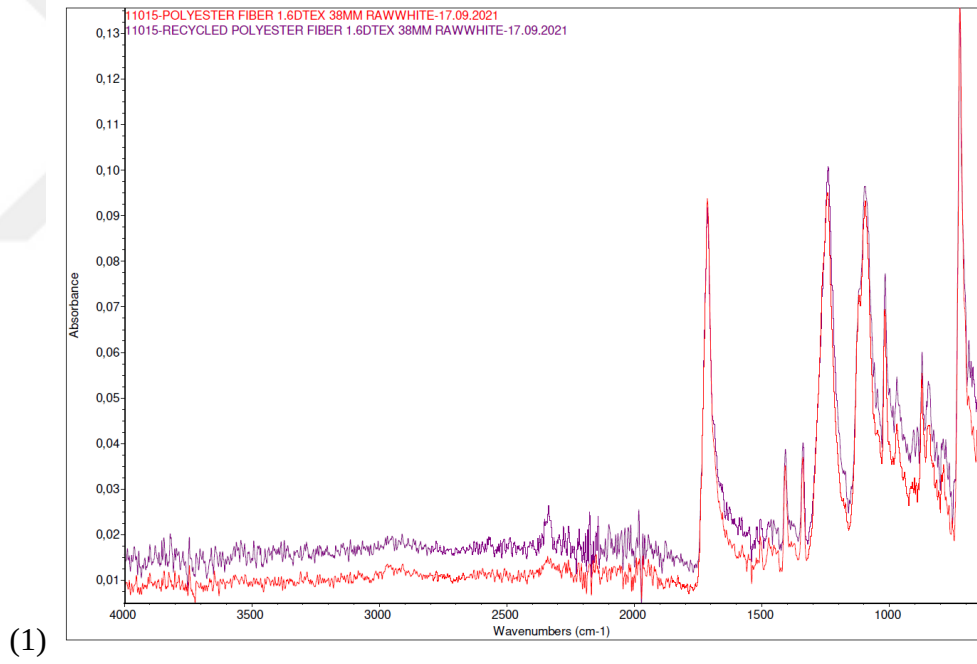
Şekil 3.1 %100 PES elyaf 10X büyütme (a), %100 R-PET elyaf 10X büyütme (b), lyocell elyaf 10X büyütme (c), viskon elyaf 10X büyütme (d), Çözgü ipliği, haşılsız 4x büyütme (e), 10x büyütme (f); Çözgü ipliği haşılı 4x büyütme (g), 10x büyütme (h); Atkı ipliği 4x büyütme (i), 10x büyütme (j)

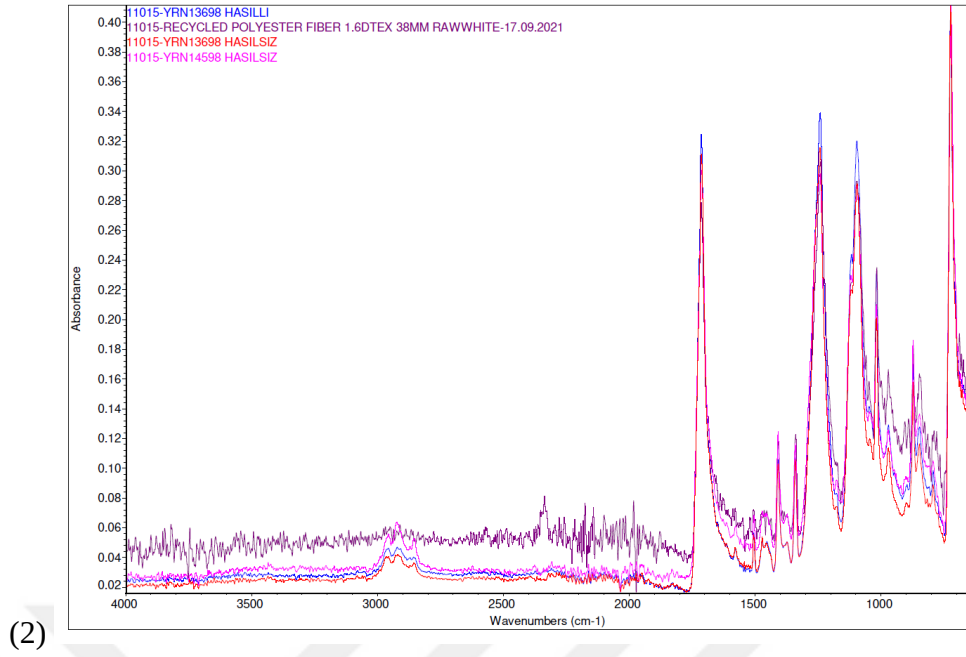


Şekil 3.2 Ham ve boyalı kumaş mikroskobik analiz (4X büyütme)

Mikroskobik analizde elyaflar görüntüleri birbirine benzer iken iplikler incelendiğinde haşılın etkisi çözgü ipliklerindeki farklılık gözle görülebilmektedir.

FTIR analizi, virgin polyester elyafı ile r-pet elyafı ve kumaşa ait atkı, çözgü ipliklerinin r-pet elyafı ile karşılaştırmalı FTIR analiz görüntüleri Şekil 3.3 de verilmiştir.





Şekil 3.3 FTIR analizi (1) virgin polyester elyafı ve R-Pet elyafı; (2) r-pet elyafı ve atkı-çözümleri

Virgin polyester elyafı ile r-pet iplikleri benzer pik verdiği görülmektedir. Virgin PES ile R-PET elyafının FTIR spektrumlarını göstermektedir. Gösterildiği gibi R-PET liflerinin ana absorpsiyon bantları virgin PES ile hemen hemen aynıdır ve PET ester karbonillerin karakteristik absorpsiyonu $1710\text{--}1725\text{ cm}^{-1}$ civarında mevcuttur (Jiang, 2019).

3.2 Proses Testleri

Çalışmalar sırasında proses koşulları sadece kayıt altına alınmıştır, bir değişiklik yapılmamıştır.

3.3 Atık Su Testleri

3.3.1 Atık Su Konvensiyonel Testler

Kumaş boyama prosesi atık su numunesine ait konvensiyonel test sonuçları Çizelge 3.1 de verilmektedir.

Çizelge 3.1 Atık su konvensiyonel test sonuçları

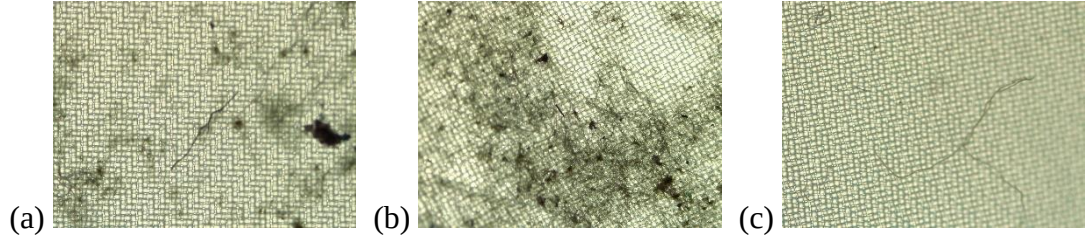
Test Parametresi	Sonuç 1. deşarj	Sonuç 2. deşarj	Sonuç 3. deşarj	Kompozit
Sıcaklık (°C) ¹	48	39	38	39,5
pH ¹	5,30	4,38	6,44	5,60
Renk (Pt-Co) ¹	18.295	10.055	4.085	9.760
Renk (436 nm, 525 nm, 620 nm) ¹	255; 208; 169	142; 109; 85	57; 45; 36	147; 113;93
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ; mg/l) ¹	7.942	2.919	1.415	3.340
Askıda Katı Madde (AKM) ¹	58	47	36	41
Amonyum Azotu (mg/l) ¹	2,76	1,37	0,65	1,49
Toplam Azot (mg/l) ¹	39,60	48,40	60,70	43,5
Sülfür (mg/l) ¹	<0,50	<0,015	0,13	0,17
Sülfür (mg/l) ¹	5.160	2.740	1.100	2.660
Toplam Organik Karbon (TOC; ppm) ²	1.979,5	818,6	344	989

1: Can Tekstil Entegre Atık Su Arıtma Laboratuvarı; 2: Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Merkezi Laboratuvar

Kumaş boya banyosu atık su numunelerine ait konvensiyonel test değerleri ilk deşardan sonra kademeli olarak azalmaktadır. Çalışmada kompozit numune test sonuçları esas alınmıştır.

3.3.2 Atık Su Mikroskopik Analizler

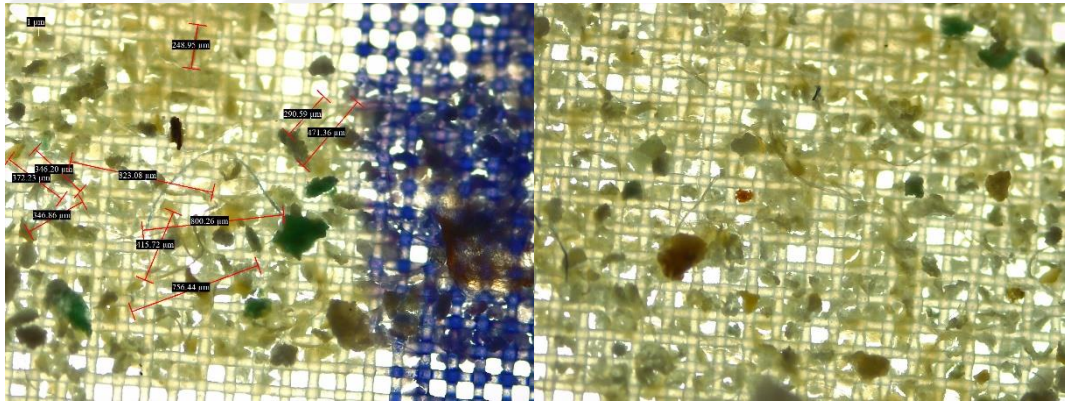
Kumaş boyama prosesinden alınan ham atık su numuneleri herhangi bir işlem görmeksizin 200 micron naylon filtre aracılığı ile bilgi sahibi olunması amacıyla mikroskop altında incelenmiştir.



Şekil 3.4 Mikroskopik analiz 4x büyütme (a birinci deşarj; b ikinci deşarj; c üçüncü deşarj)

Her bir deşarj numunesi filtresinden alınan birden fazla görüntüde, ilk deşarda son deşarja göre daha fazla fiber ve fragment tespit edilmiştir.

Prosesten alınan ham atık sular daha sonra Masura protokolüne göre ıslak oksidasyon işlemine tabi tutulmuş ve 200 mikron gözeneğe sahip naylon filtre ile süzülerek mikroskopik analizleri tekrarlanmış ve kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3.5 Mikroskopik analiz 4x büyütme (kompozit atık su numunesi)

Islak oksidasyon sonunda mikroskop altında incelenen filtrelerde ıslak oksidasyon işlemine uğramamış filtreler göre görüntü daha net tespit edilebilir özelliktedir. Elde edilen filtrelerin mikroskopta sayılması ile elde edilen veriler Çizelge 3.2 de verilmiştir.

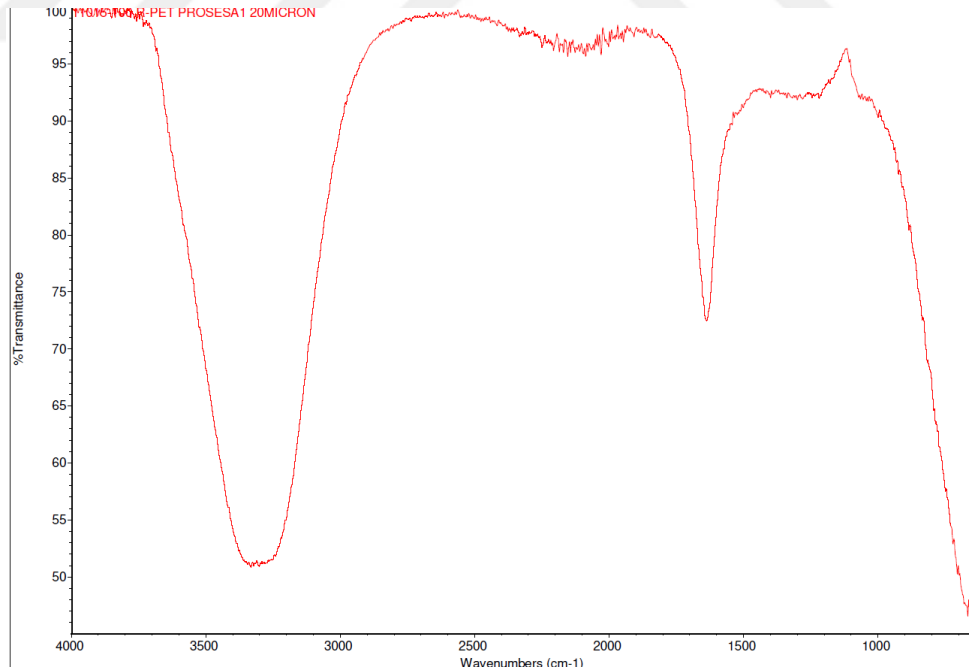
Çizelge 3.2 Mikroskobik analiz sonuçları (4x büyütme)

Numune	1 Litre Tespit Mikroplastik Büyüklüğü (mikrometre)	Hacimde Edilen	MP Sayısı (fiber form)	MP Sayısı (fragment form)	Proseste Edilen Mikroplastik Büyüklüğü (mikrometre)	Tespit	MP Sayısı (fiber form)	MP Sayısı (fragment form)
	<1		-	-	<1		-	-
	1-99		-	-	1-99		-	-
Kompozit atık su	100-499		48	16	100-499		132.321	44.107
	500-999		24	32	500-999		66.160	88.214
	>1000		16	8	>1000		44.107	22.048

Proses atık suyunda tespit edilen toplam mikroplastik sayısı fiber formda 242.588 adet, fragment formda ise 154.369 adet olarak hesaplanmıştır.

3.3.3 Atık Su FTIR Analizleri

Islak oksidasyon işlemi tamamlanmış proses atık su numuneleri için FTIR analizi tamamlanmıştır.



Şekil 3.6 FTIR analizi (kompozit atık su numunesi)

FTIR analizine göre PET ester karbonillerin karakteristik absorpsiyonu 1710–1725 cm⁻¹ civarında mevcut olduğu görülmektedir. PET yapısı üzerinde serbest hidroksil

gruplarına atfedilen 3433 cm⁻¹ FTIR spektrumları hidrolizin etkisini gösterir (Azfarniam ve Norouzi 2016, Jiang, 2019).

3.4 Adsorbent Testleri

Çizelge 3.2 de adsorbent üretiminde hesaplanan katı madde yüzde değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Adsorbent katı madde (%) bulguları

Numune Adı	Numune ağırlığı-önce (g)	Numune ağırlığı-sonra (g)	Katı madde (%)	Deney Gözlemi
ticari aktif karbon (T0')	5,00	4,97	%99,40	Fiziksel değişiklik tespit edilmedi.
viskon elyaf telefi (T1)	5,00	4,67	%93,4	Bozunma tespit edilmedi.
	5,00	1,93	%38,6	Külleşme tespit edildi.
lyocell elyaf telefi (T2)	8,70	-	-	Külleşme tespit edildi.
	8,00	2,45	%30,6	Külleşme tespit edildi.
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	23,39	9,49	%40,5	Kömürleşme tespit edildi.
	34,75	7,5	%22,0	Bozunma tespit edilmedi.
lyocell ipliği telefi (T4)	15,00	3,22	%21,46	Kömürleşme tespit edildi.
	15,00	3,97	%24,46	Kömürleşme tespit edildi.
lyocell ham kumaş telefi (T5)	15,75	4,51	%28,63	Kömürleşme tespit edildi.
	16,00	5,06	%31,62	Kömürleşme tespit edildi.

Karbonizasyon deney sonucunda gözle ve elle yapılan muayenede karbonlaşma tespit edilmeyen numunelere deney gözlem sonucu olarak “bozunma tespit edilmedi”, “külleşme tespit edildi” olarak açıklama eklenmiştir. Bu durumda T1 ve T2 numuneleri ile çalışmalar sonlandırılmış ve karbonlaşma tespit edilen T0', T3, T4 ve T5 numunelerine ise “kömürleşme tespit edildi” şeklinde açıklama eklenmiş ve karakterizasyon testleri yapılmak üzere deney planına alınmıştır. Adosorbent üretiminden elde edilen ilk malzemeler ile adsorbsiyon miktarı optimizasyonu için 150 ml stok çözeltisinde 1 gram adsorban madde ile yapılan deney sonuçları Şekil 3.7 ve Çizelge 3.4 te verilmiştir.



Şekil 3.7 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları

Çizelge 3.4 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (adsorbent tayini)

Numune	Adsorbent miktarı (gram)	Çözelti hacmi (ml)	pH ₀	pH ₁	Sonuçlar (görsel muayene)
ticari aktif karbon (T0)	1,0	150	9,01	5,07	Renk giderimi gözlemlendi.
ticari aktif karbon (T0')	1,0	150	8,32	6,41	Renk giderimi gözlemlendi. Diğer numuneye göre daha düşük performans.
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon iplik telefi (T3)	1,0	150	2,80	2,80	Renk giderimi gözlemlendi.
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon iplik telefi (T3')	1,0	150	3,66	3,30	Renk giderimi gözlemlendi. Diğer numuneye göre daha düşük performans.
lyocell ipliği telefi (T4)	1,0	150	2,84	2,88	Renk giderimi gözlemlendi.
lyocell ipliği telefi (T4')	1,0	150	3,44	3,28	Renk giderimi gözlemlendi. Diğer numuneye göre daha düşük performans.
lyocell ham kumaş telefi (T5)	1,0	150	2,65	2,67	Renk gideriminde diğerlerine göre daha düşük performans.
lyocell ham kumaş telefi (T5')	1,0	150	4,74	4,66	Renk giderimi gözlemlendi. Diğer numuneye göre daha düşük performans.

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

Sadece kimyasal aktivasyon yapılan adsorbentlerin renk verimi kimyasal ve fiziksel aktivasyonu yapılanlara göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Özellikle T3 ve T4 numunelerinde sonuçlar diğerlerine göre daha iyi olduğundan bu sebeple pH optimizasyonu için gelecek deneylere T0, T0' T3, T3', T4, T4' ile devam edilmiştir. Bu aşamada adsorbent üretiminden elde edilen malzemeler kısıtlı olduğundan pH optimizasyonu için 50 ml stok çözeltisinde 0,3 gram adsorbent madde ile yapılan deney sonuçları Çizelge 3.5 ve renk giderim verimi Çizelge 3.6 da verilmiştir.

Çizelge 3.5 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (pH optimizasyonu)

Numune	pH ₀			pH ₁			Sonuçlar (görsel muayene)	
	pH 4	pH 7	pH 10	pH 4	pH 7	pH 10		
ticari aktif karbon (T0)	<2	7,95	8,60	<2	8,96	8,79	Renk gözlendi.	giderimi
ticari aktif karbon (T0')	6,81	6,90	9,94	7,03	6,41	8,81	Renk gideriminde diğerlerine göre daha düşük performans.	
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	<2	2,72	2,68	<2	7,43	9,50	Renk gözlendi.	giderimi
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3')	<2	3,02	3,21	<2	6,12	7,25	Renk gideriminde diğerlerine göre daha düşük performans.	
lyocell ipliği telefi (T4)	<2	3,28	4,13	<2	6,90	9,03	Renk gözlendi.	giderimi
lyocell ipliği telefi (T4')	<2	3,67	6,03	<2	6,92	9,21	Renk gideriminde diğerlerine göre daha düşük performans.	

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

Bu deney planında da bir önceki deney çalışmasında olduğu gibi sadece kimyasal aktivasyon yapılan adsorbentlerin renk verimi kimyasal ve fiziksel aktivasyonu yapılanlara

göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Numunelerin renk ölçümleri UV spektrofotometrede ölçümlenmiş ve renk verimleri Çizelge 3.6 da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Adsorbsiyon deneyi renk giderim verimi (pH optimizasyonu)

Numune	pH	Renk giderim verimi (%)	Numune	pH	Renk giderim verimi (%)
ticari aktif karbon (T0)	4	95,48	ticari aktif karbon (T0')	4	86,35
	7	67,76		7	51,50
	10	73,70		10	68,84
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	4	93,49	geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3')	4	90,06
	7	96,91		7	89,68
	10	88,15		10	78,44
lyocell ipliği telefi (T4)	4	88,03	lyocell ipliği telefi (T4')	4	76,05
	7	65,00		7	53,90
	10	42,21		10	41,11

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

ph optimizasyonu deney çalışmasında renk giderim verimlerine göre tekstil telefleri esaslı adsorbentlerin en yüksek veriminin asidik pH ortamında ulaştığı tespit edilmiştir. Bir sonraki deney planında adsorbent miktar analizi için T0, T3 ve T4 numuneleri için optimum pH 4'te 0,17 gram, 0,35 gram ve 0,70 gram adsorbent miktarı ile 50 ml stok çözeltisinde yapılan deney sonuçları Çizelge 3.7 de verilmiştir.

Çizelge 3.7 Adsorbsiyon deneyi adsorbent miktarı optimizasyonu renk giderim verimi

Numune	Adsorbent Miktarı ve Renk giderim verimi				Sonuçlar (görsel muayene)
	pH	0,17 gram	0,35 gram	0,70 gram	
ticari aktif karbon (T0)	4	%95,60	%94,20	%94,43	Renk giderimi gözlendi.
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	4	%97,86	%94,34	%93,82	Renk giderimi gözlendi.
lyocell ipliği telefi (T4)	4	%76,99	%76,65	%78,81	Renk giderimi gözlendi.

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

T3 malzemesi T0 dan yüksek verim sağlarken T4 numunesi renk giderim verimi diğerlerine göre daha düşük hesaplanmıştır. Sonraki deney planında adsorbent üretiminden elde edilen malzemenin asidik ortam koşullarında süreye bağlı adsorbsiyon kapasitesini değerlendirilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 3.8 de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (süre optimizasyonu)

Numune	pH	Adsorbent miktarı (gram)	Süre (dakika)	Renk giderim verimi (%)
geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3)	4	0,17	30	89,51
			45	91,27
			60	93,36
			90	94,53
			120	96,7
lyocell ipliği telefi (T4)	4	0,17	30	67,80
			45	68,99
			60	72,40
			90	75,43
			120	79,50

Süre optimizasyonu deney planında 120 dakika sonunda alınan renk giderim verimleri daha yüksek elde edilmiştir.

Bu aşamaya kadar geri döndürölmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefinden (T3) elde edilen adsorbentin en iyi performansa sahip iken tekrarlayan üretimlerde aynı performans değlerlerine ulaşamadığı için üretilen adsorbent malzemelere alternatif olarak lyocell iplik telefinden (T4) yeni numuneler hazırlanmış ve renk giderim verimleri Şekil 3.8 ve Çizelge 3.9 da değlendirilmiştir.



Şekil 3.8 Adsorbsiyon deneyi numune görselleri

Çizelge 3.9 Adsorbsiyon ön deneme sonuçları (adsorbent optimizasyonu)

Numune	Adsorbent miktarı (gram)	pH0	pH1	Renk giderim verimi (%)
rGO	0,16	3,48	3,92	43,64
CoFe2O4	0,16	4,76	4,59	38,70
(%100 rGO) / CoFe2O4	0,16	4,99	4,97	41,51
%100 lyocell iplik telefi	0,16	5,61	5,60	49,66
%25 lyocell iplik telefi + %75 rGO/ CoFe2O4	0,16	5,51	5,65	67,30
%50 lyocell iplik telefi + %50 rGO/CoFe2O4	0,16	5,54	5,63	59,62
%75 lyocell iplik telefi + %25 rGO/CoFe2O4	0,16	5,57	5,74	63,74
%100 X/CoFe2O4	0,16	5,50	5,76	70,20
%100 lyocell iplik telefi- modifiye ısıtılmış rGO	0,16	3,34	3,26	98,30

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

Bu aşamada adsorbent olarak ham haldeki lyocell ipliği telefi esaslı adsorbente (T4) katkılandırma işlemi yapılmıştır. Çizelge 3.9 da görüldüğü üzere en iyi renk verimi %100 lyocell iplik telefi- modifiye ısıtılmış rGO numunesinde elde edilmiştir. Bu aşamaya kadar metilen mavisinde optimum şartların tespit edilmesi için yapılan deneylere procesten alınan ham atık su ve ıslak oksidasyonu tamamlanmış atık su ile devam edilerek test edilen KOİ ve renk konvensiyonel parametre test sonuçları Çizelge 3.10 da verilmektedir.

Çizelge 3.10 Proses atık suyunda adsorbent performansları

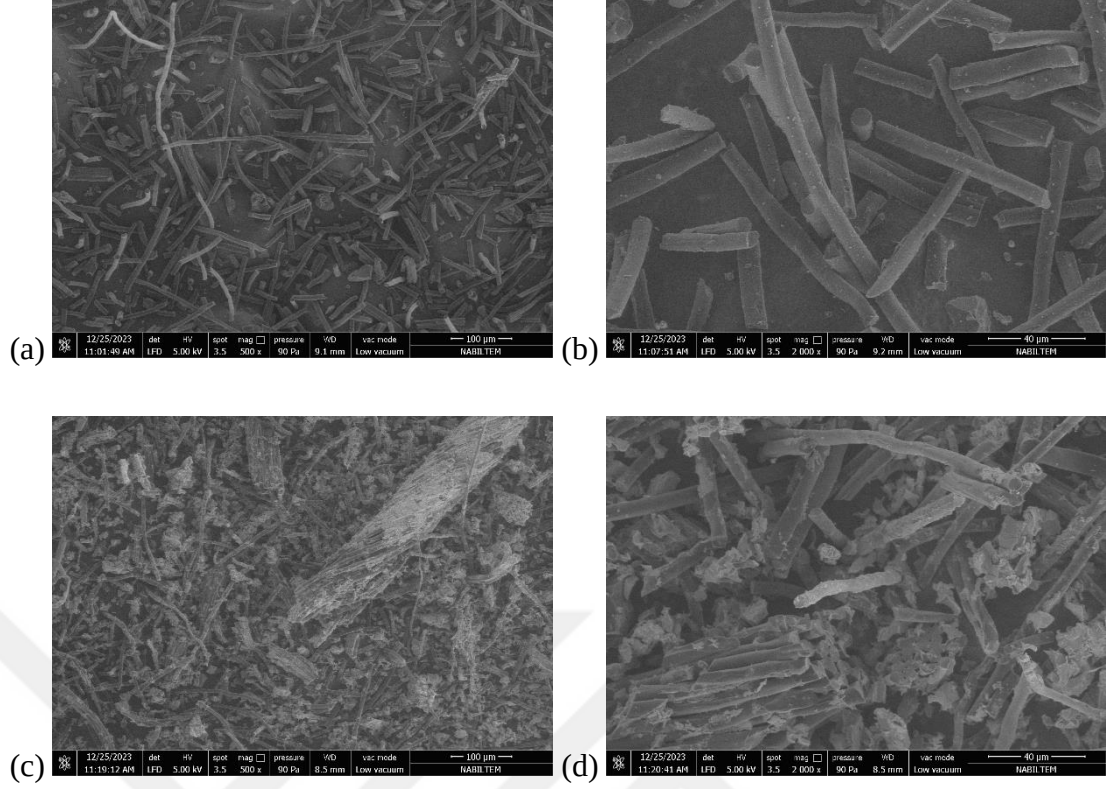
Numune	pH	KOİ (mg/l)	Renk (Pt-Co)	Renk (436 nm; 525 nm; 620 nm)
Proses ham atık su	5,60	3.340	9.760	147; 113; 93
Proses atık su (ıslak oksidasyonu tamamlanmış)	1,60	138	39	1,48; 0,866; 0,676
Adsorbsiyon sonu atık su numunesi (lyocell esaslı iplik telefinden elde edilen adsorbent ile işlem görmüş)	4,02	141	49	0,593; 0,650; 0,694
Adsorbsiyon sonu atık su numunesi (katkılandırma işlemi yapılmış nankompozit malzeme (SFNK) ile işlem görmüş)	4,16	139	74	0, 623; 0,589; 0,824

3.5 Adsorbent Karakterizasyon Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları lyocell esaslı iplik telefinden elde edilen adsorbent ve katkılandırma işlemi yapılmış nankompozit malzeme (SFNK) için tamamlanmıştır. Malzemeler sırayla A1 ve A2 olarak isimlendirilmiştir. Malzemelerin adsorpsiyon kapasitesini belirlemek ve fiziksel-kimyasal karakterizasyonunu yapmak üzere karakterizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

3.5.1 SEM Analizi

SEM görüntüleme analizi için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Laboratuvarına numuneler hazırlanarak gönderilmiştir. NABİLTEM'den gelen SEM görüntüleme analiz sonuçları Şekil 3.9 da verilmiştir.

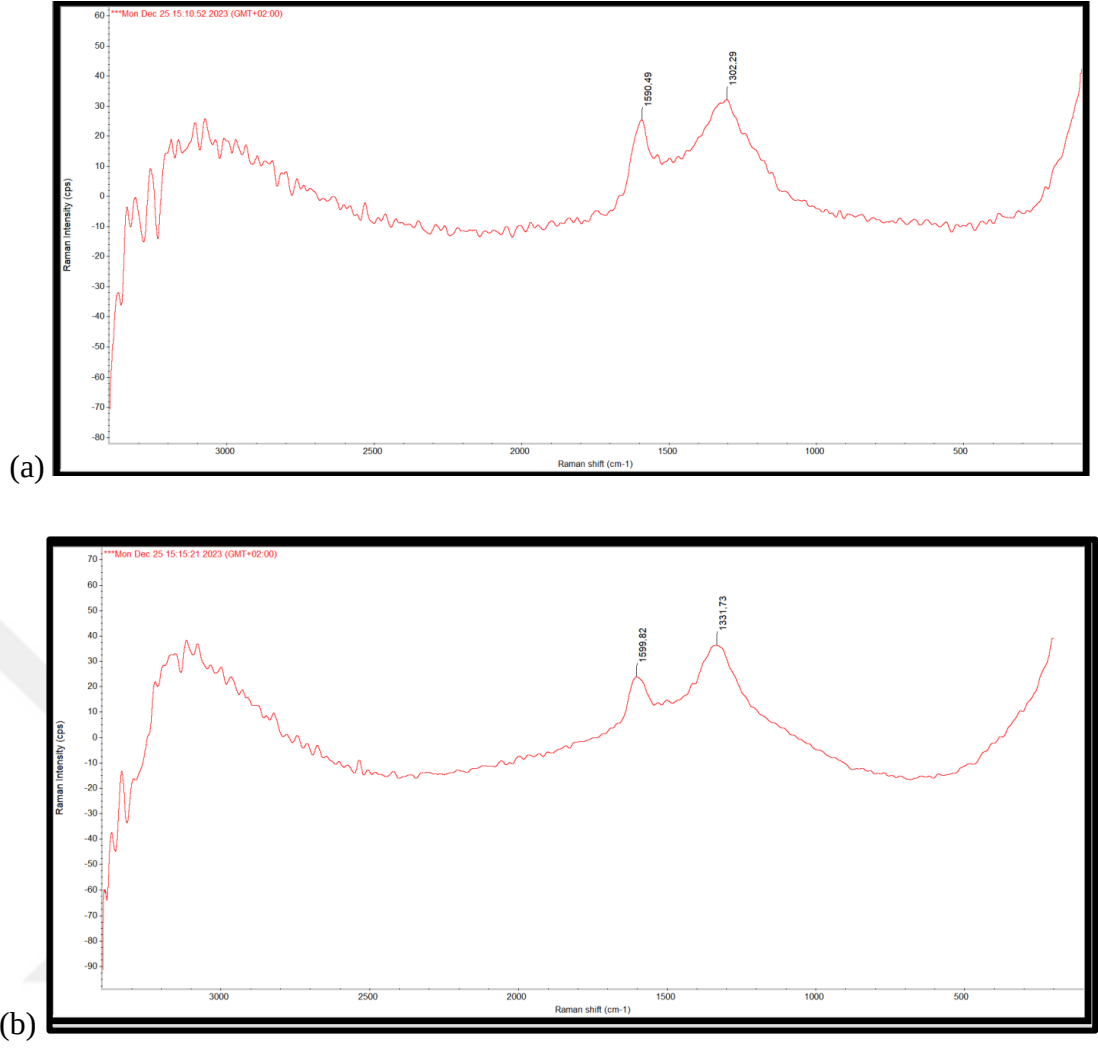


Şekil 3.9 SEM Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent, 500x büyütme; (b) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent, 2000x büyütme; (c) SFNK adsorbent, 500x büyütme; (d) SFNK adsorbent, 2000x büyütme

Bu görüntüleme sonuçları değerlendirilirken, spinel ferrit için karakteristik SEM görüntüsü sonuçları elde edilmiştir. İndirgenmiş grafen oksit tabakaları üzerinde spinel ferritlerin oluşumu sonucunda uniform boyut dağılımı ve oluşan yapıların homojen dağılımı mümkün olmayabilir. A1 adsorbent numunesinin yüzeyi, topaklanma eğilimi güçlü olan, küresel şekle yakın parçacıklar ortaya çıkarmaktadır. A2 numunesi diğer numuneden daha gözeneklidir ve parçacıklar küresel değildir (Tatarchuk, 2018).

3.5.2 RAMAN Analizi

RAMAN görüntüleme analizi için Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi NABİLTEM Laboratuvarına numuneler hazırlanarak gönderilmiştir. NABİLTEM' den gelen RAMAN görüntüleme analiz sonuçları Şekil 3.10 da verilmiştir.

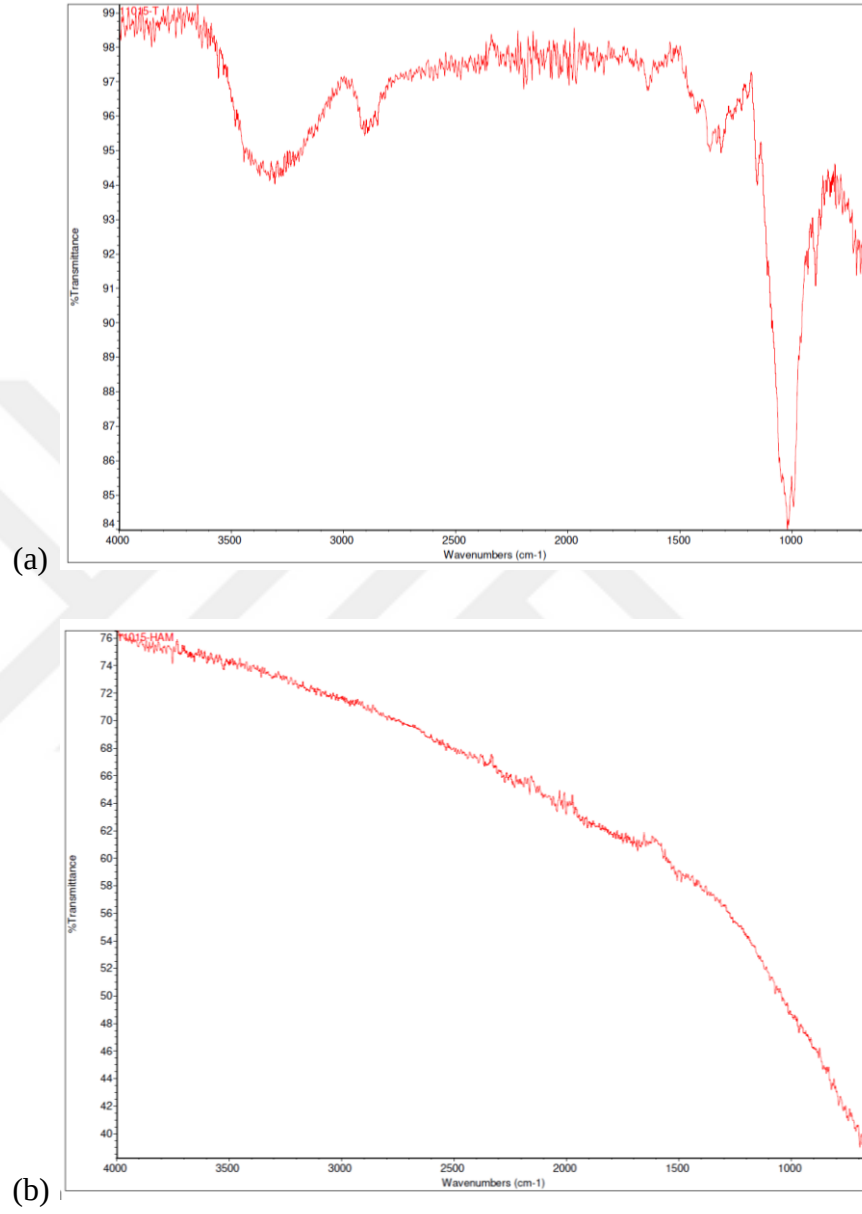


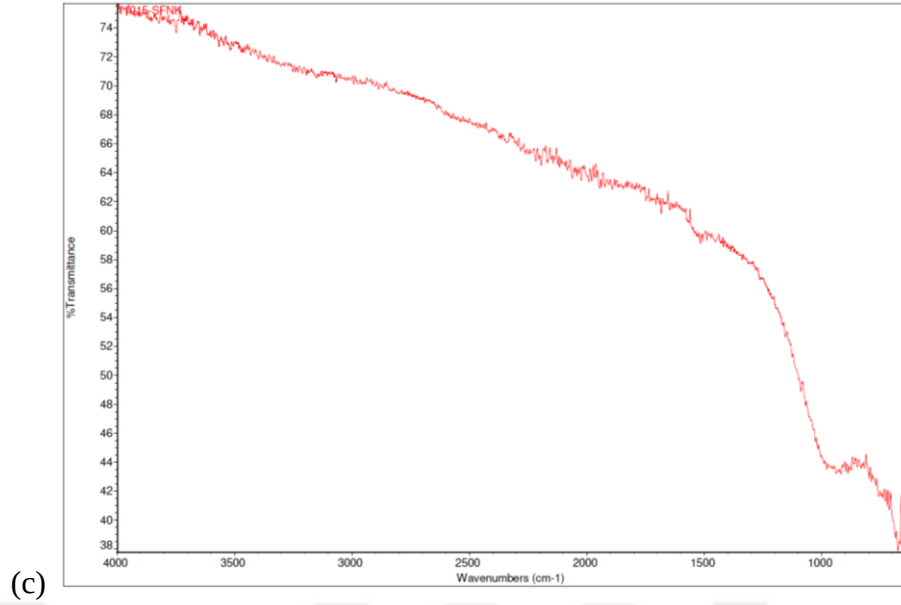
Şekil 3.10 RAMAN Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (b) SFNK adsorbent

Çalışmada üretilen her iki adsorbenti de karakterize etmek için Raman spektrometresi kullanıldı. Şekil 3.10 da gösterildiği gibi Raman spektrumu, 1360 cm^{-1} 'deki (D bandı) amorf karbona ve 1587 cm^{-1} 'deki (G bandı) grafitik karbona karşılık gelen iki tepeden oluşur; D bandının ve G bandının (ID/IG) yoğunluğu, karakter katmanının grafitleşme derecesini yansıtabilir. Genel olarak, daha düşük ID/IG değeri, daha yüksek grafitizasyon derecesi anlamına gelir ve karakter katmanı daha yoğundur, termal stabilite daha yüksek olup, daha iyi bariyer etkisine işaret etmektedir. Orijinal numunenin ID/IG değeri 0,82 iken işlem gören numunenin ID/IG değeri 0,83'e yükselmiştir. Bu nedenle, her iki numunede etkili koruma etkisi ve termal oksidasyon stabilizasyonunun da yansıttığı gibi, amorf karbonun grafitleşmiş karbona dönüşümüne katkıda bulunabileceği sonucuna varılabilir (Tan, Ren, Xiao 2021).

3.5.3 FTIR Analizi

FTIR analizi için Denge Kimya ve Tekstil Laboratuvarına numuneler hazırlanarak gönderilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 3.11 de verilmiştir.



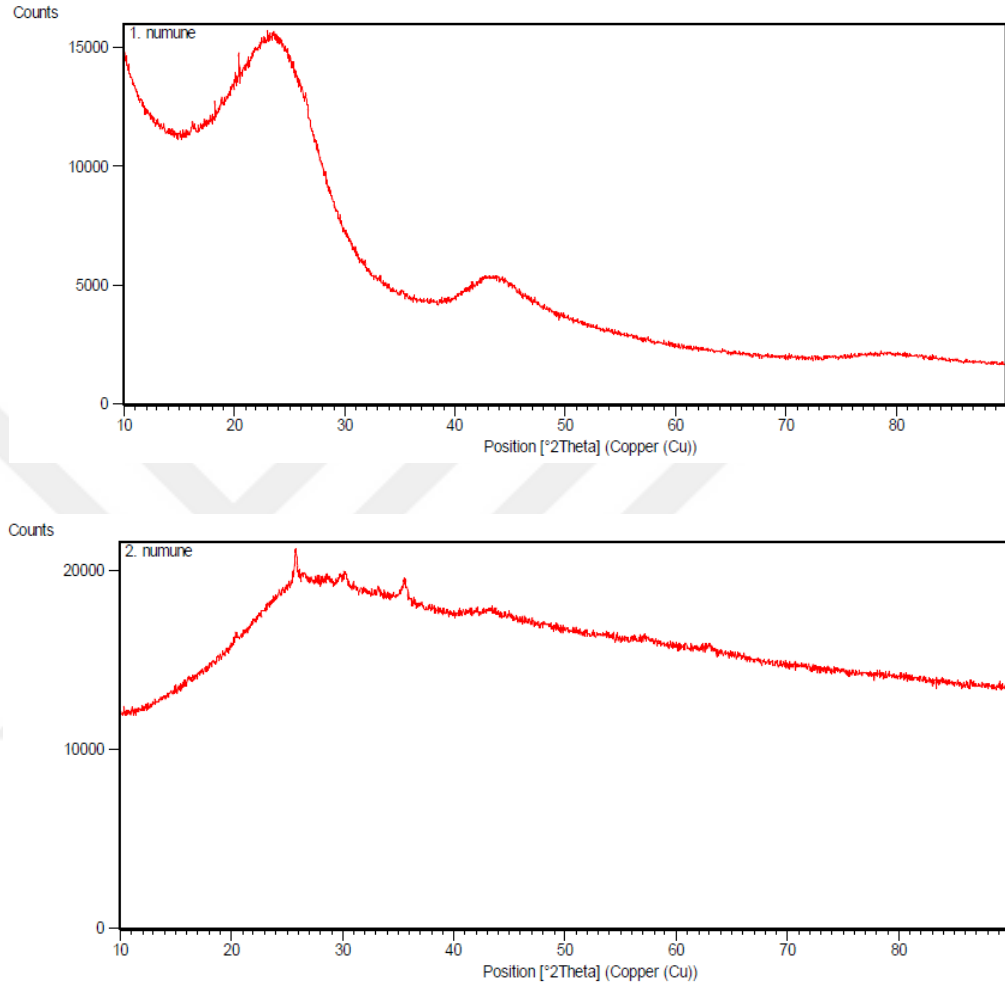


Şekil 3.11 RAMAN Analizi (a) lyocell iplik telefi (orijinal); (b) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (c) SFNK adsorbent

FTIR spektrumları $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ bant aralığında ölçülmüştür. Şekil 3.11 (a) lyocell iplik telefinin mikroyapısı FTIR kullanılarak analiz edildi. FTIR spektral analizi, lyocellin kristalli lif olduğunu ve esas olarak kristalli selüloz II ve amorf selülozdan oluştuğunu göstermektedir (Carillo, 2004). Selüloz liflerinde bulunan ana fonksiyonel gruplardan biri hidroksil grubudur. Tüm selüloz malzemeleri için 3400 cm^{-1} civarında geniş bir absorpsiyon kapasitesi sağlar. Lyocell için 1700 ile 850 arasında spesifiktir ve $2800\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki spektrumlar, kristalin selüloz II'de bulunan ve kristalin selüloz I spektrumunda gözlemlenmeyen -OH gerilmiş molekül içi hidrojen bağlarının tipik bir örneğidir (Dadashian 2005, Abou Hammad, 2019). Şekil 3.11 (b) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbentte bulunan ana fonksiyonel gruplar 1600 cm^{-1} 'de COO- gruplarının güçlü bir absorpsiyon bandı görüldü (Bediako, 2019). Şekil 3.11 (c) SFNK adsorbenti için GO spektrumunda 3172 cm^{-1} 'deki karakteristik zirve, O-H gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilir; oysa 1048 , 1235 , 1420 , 1597 ve 1734 cm^{-1} 'deki zirveler alkoksi, epoksi C-O, karboksil C-O, aromatik C=C ve C=O grupları bu bantlar önceki rapor ile mükemmel bir uyum içindedir ve grafitin GO'ya başarılı bir şekilde oksidasyonunu doğrulamaktadır (Ahmed, 2023).

3.5.4 XRD Analizi

XRD analizi için Erzurum Atatürk Üniversitesi DAYTAM Laboratuvarına numuneler hazırlanarak gönderilmiştir. XRD görüntüleme analiz sonuçları Şekil 3.12 de verilmiştir.



Şekil 3.12 XRD Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbent; (b) SFNK adsorbent

Şekil 3.11’de XRD piklerinin görüldüğü açılar ham adsorbent için spesifik; 16,40 – 19,84 – 21,68 – 22,99 – 34,99 – 44,26 değerlerine denk gelmektedir. Karakterizasyon sonuçlarına göre elde edilen adsorbentin kristal fazlarının belirginliği görülmektedir. SFNK için spesifik; 19,80 - 25,80 - 30,06 - 35,52 - 44,97 - 63,06 değerlerine denk gelmektedir.

XRD analizi sonuçlarına göre; SFNK malzemenin sentez sürecinin kabul edilebilir bir verimlilikte gerçekleştiği ve karakteristik piklerini koruduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, nanokompozit formasyonunun gerçekleşmiş olduğunu destekler niteliktedir.

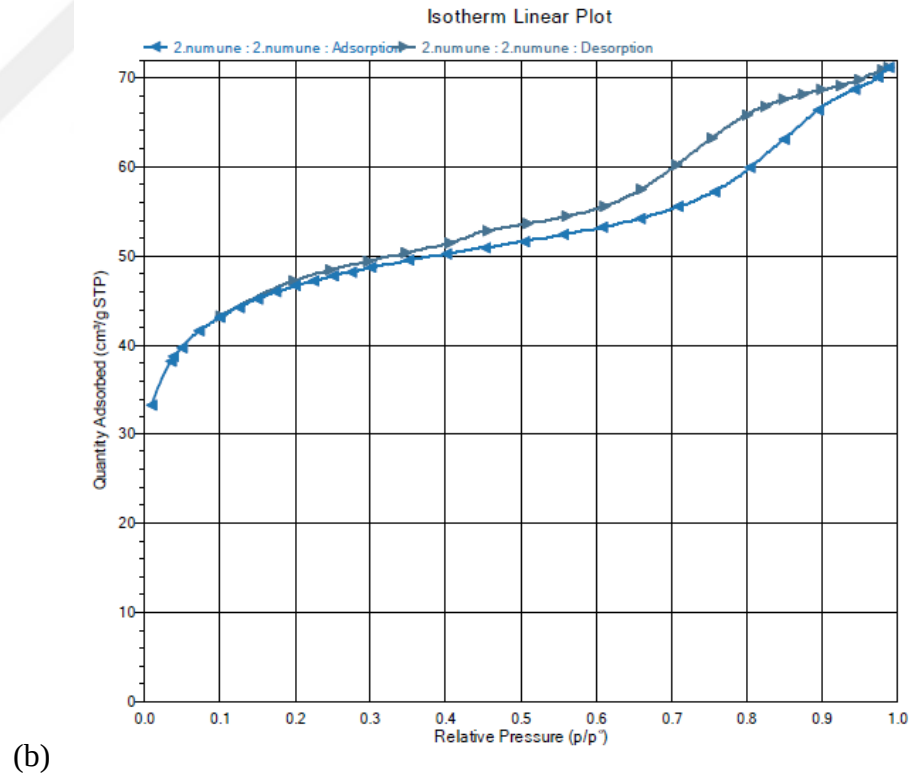
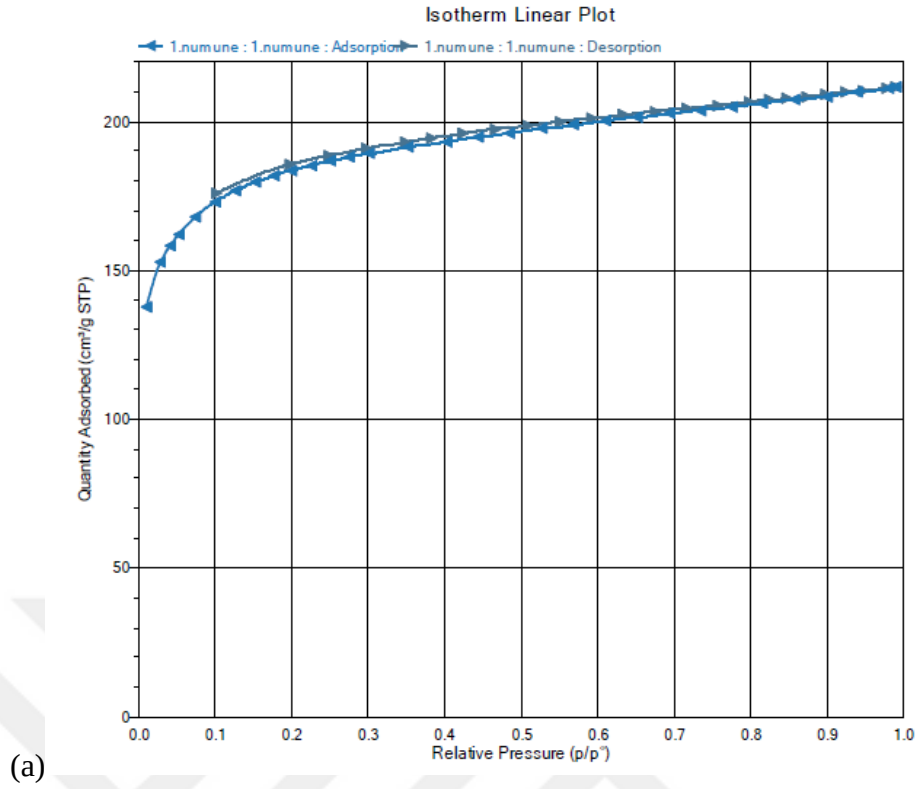
3.5.5 BET Analizi

BET analizi için Erzurum Atatürk Üniversitesi DAYTAM Laboratuvarına numuneler hazırlanarak gönderilmiştir.

BET yüzey alanı yöntemi, fiziksel adsorpsiyon izoterm verileri ile yüzey alan belirlenmesi işlemlerindeki uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Örkün, 2011). BET izoterm denklemi, mikroporoz adsorbentlere adsorpsiyon durumunda bazen uygulanabilirliğini yitirdiğinden, makropor yapıda veya poroz olmayan yüzeylerde adsorpsiyonları açıklamak için daha etkilidir. Yapısal olarak homojen olmayan aktif karbonlar için BET yöntemine ait grafikler, lineer formundan sapmalar göstermektedir. Düşük miktardaki kısmi basınçlarda yüzey heterojenliği daha etkin olup, daha yüksek kısmi basınçlarda fiziksel adsorpsiyonun etkisindeki kılcal yoğunlaşmadan kaynaklı BET adsorpsiyon izotermi çoğunlukla 0,05 - 0,35 kısmi gaz basıncı aralığında lineerdir (Bansal ve Goyal, 2005).

Çalışmada lyocell iplik telefinden üretilen adsorbent ile İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri ile lyocell bazlı adsorbenti farklı oranlarda katkılandırarak ve manyetik etki altında çözelti ortamından kolay ayrılabilmesi amacıyla spinel ferrit ile de katkılandırılmış malzeme (SFNK) BET analizi sonuçlarına göre; iplik telefinden üretilen adsorbentin 271,52 m²/g ile yüksek bir BET yüzey alanı değerine sahipken SFNK nin 72,21 m²/g ile düşük bir BET yüzey alanı değerine sahiptir.

Langmuir yüzey alanı değerleri karşılaştırıldığında bu fark daha belirgindir; iplik telefinden üretilen adsorbent için 927,12 m²/g ve SFNK için 297,79 m²/g değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.13 BET Analizi (a) lyocell iplik telefinden elde edilen adsorbente ait adosprsiyon/desorpsiyon grafiği; (b) SFNK ya ait adosprsiyon/desorpsiyon grafiği

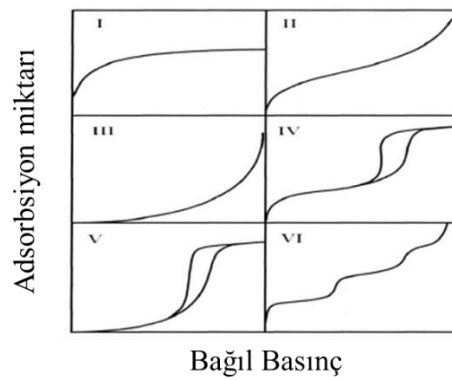
BET analizine göre gözenek boyutu dağılımları Çizelge 3.11 de verilmiştir.

Çizelge 3.11 Adsorbent gözenek büyüklüğü

Numune	Adsorbsiyon	Desorbsiyon
	Ortalama Gözenek Büyüklüğü (nm)	Ortalama Gözenek Büyüklüğü (nm)
ham adsorbent	4,76	4,77
SFNK	5,88	5,95

SFNK malzemenin ham haldeki adsorbent malzemeye göre daha yüksek gözenek büyüklüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrilerinde de görülmektedir ki, ham adsorbent malzeme ile karşılaştırıldığında, SFNK'nın zamana yayılı bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

IUPAC sınıflandırmasına göre, elde edilen ham adsorbant ve SFNK 2-50 nm arasında gözenek boyutuna sahip orta gözenekli mezoporous yapıda adsorbant özelliği göstermektedir. IUPAC'a göre ham adsorbent I numaralı gruba, SFNK malzeme ise IV numaralı gruba girmektedir. Ham adsorbentin 1 numaralı tipi sıklıkla iyi tanımlanmış silindirik benzeri gözenek kanalları veya aglomeralarından oluşan gözenekli bir yapı ile ilişkilendirilirken SFNK adsorbentinin adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi ile, gözenek boyutları ve gözenek geometrileri arasında ilişki kuvvetlidir (Al Othman, 2012).



Şekil 3.14 IUPAC sınıflandırmasına göre adsorbsiyon ve desorbsiyon izotermi (Al Othman, 2012)

3.6 Desorbsiyon Testleri

Optimum adsorpsiyon şartları belirlenen lyocell ipliği telefi esaslı adsorbent (A1) ve SFNK (A2) için asit, baz ve distile su ortamının hangisinde en iyi desorpsiyon sonucu verdiğini belirleyebilmek için öncelikle 0,1 N HCl, 0,1 N NaOH ve distile su çözeltileri kullanılarak testler yürütülmüştür. İlk çalışma 20 mg/l metilen mavisi çözeltisinde tamamlanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.14 te verilmiştir. Metilen mavisi için renk değerleri Çizelge 3.13 te verilmiştir.

Çizelge 3.12 Metilen mavisi çözeltisi (20 mg/l) renk değerleri

Numune	Renk (Pt-Co)	Renk (436 nm; 525 nm; 620 nm)
Metilen çözeltisi	mavisi 99	0,036; 0,188; 2,103

Çizelge 3.13 Desorbsiyon ortamı test sonuçları (metilen mavisi çözeltisi)

Adsorbent Malzeme	Desorbsiyon çözeltisi	pH		Renk (Pt-Co)	Renk (436 nm; 525 nm; 620 nm)
		pH ₀	pH ₁		
A1	0,1 N HCL	1,55	1,50	76	0,970; 1,05; 1,17
	0,1 N NaOH	12,60	12,69	142	1,88; 1,93; 2,00
	distile su	10,61	10,89	304	4,04; 4,11; 4,18
A2	0,1 N HCL	1,67	1,74	52	0,703; 0,764; 0,843
	0,1 N NaOH	12,49	12,59	93	1,28; 1,16; 1,20
	distile su	10,05	10,60	88	1,16; 1,13; 1,18

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

A1 ve A2 malzemelerin HCL ortamındaki desorbsiyonu diğer ortamlara göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

Sonraki deney çalışması ıslak oksidasyonu tamamlanmış mikroplastik içeren atık su numunesinde gerçekleştirilmiş Çizelge 3.15 ve 3.16 da sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 3.14 Birinci desorbsiyon ortamı renk ölçümü test sonuçları (proses atık suyu çözeltisi)

Adsorbent Malzeme	Desorbsiyon çözeltisi	pH		KOİ (mg/l)	Renk (Pt-Co)	Renk (436 nm; 525 nm; 620 nm)
		pH ₀	pH ₁			
A1	0,1 N HCL	1,55	1,50	133	104	2,08; 1,06; 0,94
	0,1 N NaOH	12,60	12,69	132	114	2,20; 1,17; 1,02
	distile su	10,61	10,89	124	97	1,99; 0,92; 0,78
A2	0,1 N HCL	1,67	1,74	136	127	2,41; 1,30; 1,19
	0,1 N NaOH	12,49	12,59	125	130	2,52; 1,27; 0,98
	distile su	10,05	10,60	129	115	2,23; 1,14; 0,99

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

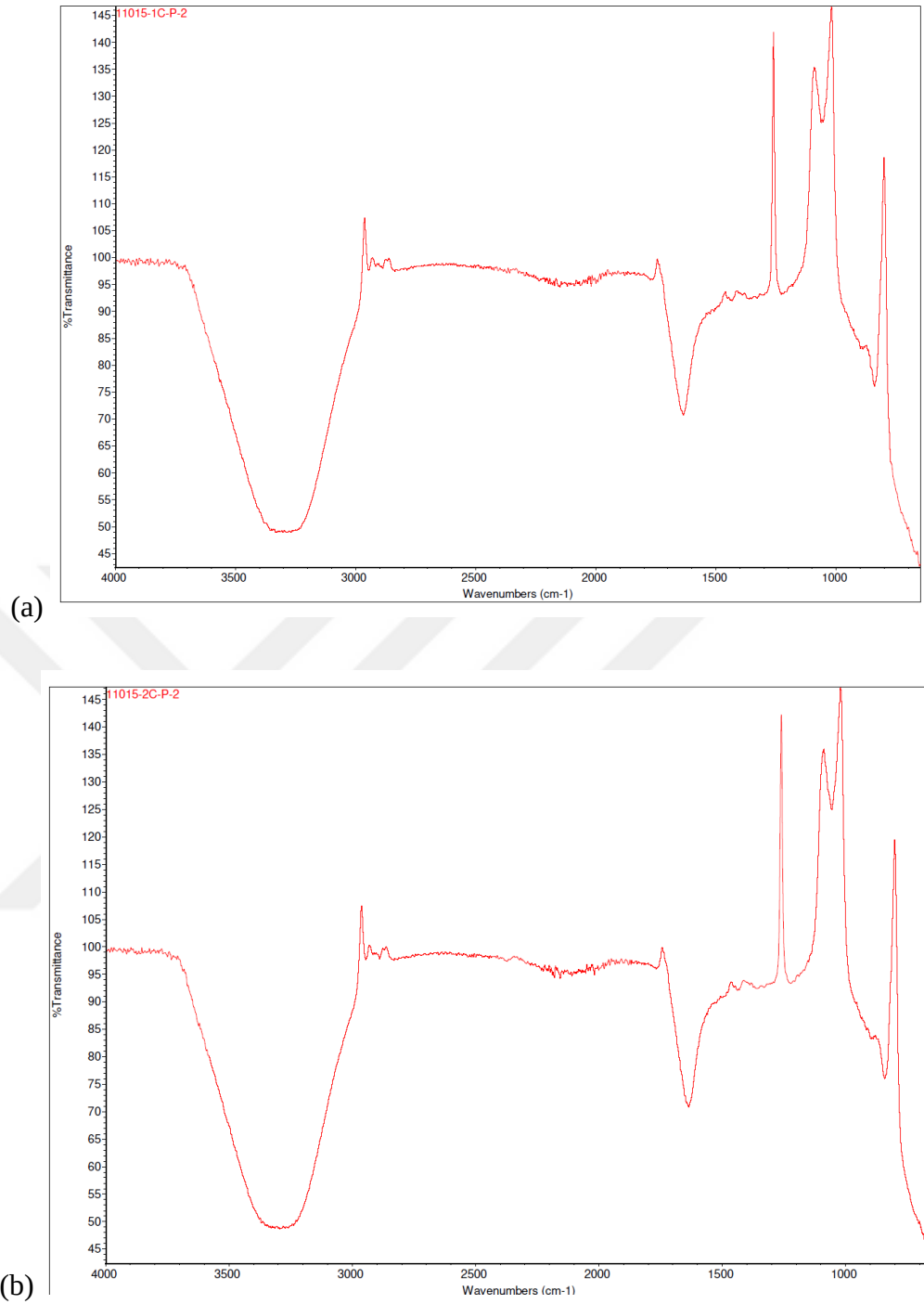
Çizelge 3.15 İkinci desorbsiyon ortamı renk ölçümü test sonuçları (proses atık suyu çözeltisi)

Adsorbent Malzeme	Desorbsiyon çözeltisi	pH		KOİ (mg/l)	Renk (Pt-Co)	Renk (436 nm; 525 nm; 620 nm)
		pH ₀	pH ₁			
A1	0,1 N HCL	1,51	1,53	130	100	1,98; 1,00; 0,82
	0,1 N NaOH	12,59	12,65	131	114	2,05; 1,03; 0,99
	distile su	10,60	10,79	121	95	1,09; 0,83; 0,57
A2	0,1 N HCL	1,65	1,76	136	125	2,31; 1,15; 1,01
	0,1 N NaOH	12,49	12,51	124	129	2,41 1,07; 0,89
	distile su	10,05	10,59	127	114	1,01; 1,04; 0,68

0: başlangıç; 1: 2 saat sonunda

A1 ve A2 malzemelerin gerçek atık su ortamındaki birinci ve ikinci desorbsiyon sonrasında desorbsiyon renk verimleri distile su ortamında daha verimli elde edilmiştir.

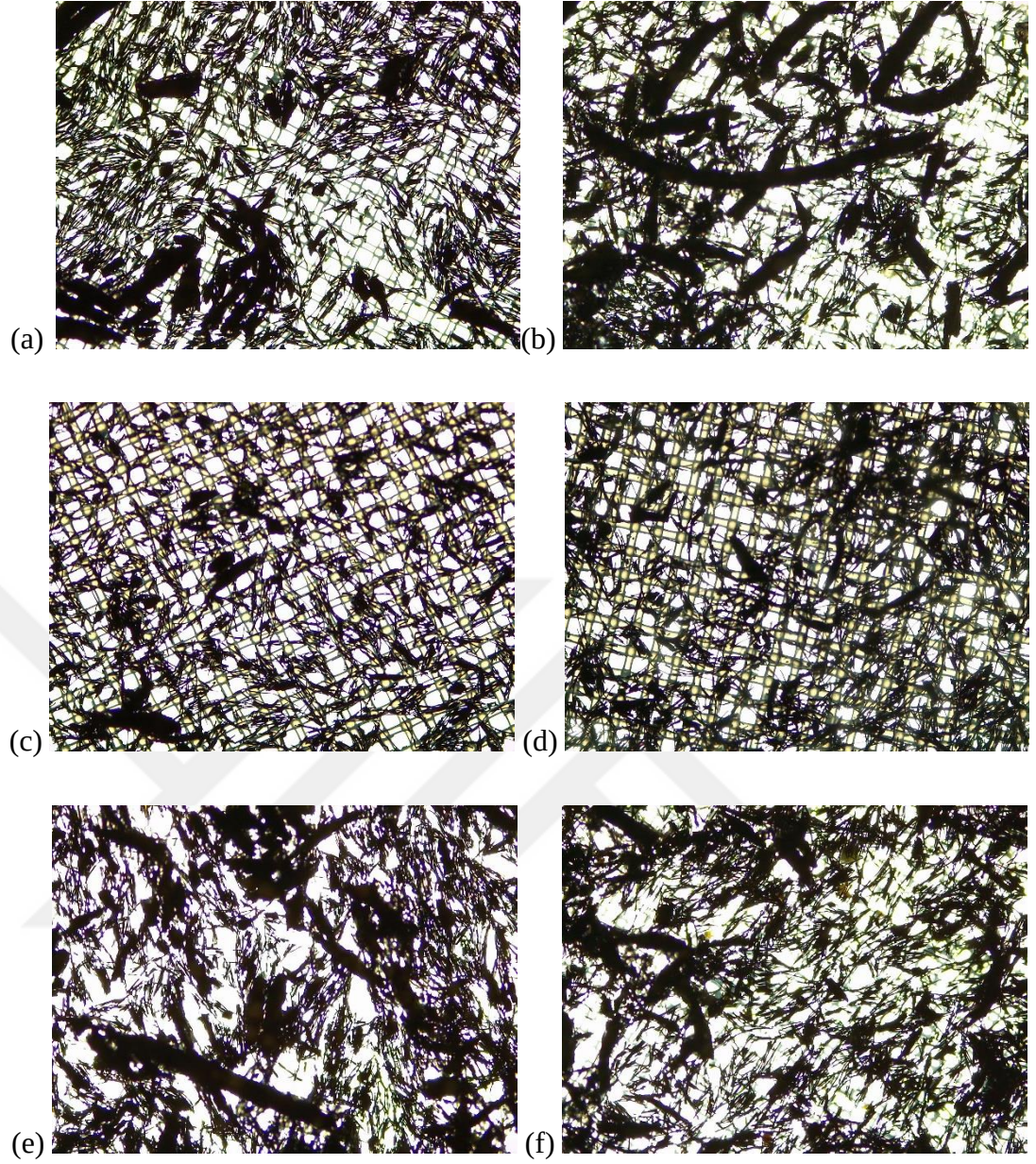
İkinci desorbsiyon sonrasında sistile su ortamı FTIR analizleri ise Şekil 3.15 te verilmiştir.



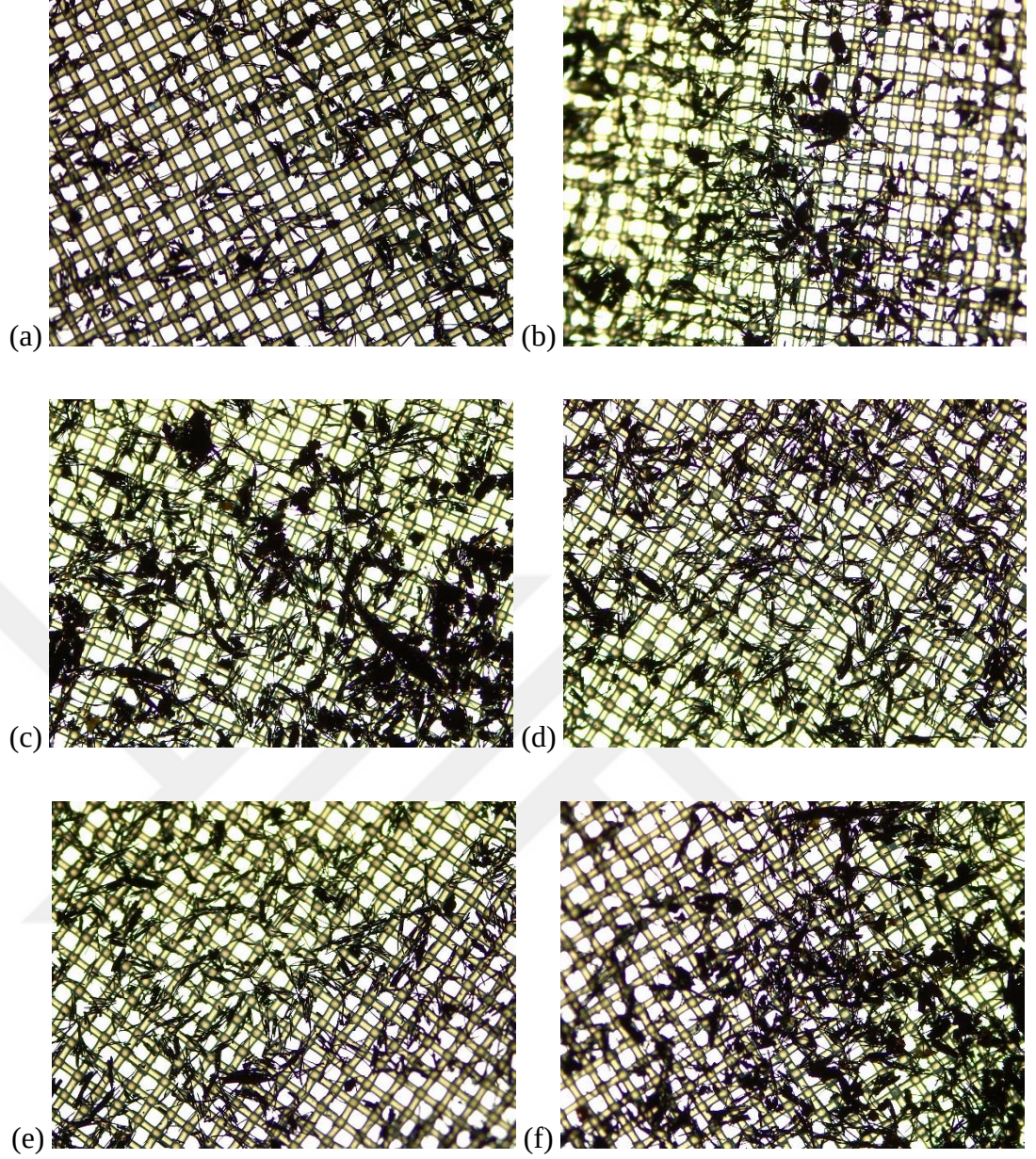
Şekil 3.15 FTIR analizi (a: A1 malzemesi desorbsiyon çözeltisi; b: A1 malzemesi desorbsiyon çözeltisi)

İkinci ve son desorbsiyon sonunda incelenen atık suların FTIR analizine göre PES ve R-PET elyafı için spesifik ester bağlarını gösteren 1710-1725 cm⁻¹ pikler atıksuda mikroplastik varlığını kanıtlar niteliktedir (Jiang, Guo, Zhang 2019).

Desorbsiyon sonu 4x büyütme altında incelenen adsorbentlerin mikroskobik analizler Şekil 3.16 ve 3.17 de verilmiştir.



Şekil 3.16 A1 adsorbenti mikroskobik analizi (a: HCl ile birinci desorbsiyon sonu; b: HCl ile ikinci desorbsiyon sonu; c: NaOH ile birinci desorbsiyon sonu; d: NaOH ile ikinci desorbsiyon sonu; e: distile su ile birinci desorbsiyon sonu; f: distile su ile birinci desorbsiyon sonu)



Şekil 3.17 A2 adsorbenti mikroskobik analizi (a: HCl ile birinci desorbsiyon sonu; b: HCl ile ikinci desorbsiyon sonu; c: NaOH ile birinci desorbsiyon sonu; d: NaOH ile ikinci desorbsiyon sonu; e: distile su ile birinci desorbsiyon sonu; f: distile su ile birinci desorbsiyon sonu)

Her iki adsorbentin mikroskobik analizleri incelendiğinde A2 de A1 e göre daha düzenli yapı görülmektedir. Görüntüler detaylı incelendiğinde mikroplastik yapıların adsorbentler tarafından tutulduğu tespit edilebilmektedir.

Islak oksidasyonu tamamlanmış proses atık su numunesi mikroplastik giderimi açısından ikinci desorbsiyon sonunda mikroskop altında tekrar incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.16 Mikroskopik analiz sonuçları (4x büyütme)

Numune	1 Litre Tespit Mikroplastik Büyükülüğü (mikrometre)	Hacimde Edilen	MP Sayısı (fiber form)	MP Sayısı (fragment form)	Proseste Edilen Mikroplastik Büyükülüğü (mikrometre)	Tespit	MP Sayısı (fiber form)	MP Sayısı (fragment form)
A1 numunesi ile işlem görmüş kompozit atık su	<1		0	0	<1		0	0
	1-99		0	0	1-99		0	0
	100-499		0	0	100-499		0	0
	500-999		8	8	500-999		22.053	22.053
	>1000		16	8	>1000		44.107	22.053
A2 numunesi ile işlem görmüş kompozit atık su	<1		0	0	<1		0	0
	1-99		0	0	1-99		0	0
	100-499		0	0	100-499		0	0
	500-999		8	0	500-999		22.053	0
	>1000		8	8	>1000		22.053	22.053

A1 numunesi ile işlem görmüş proses atık suyunda tespit edilen toplam mikroplastik sayısı fiber formda 66.160 adet, fragment formda ise 44.106 adet; A2 numunesi ile işlem görmüş proses atık suyunda tespit edilen toplam mikroplastik sayısı fiber formda 44.106 adet, fragment formda ise 22.053 adet olarak hesaplanmıştır. Çalışmada üretilen adsorbentler için mikroplastik giderim verimi Çizelge 3.17 de hesaplanmıştır.

Çizelge 3.17 Mikroplastik giderim verimi (%)

Numune	1 Litre Tespit Mikroplastik Büyükülüğü (mikrometre)	Hacimde Edilen	MP (fiber form) giderim verimi (%)	MP (fragment form) giderim verimi (%)
A1 numunesi ile işlem görmüş kompozit atık su	<1		-	-
	1-99		-	-
	100-499		%100	%100
	500-999		%66,6	%75
	>1000		%0	%0

Çizelge 3.17 Mikroplastik giderim verimi (%) (devam)

Numune	1 Litre Tespit Mikroplastik Büyükülüğü (mikrometre)	Hacimde Edilen	MP (fiber form) giderim verimi (%)	MP (fragment form) giderim verimi (%)
A2 numunesi ile işlem görmüş kompozit atık su	<1		-	-
	1-99		-	-
	100-499		%100	%100
	500-999		%66,6	%100
	>1000		%66,6	%66,6

Elde edilen sonuçlarda en yüksek verimin özellikle 100-499 mikrometre aralığındaki MP ler için %100 e en düşük verimin >1000 mikrometre üzeri MP ler için A1 adsorbandında %0; A2 adsorbandında %66,6 ya ulaştığı görülmektedir.

4. DEĞERLENDİRMELER

4.1 Kumaş

Çalışmada kullanılan kumaşın ham madde analizi için hem PES hem de R-PET elyafı Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) spektrumları analizi sonucu benzer pikleri vermiştir. PET ester karbonillerin karakteristik absorpsiyonu $1710-1725\text{ cm}^{-1}$ civarında olduğu tespit edilmiştir.

Mikroplastik salınımının tespit edileceği tekstil materyali %100 R-PET esaslı dokuma kumaş seçilmiştir. Kumaşın atkı ve çözgü iplikleri filament lif çekim yöntemine göre elde edilmesine rağmen atık suya karışan mikroplastik kirliliği tespit edilmiştir.

4.2 Proses

Kumaşın işlem gördüğü proses şartları üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Mevcut proses şartlarında 135°C ve yaklaşık 3 saat, 3 kez doldur boşaltmalı yıkama sonucunda kompozit alınan numunelerde testler yürütülmüştür.

4.3 Atık Su

Çalışmada incelenen proses atık suyunda fiber formda mikroplastığa rastlanmıştır. Mikroskopik incelemeler, organik içerik uzaklaştırıldıktan sonra ıslak oksidasyon prosesi sonrasında süzülen filtre kağıtlarının incelenmesi ile gerçekleştirilmiştir.

4.4 Adsorbsiyon

Çalışmanın adsorbsiyon prosesindeki analizlerin gerçekleştirilmesi için adsorbent üretiminde tekstil işletmesi selülozik esaslı telefleri kullanılmıştır. Seçilen tekstil materyalleri farklı deney koşullarında karbonlaştırılmıştır ve adsorbsiyon için en uygun selülozik esaslı aktif karbon üretilmiştir. Üretilen aktif karbon, İndirgenmiş Grafen Oksit (rGO) nanopartikülleri ile lyocell bazlı adsorbenti farklı oranlarda katkılandırarak ve manyetik etki altında çözelti ortamından kolay ayrılabilmesi amacıyla spinel ferrit ile de katkılandırılmış malzeme (SFNK) elde edilmiştir.

Adsorbent verim sonucu değerlendirildiğinde karbonizasyon proses parametrelerinin (sıcaklık, süre, N_2 gazı akış hızı), seçilen ham maddelerin etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Katı madde verimi hesabına göre en iyi sonuç lyocell esaslı iplik telefinden elde edilen adsorbentte hesaplanmıştır.

Tekstil materyallerinden üretilen farklı adsorbentlerin metilen mavisi boyar madde çözeltisi için en az ticari aktif karbon kadar renk giderim verimine sahip olduğu test edilmiştir.

Adsorbent eldesinde uygulanan fiziksel CO₂ aktivasyonunun metilen mavisi boyar madde ile renk giderim çalışmalarında adsorbsiyonu düşürücü etkisi gözlemlenmiştir.

Tekstil materyallerinin geri kazanım yolu ile işletme üretim atıklarından elde edilen aktif karbon çözeltilerinin pH larının asidik olması, tekstil atıklarından aktif karbon eldesinde kimyasal aktivasyon ön işlemden fosforik asit kalıntısı olduğu yönünde fikir vermektedir.

Adsorbsiyon pH optimizasyonu deneylerinde optimum pH seviyesinin 4 olduğu elde edilmiştir.

Adsorban miktarı optimizasyonu test sonuçları incelendiğinde en düşük adsorban konsantrasyonunda en yüksek renk giderim veriminin sırasıyla şu malzemelerde elde edilmiştir; geri dönüştürülmüş pamuk/viskon karışımı iplik telefi (T3); ticari aktif karbon (T0); lyocell ipliği telefi (T4).

Adsorbsiyon süresi için optimum süre çalışmalarında deney süresi 2 saat olarak belirlenmiştir.

Adsorbsiyon prosesine ait optimum proses koşulları belirlendikten sonra adsorbent üretimi ile elde edilen malzemeler FT-IR sonuçları esas alındığında ilk üretilen malzemeye göre farklı olduğu için optimizasyon deneylerinde elde edilen verim değerlerine ulaşamamıştır. 1 yıl boyunca üretilen adsorbentlerin sahip olduğu düşük performans sebebiyle sonraki deneyler için lyocell ipliği telefi (T4) esaslı aktif karbon kullanılmıştır. Ham haldeki %100 lyocell ipliği telefi esaslı adsorbent ve katkılendirme işlemi yapılmış aktif karbon sonuçları >%70 in üzerinde verim ile sonuçlandığı için bu malzemeler odağında mikropplastik giderimi çalışılmıştır.

4.5 Desorbsiyon

Metilen mavisi çözeltisi ile yapılan ilk deneyde, her iki adsorbent için renk veriminin 0,1 N HCL ile sağlandığı tespit edilmiştir. Aynı deney ıslak oksidasyonu tamamlanmış

mikroplastik içeren atık su numunesinde gerçekleştirildiğinde ise A1 ve A2 adsorban malzemeleri için distile su ile sağlanmıştır.

Desorbsiyon işleminde ikinci aşamada da sonuçların umut vadeditici olduğu görölmektedir. Çalışmada üretilen malzemenin sonuna gelindiğinden, desorbsiyon işlemi üçüncü adımda sonlandırılmıştır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tekstil dokuma kumaş üretiminde artan R-PET ham madde kullanımının mikropplastik salınımı üzerinde etkisi olduğu tespit edilmiştir. Daha detaylı ve karşılaştırmalı analiz için farklı kumaş harmanına sahip proses atık sularının değerlendirilmesi gereklidir.

Geri dönüştürülmüş içerikli selülozik esaslı tekstil materyallerinin değişken ham madde özelliklerinden kaynaklı adsorbent malzeme üretiminin tekrarlanabilirliği düşük olduğu tespit edilmiştir. Proses parametrelerin değiştirilmesi, kullanılan selülozik esaslı tekstil materyallerinin çeşitlendirilmesi, izlenebilir ham madde tedariki veya daha yüksek performansla sahip adsorbentler ile harmanlanarak laboratuvar çalışmaları çoğaltılması önerilir.

Tekstil endüstrisi atık sularının arıtılmasında adsorbent malzemeler olumlu sonuçlar verdiği birçok araştırma ile tespit edilmiştir. Bu çalışmada da tekstil materyallerinden üretilen adsorbent de tekstil endüstrisi üretiminden kaynaklanan mikropplastiklerin gideriminde etkili olacağı öngörülmektedir. Tekstil endüstrisinde proses koşulları tekstil ürününün kullanım yerine, renk, tuşe vb. fiziksel özelliklerine göre değişkenlik gösterdiği için farklı proses koşullarında deney planının genişletilerek çalışılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Abou Hammad, A. B., Abd El-Aziz, M. E., Hasanin, M. S., & Kamel, S. (2019). A novel electromagnetic biodegradable nanocomposite based on cellulose, polyaniline, and cobalt ferrite nanoparticles. *Carbohydrate polymers*, 216, 54-62.
- Ahmed, M. A., Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2023). Synthesis, characterization and application of chitosan/graphene oxide/copper ferrite nanocomposite for the adsorptive removal of anionic and cationic dyes from wastewater. *RSC advances*, 13(8), 5337-5352.
- Akyıldız, S. H. (2023). *Tekstil Endüstrisinden Kaynaklanan Mikroplastiklerin Tespiti ve Analizi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yenilikçi Teknik Tekstiller Programı, İstanbul.
- Altıntaş, A. D. (2022). *Polyester Dokuma Kumaşların Akustik Özellikleri ile Gözeneklilik ve Geçirgenlik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- ALothman, Z.A. A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials* (2012). 5, 2874-2902. <https://doi.org/10.3390/ma5122874>
- Azfarniam, L., Norouzi, M. (2016). Multifunctional polyester fabric using a multicomponent treatment. *Fibers Polymer* 17, 298–304ss. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-5579-8>
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). Activated carbon adsorption. *CRC press*.
- Bediako, J. K., Wei, W., Yun, Y. S. (2016). Conversion of waste textile cellulose fibers into heavy metal adsorbents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 43, 61-68.
- Bediako, J. K., Wei, W., & Yun, Y. S. (2016). Low-cost renewable adsorbent developed from waste textile fabric and its application to heavy metal adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 250-258.
- Belzagui, F., Crespi, M., Álvarez, A., Gutiérrez-Bouzán, C., Vilaseca, M. (2019). Microplastics' emissions: Microfibers' detachment from textile garments. *Environmental Pollution*, 248, 1028-1035.
- Carrillo, F., Colom, X., Sunol, J. J., & Saurina, J. (2004). Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres. *European Polymer Journal*, 40(9), 2229-2234
- Celik, S., O. (2021). Microplastic Release from Domestic Washing. *European Journal of Science and Technology*, (25), 790 795.
- Çevik, C., Kıdeys, A.E., Tavşanoğlu, Ü.N., Başaran Kankılıç G., Gündoğdu, S. A review of plastic pollution in aquatic ecosystems of Turkey. *Environmental Science and Pollution* 29, 26230–26249 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17648-3>
- Çiftçi, B. (2023). *Farklı Kalitelerdeki Polyester Kumaşların Susuz Boyanması* (Yüksek Lisans Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

- Dadashian, F., Yaghoobi, Z., & Wilding, M. A. (2005). Thermal behaviour of lyocell fibres. *Polymer testing*, 24(8), 969-977.
- Fontana, G. D., Mossotti, R. and Montarsolo, A. (2020). Assessment of microplastics release from polyester fabrics: The impact of different washing conditions. *Environmental Pollution*, 264, 113960.
- Demiryürek, O. (2004). *Sentetik Lif  retiminde Kullanılan Ekstrüderler ve Ekstrüder-Pompa Sisteminin Tasarım Esasları* (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Erzurum Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi, X-Işını Kırımı (XRD). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://daytam.atauni.edu.tr/altyapi/malzeme-sentezi-ve-karakterizasyonu/ileri-spektroskopi-laboratuvari/x-isini-kirimi-xrd/>
- Erzurum Atatürk Üniversitesi, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi, FT-IR Spektrofotometresi (FT-IR). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://daytam.atauni.edu.tr/altyapi/malzeme-sentezi-ve-karakterizasyonu/ileri-spektroskopi-laboratuvari/ftir-spektrofotometresi/>
- European Chemical Agency (ECHA). Microplastics. Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics>
- European Comission. (2018). A European strategy for plastics in a circular economy. Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en
- European Comission. (2019). The European Green Deal. Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF
- European Commission. (2022) Synopsis report on the consultation on the EU strategy for sustainable and circular textiles. Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://circabc.europa.eu/ui/group/6e9b7f79-da96-4a53-956f-e8f62c9d7fed/library/6bcea47e-564e-4f01-9935-2f44b2071dcc/details>
- Fortana, G. D., Mosotti, R., Montarsolo, A. (2020). Assessment of microplastics release from polyester fabrics: the impact of different washing conditions. *Environmental Pollution*, 264.
- Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E. Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities, *Science of the Total Environment*, Volume 586, Pages 127-141, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>.
- Jiang, T., Liang, Y. D., He, Y. J., Wang, Q. (2015). Activated carbon/NiFe₂O₄ magnetic composite: A magnetic adsorbent for the adsorption of methyl orange. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 1740-1751.
- Jiang Z, Guo Z, Zhang Z, et al. (2019). Preparation and properties of bottle-recycled polyethylene terephthalate (PET) filaments. *Textile Research Journal*. 2019;89(7):1207-1214. doi:10.1177/0040517518767146

- Kanlı, İ. B., Kurt, Y. (2019). Türkiye'nin Çevre Politikaları Kapsamında Mikroplastik Kirlilik Üzerine Bir Değerlendirme An Evaluation of Microplastic Pollution Within The Scope of Environmental Policies of Turkey.
- Karaçam, S. (2022). *Marmara Denizi İstanbul Kıyılarında Mikroplastik Kirliliğinin Tespiti ve Karakterizasyonu* (Yüksel Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Karadağ, S. (2022). *Geri Dönüşüm Polyester İpliklerden Elde Edilen Dokuma Kumaşların Performans Özelliklerinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Kurt, B.A. (2021). *Tekstil Temiz Üretiminde Sürdürülebilirliğin Araştırılması ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Aktif Karbon Üretimi* (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Ana Bilim Dalı, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Programı, İstanbul.
- Leica DM750 microscopes (2023). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: https://downloads.leica-microsystems.com/DM750/Brochure%20or%20Flyer/Leica_DM500_DM750_brochure_EN.pdf
- Masura, J., Baker, J., Foster, G., Arthur, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. Erişim adresi: https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf
- Örkün, Y. (2011). *Fındık Kabuğundan Fiziksel ve Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Sait, T.L.S., Sørensen, L., Kubowicz, S., Vike-Jonas, K., Gonzalez, S.V., Asimakopoulos, A.G., Booth, A.M. Microplastic fibres from synthetic textiles: Environmental degradation and additive chemical content, *Environmental Pollution*, Volume 268, Part B, 2021, 115745, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115745>.
- Sarıgül, B. (2022). *Modifiye Edilmiş Cüruf Atıkların Adsorbsiyon Verimliliğinin Tekstil Atıksuları Örneğinde Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ.
- Şeker, A.F. (2007). *Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Çeşitli Boyar Maddelerin Aktif Karbon ile Gideriminin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli.
- Tan, W., Ren, Y., Xiao, M., Guo, Y., Liu, Y., Zhang, J., Liu, X. (2021). Enhancing the flame retardancy of lyocell fabric finished with an efficient, halogen-free flame retardant. *RSC Advances*, 11(55), 34926-34937.
- Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y., Xie, B. (2021). Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 406, 126804.

- Tatarchuk T, Liaskovska M, Kotsyubynsky V and Bououdina M. (2018). Green synthesis of cobalt ferrite nanoparticles using *Cydonia oblonga* extract: structural and mössbauer studies. *Mol Cryst Liq Cryst* 672: 54–66.
- Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı NABİLTEM. Dispersif Raman Spektroskopisi. Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://merkezlab.nku.edu.tr/DispersifRamanspektroskopisi/0/s/5472/9243>
- Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı NABİLTEM. Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: [https://merkezlab.nku.edu.tr/Taramal%C4%B1ElektronMikroskobu\(SEM\)/0/s/5472/5923](https://merkezlab.nku.edu.tr/Taramal%C4%B1ElektronMikroskobu(SEM)/0/s/5472/5923)
- Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı NABİLTEM. Toplam Organik Karbon (TOC). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: [http://merkezlab.nku.edu.tr/TOC\(ToplamOrganikKarbon\)/0/s/5472/5933](http://merkezlab.nku.edu.tr/TOC(ToplamOrganikKarbon)/0/s/5472/5933)
- Ticaret Bakanlığı, Yeşil Mutabakat Genel Bilgi (2024). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/genel-bilgi>
- Ticaret Bakanlığı, Avrupa Yeşil Mutabakatı (2024). Erişim tarihi: 11 Ocak 2024. Erişim adresi: <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/avrupa-yesil-mutabakati>
- Textile Exchange. (2022). *Material markets report*. Erişim adresi https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf
- Textile Exchange. (2023). *Material markets report*. Erişim adresi <https://textileexchange.org/app/uploads/2023/11/Materials-Market-Report-2023.pdf>
- Tutoğlu, N. (2019). *Sucul Ortamdaki Mikroplastiklerin İnsan Sağlığına Etkisi ve Arıtma Yöntemlerinin Araştırılması* (Uzmanlık Tezi), T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Yang, L., Qiao, F., Lei, K., Li, H., Kang, Y., Cui, S., An, L. (2019). Microfiber release from different fabrics during washing. *Environmental Pollution*, 249, 136-143.
- Zhang, L., Yang, K. (2020). Facilely magnetized CuZnFe₂O₄-activated carbon composite as an efficient recyclable adsorbent of cationic dyes. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 65(11), 5532-5544.