T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL BOYAMA ATIK SUYU GERİ KAZANIM TESİSİNDE KİRLETİCİLERİN MOLEKÜLER AĞIRLIK DAĞILIMLARININ BELİRLENMESİ

Gülin Biçe YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL BOYAMA ATIK SUYU GERİ KAZANIM TESİSİNDE KİRLETİCİLERİN MOLEKÜLER AĞIRLIK DAĞILIMLARININ BELİRLENMESİ

Gülin Biçe YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması 12.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Gürdal KANAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Kübra ULUCAN ALTUNTAŞ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Tekstil Boyama Atık Suyu Geri Kazanım Tesisinde Kirleticilerin Moleküler Ağırlık Dağılımlarının Belirlenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Gülin Biçe YILDIRIM

İmza

Aileme

ve

arkadaşlarıma

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve rehberliğiyle bana yol gösteren, akademik gelişimime katkı sağlayan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin desteği, yapıcı eleştirileri ve teşvik edici yaklaşımı sayesinde bu süreci verimli bir şekilde tamamlayabildim.

Ayrıca, akademik gelişimimde önemli katkıları bulunan ve çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen kıymetli hocalarım Arş. Gör. Dr. Hülya CİVELEK YÖRÜKLÜ, Arş. Gör. Dr. Elif YAVUZ, Arş. Gör. Nedime Gaye Nur BALKANLI, Arş. Gör. Barış CANCI, Arş. Gör. Dr. Abdulkadir ÇAĞLAK ve Arş. Gör. Narin KARA'ya teşekkür ederim.

Bu süreçte yanımda olan, moral ve motivasyon kaynağım olan sevgili arkadaşlarım Onur DÖNDER, Emine ATEŞ, Özge KONUK, Zeyda BEŞLİ ve Sevda ÇİFCİ'ye destekleri için minnettarım. Birlikte çalıştığımız, bu süreçte katkılarını esirgemeyen değerli ekip arkadaşlarım İsmail Hakkı ZENGİN, Arş. Gör. Oruç Kaan TÜRK ve Merve SARAL'a teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan, sabırları, sevgileri ve destekleriyle beni motive eden kıymetli aileme; annem Şerife YILDIRIM, babam Erkan YILDIRIM, amcam Ercan YILDIRIM, ablam Aylin AKAGÜNDÜZ ve eniştem Muhammed AKAGÜNDÜZ'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tezi tamamlamamda katkısı olan, bana destek veren ve emeği geçen herkese şükranlarımı sunarım.

Gülin Biçe YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 1
2 TEKSTİL ENDÜSTRİSİ 3
2.1 Tekstil Endüstrisi Tanımı 3
2.2 Kotun Tarihçesi 3
2.2.1 Dünya'da Denimin Yeri ve Önemi 4
2.2.2 Türkiye'de Denimin Yeri ve Önemi 5
2.3 Tekstil Endüstrisi ve Çevre 6
2.3.1 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyarmaddeler ve Çevresel Etkileri 7
2.4 Tekstil Endüstrisi Denim İşleme Aşamaları 9
2.4.1 İplik Bölümü 10
2.4.2 Halat Sarma 10
2.4.3 Halat Boyama 10
2.4.4 Halat Açma 11
2.4.5 Haşıllama 12
2.5 Tekstil Endüstrisi Denim Yıkama Aşamaları 13

2.5.1 Haşıl Sökme 13
2.5.2 Taşlama 14
2.5.3 Enzim Yıkama 14
2.5.4 Ağartma 15
2.5.5 Boyama 16
2.5.6 Yumuşatma 16
2.5.7 Durulama 16
2.6 Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarjı 17
2.6.1 Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarj Edilecek Ortam Standartları 17
2.6.2 Tekstil Endüstrisi İlgili Mevzuatlar 18
2.7 Tekstil ve Denim Endüstrisi Atıksu Geri Kazanımı 19
3 TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ GENEL ARITIMI 22
3.1 Tekstil Endüstrisinde Atıksu Oluşumu 22
3.2 Tekstil Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu 26
3.3 Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Teknolojileri 28
3.3.1 Fiziksel Arıtma Yöntemleri 29
3.3.2 Biyolojik Arıtma Yöntemleri 29
3.3.3 İleri Oksidasyon Yöntemleri 30
3.3.4 Membran 30
4 MATERYAL METOT 34
4.1 Çalışmada Kullanılan Atıksuların Karakterizasyonu 34
4.2 Laboratuvar Ölçekli Dik-Akışlı Membran Filtrasyonu Düzeneği 36
4.2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Membranlar 37
4.2.2 Moleküler Ağırlık Dağılım Belirleme Çalışmaları 37
4.2.3 Çalışma Kapsamında Analiz Edilen Su Kalite Parametreleri 38
4.2.4 Membran Karakterizasyon Çalışmaları 41
5 DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI 43

5.1 İletkenlik 43
5.2 Renk 46
5.3 Bulanıklık 49
5.4 KOİ 50
5.5 Sülfat 53
5.6 AKM 55
5.7 Membranların Akıları 57
5.8 Temas Açısı 61
6 SONUÇ **67**
KAYNAKÇA **70**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **78**

KISALTMA LİSTESİ

AKM	Askıda Katı Madde
İOP	İleri Oksidasyon Prosesleri
kDa	KiloDalton
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MWCO	Moleküler Ağırlık Dağılımı Kesim Noktası
NF	Nanofiltrasyon
RO	Ters Osmoz
UF	Ultrafiltrasyon

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Denim kumaş üretimi genel aşamaları **9**
Şekil 2.2 Halat sarma makinesi **10**
Şekil 2.3 Halat boyama makinesi **11**
Şekil 2.4 Halat açma makinesi **12**
Şekil 2.5 Haşıl makinesi **12**
Şekil 2.6 Denim yıkama işlemleri **13**
Şekil 2.7 Taşlama işlemi **14**
Şekil 2.8 Enzim yıkama ünitesi **15**
Şekil 2.9 Pamuk elyafı bezinde ağartma işlemi **15**
Şekil 2.10 Yıkama prosesi **16**
Şekil 3.1 Tekstil endüstrisi basamaklarında kirletici bileşenleri **26**
Şekil 3.2 Membran sisteminin şematik gösterimi **31**
Şekil 4.1 Deney düzeneği **36**
Şekil 4.2 Termoreaktör **39**
Şekil 4.3 Türbidimetre **40**
Şekil 4.4 Süzme düzeneği ve desikatördeki filtre kağıtları **41**
Şekil 4.5 Thermo Orion 5 Star Model mulitmetre **41**
Şekil 4.6 Attension marka Theta Lite optik tensiyometre cihazı **42**
Şekil 5.1 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde iletkenliğinin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları **44**
Şekil 5.2 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde rengin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları **47**
Şekil 5.3 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde KOİ'nin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları **52**
Şekil 5.4 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde sülfatın moleküller ağırlık dağılımına göre oranları **54**
Şekil 5.5 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde AKM'nin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları **56**
Şekil 5.6 Ham atıksuyun moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa **57**

Şekil 5.7 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları MBR Çıkış – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa **59**

Şekil 5.8 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa **60**

Şekil 5.9 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 1 kDa b) 0,5 kDa c) 0,2 kDa **61**

Şekil 5.10 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları **62**

Şekil 5.11 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 1 kDa membranın temas açısı **62**

Şekil 5.12 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları **63**

Şekil 5.13 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 100 kDa membranın temas açısı **63**

Şekil 5.14 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları **64**

Şekil 5.15 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 100 kDa membranın temas açısı **64**

Şekil 5.16 Ham atıksuyun moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları **65**

Şekil 5.17 Ham atıksuların moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 0,5 kDa membranın temas açısı **65**

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Tekstil ihracatçısı ülkeler ve dünyadaki payları **4**

Tablo 2.2 Yıllara göre ihracat ve ithalat verileri **6**

Tablo 2.3 Tekstil sanayi alıcı ortama deşarj standartları..... **18**

Tablo 2.4 Tekstil endüstrisinde ve tekstil endüstrisi boyama adımında kullanımı için gerekli su kalitesi parametrelerinin aralıkları **21**

Tablo 3.1 Tekstil işlemlerinde kullanılan kimyasallar ve kirletme kabiliyetleri **23**

Tablo 3.2 Tekstil endüstrileri işlem basamakları ve atık su içeriği..... **25**

Tablo 3.3 Membran proseslerinin karşılaştırılması..... **32**

Tablo 4.1 Su kalite parametreleri analiz sonuçları **36**

Tablo 4.2 Çalışma kapsamında kullanılan membranların özellikleri..... **37**

Tablo 4.3 Su kalite parametreleri, analiz yöntemleri ve analiz için kullanılan cihazlar..... **38**

Tablo 5.1 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde iletkenliğinin moleküler ağırlık dağılımı..... **43**

Tablo 5.2 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde rengin moleküler ağırlık dağılımı **48**

Tablo 5.3 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde bulanıklığın moleküler ağırlık dağılımı..... **49**

Tablo 5.4 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde KOİ'nin moleküler ağırlık dağılımı..... **51**

Tablo 5.5 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde sülfatın moleküler ağırlık dağılımı..... **53**

Tablo 5.6 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde AKM'nin moleküler ağırlık dağılımı..... **56**

ÖZET

Tekstil Boyama Atıksuyu Geri Kazanım Tesisinde Kirleticilerin Moleküler Ağırlık Dağılımlarının Belirlenmesi

Gülin Biçe YILDIRIM

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAKCI

Sanayileşme ve nüfus artışına bağlı olarak değişen tüketim alışkanlıkları, tekstil endüstrisinin büyümesine ve beraberinde çevresel sorunların artmasına neden olmaktadır. Tekstil endüstrisinde, kumaşların boyanması ve yıkanması proseslerinde yoğun su kullanımı söz konusudur. Bu süreçler sonunda oluşan atıksular, sürdürülebilir atık su yönetimi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Atıksuların arıtımı ve yeniden kullanımı amacıyla uygulanan çeşitli ileri arıtma ve geri kazanım prosesleri arasında membran teknolojileri yüksek arıtma verimi ve su geri kazanımı gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul'da faaliyet gösteren bir tekstil fabrikasının ham atıksuyu, membran biyoreaktör (MBR) çıkış suyu, ters osmoz (RO) süzüntü suyu ve RO konsantre suları kullanılarak kirleticilerin moleküler ağırlık dağılımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, 100 kDa, 10 kDa, 1 kDa, 0,5 kDa ve 0,2 kDa moleküler ağırlık kesim değerine (MWCO'ya) sahip membranlar kullanılmıştır. Bu membranlar kullanılarak, kirleticileri moleküler ağırlık dağılımlarının belirlenmesi

amacıyla iletkenlik, renk, bulanıklık, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), sülfat ve askıda katı madde (AKM) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre iletkenliğe neden olan kirleticilerin büyük bir kısmının 0,2 kDa membrandan geçebilen, çoğunlukla tek değerli iyonlardan oluştuğu knaatine varılmıştır. Renge neden olan kirleticilerin çoğunlukla 1 kDa ve üzeri moleküler ağırlığa sahip olduğu, bulanıklık yol açan AKM'lerin 100 kDa membranla etkili bir şekilde giderildiği tespit edilmiştir. KOİ ve sülfat gideriminde ise 0,2 kDa membran yüksek oranda uzaklaştırma sağladığı görülmüştür.

Elde edilen veriler dikkate alındığında, tekstil atık sularının boyamada proseslerinde yeniden kullanılabilmesi için iletkenlik, renk ve sülfat parametrelerinin MBR sonrası RO prosesinin uygulanmasıyla yeniden kullanım için önerilen sınır değerlere indirilebildiği görülmektedir. Bu kapsamda, tekstil sektöründe atık su geri kazanımında MBR ve RO sistemlerinin birlikte kullanılması sürdürülebilir su yönetimi açısından etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tekstil Boyama Atıksuyu, Moleküler Ağırlık Dağılımı, Atıksuların Yeniden Kullanımı, Membran

ABSTRACT

Determination of Molecular Weight Distributions of Pollutants in Textile Dyeing Wastewater Revovery Plant

Gülin Biçe YILDIRIM

Department of Environmental Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet CAKMAKCI

Changing consumption habits driven by industrialization and population growth have led to the expansion of the textile industry and a corresponding increase in environmental problems. In the textile industry, significant water consumption occurs, particularly during fabric dyeing and washing processes. As a result, the generated wastewater has become a critical area of research in terms of sustainable wastewater management. Among the various advanced treatment and recovery processes applied for wastewater treatment and reuse, membrane technologies stand out due to their high treatment efficiency and potential for water recovery.

In this study, the molecular weight distribution of pollutants was investigated using raw wastewater, membrane bioreactor (MBR) effluent, reverse osmosis (RO) permeate, and RO concentrate from a textile factory operating in Istanbul. Membranes with molecular weight cut-off (MWCO) values of 100 kDa, 10 kDa, 1 kDa, 0.5 kDa, and 0.2 kDa were utilized. To determine the molecular weight distribution of pollutants, analyses were conducted for conductivity, color, turbidity, chemical oxygen demand (COD), sulfate, and suspended solids (TSS).

According to the results, the majority of the pollutants contributing to conductivity were found to consist mainly of monovalent ions capable of passing through the 0.2 kDa membrane. Pollutants responsible for color were mostly found to have a molecular size of 1 kDa or larger, while suspended solids causing turbidity were effectively removed by the 100 kDa membrane. Furthermore, the 0.2 kDa membrane demonstrated high removal efficiency for both COD and sulfate.

Based on the findings, it was concluded that for the reuse of textile wastewater in dyeing processes, parameters such as conductivity, color, and sulfate can be reduced to recommended reuse limits through the application of RO following MBR treatment. In this context, the combined use of MBR and RO systems emerges as an effective solution for sustainable water management in the textile industry.

Keywords: Textile dyeing wastewater, Molecular weight distribution, Wastewater reuse, Membrane

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Tekstil endüstrisi, günlük yaşamımızda önemli bir rol oynamaktadır. Ancak sahnenin arkasında daha az göz alıcı bir gerçeklik yatmaktadır: tekstil endüstrisi atık sularının çevresel etkisi.

Tekstil üretimi, boyama ve baskı işlemlerinden bitim işlemlerine kadar kimyasal bir süreç ağı içermektedir. Bu sebeple bu endüstride üretilen atıksular, tehlikeli maddelerin karışımını içermektedir. Boyalar ve pigmentler kumaşlara canlılık katarken diğer taraftan sucul ekosisteme de ciddi tehdit oluşturmaktadır. Atıksularda bulunan çözünmüş ve askıda katı maddeler (AKM) su yollarını tıkayarak yine ekosisteme zarar verebilmektedir. Krom, kurşun, kadmiyum gibi ağır metaller de atık sulara karışarak canlı ve çevre sağlığını olumsuz etkilemektedir. Bu kirleticiler alıcı ortamda birikerek ekosistemdeki hassas dengenin bozulmasına sebep olmaktadır [1], [2].

1.2 Tezin Amacı

Son yıllarda sanayileşmedeki hızlı ilerleyiş, kirleticilerin doğaya deşarjını arttırmıştır. Tekstil endüstrisi, tatlı suyun büyük seviyede kirleticisi ve tüketicisidir. İstatistiklere göre, tekstil endüstrileri 1 ton tekstil malzemesinin üretilmesi için 300 ton suya ihtiyaç duymaktadırlar.

Tekstil endüstrisinde atık su oluşumunun iki ana sürecini oluşturan kumaşların boyanması ve yıkanması prosesleri büyük miktarda su tüketmektedir. Oluşan atık sular, yüksek pH, Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), yüksek sıcaklık ve yoğun renk içermektedir. Bunlara ek olarak bazı proseslerde kullanılan zehirli kimyasallar

sebebiyle krom, cıva, kurşun gibi ağır metaller de bulunabilmektedir. Ayrıca tekstil endüstrisi bünyesinde oluşan atık sularda işlenmemiş boyaların bulunması doğa için büyük tehlike taşımaktadır. Tekstil atıksularının koyu renge sahip olması su kütlelerine güneş ışığının ulaşması engellenmekte ve bunun sonucunda da suda yaşayan organizmalar olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenlerle tekstil endüstrisi atık sularının alıcı ortama arıtılmadan deşarj edilmesi ciddi çevre ve sağlık sorunlarına neden olabilmektedir.

Tekstil atık sularının arıtımı ve geri kazanımı için çeşitli arıtma ve geri kazanım prosesleri içerisinde membran prosesleri yüksek arıtma verimi ve su geri kazanımı gibi avantajları nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Membran prosesi fiziksel bir ileri arıtma prosesi olup kirletici bileşiklerin moleküler ağırlık dağılımları prosesin verimi ve maliyeti açısından büyük önem arz etmektedir. İstenilen arıtma verimi ve su geri kazanımı için seçilecek membran tipinin belirlenmesi için atık suyun içerisinde bulunan kirletici bileşiklerin gözenek çaplarının dağılımı moleküler ağırlık dağılımları ile ortaya konulmalıdır.

Bu çalışma kapsamında kot yıkama endüstrisinden temin edilen atık suların moleküler ağırlık dağılım analizi yapılacak ve kirletici partiküllerin por çaplarının dağılımı ortaya konulacaktır. Ayrıca atık suyun farklı membran prosesleri ile arıtılabilirliği ortaya konulacaktır.

2
TEKSTİL ENDÜSTRİSİ

2.1 Tekstil Endüstrisi Tanımı

Tekstil endüstrisi, doğal liften iplik eldesi, yapay lif eldesi, yapay veya doğal liflerden yapılan ipliklerde örme, dokuma ve dokusuz yüzey teknikleriyle kumaş yüzeyinin oluşturulması ve elde edilen bu yüzeylerin baskı ya da boyama yöntemleri ile renklendirilmesi aşamalarını kapsayan bir sektördür.

Tekstil endüstrisi Türkiye'de en önemli sektörlerdendir. Suyu en yoğun kullanan endüstrilerden biri olması sebebiyle büyük miktarda su tüketimi olmakta ve atık su oluşmaktadır. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddeler ve kimyasallar insan ve çevre sağlığına zararlı maddeler bulundurmaktadır. Çevre için zararların azaltılması için, hammadde kullanımının azaltılması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım miktarını artırmak gerekmektedir.

2.2 Kotun Tarihçesi

Kot pantolonunun üretimi 1873 yılında başlanmıştır. Günümüzde kot olarak tanımladığımız kumaşın başlarda ismi 'denim' şeklinde ifade edilmiştir. Denim, kumaşın işlendiği ilk yer olan Fransa'da yer alan Serge De Nimes bölgesinden doğmuştur. Ülkemizde ise 1950 yılında ilk olarak Muhteşem Kot isimli bir kişi denim kumaş üretimi yaparak ilk kot pantolonu satışa sunmuştur. Bu kumaş çeşidi 'kot' ifadesini ilk kez kullanan kişinin soyadından almıştır. Blue jeanin (mavi kot pantolonu) kökeni ise, Cenevizli denizcilerin kullandığı 'Bleu de Genes' ismi verilen mavi pamuklu pantolonlara dayanmaktadır [3], [4].

İlk zamanlarda madenciler, kovboy ve işçiler tarafından giysi amacıyla kullanılan kumaş türünü zamanla her sınıftan insan kullanmaya başlamıştır. Son 50 yılda kot kumaş kullanımı dünyada yaygınlaşmıştır. Seri üretimi 19. Yüzyılda başlanılan kot

kumaşlardan yapılan kıyafetler günümüzde her cinsiyetten ve yaştan insanlar tarafından kullanılmaktadır [5], [6].

2.2.1 Dünya'da Denimin Yeri ve Önemi

Kot pantolonu ihracatı 2022 yılında dünya genelinde 64,5 milyar dolar olarak hesaplanmıştır. Bu sayının 2026 yılına kadar yıllık %4,8 büyüme oranı ile 76,1 milyar doları ulaşması beklenmektedir. Aynı yıl içinde, Amerika Birleşik Devletleri, tek başına en büyük giyim ihracatçısı olarak bu pazarda önemli bir rol oynamaktadır, denim Pazar değeri 27,1 milyar ABD doları olarak hesaplanmıştır. 2027 yılına kadar 35 milyar ABD dolarını aşması beklenmektedir [7]. Denim kot pantolonları, gardıropların temel parçası olmaya devam etmekte ve genel giyim pazarının genişlemesiyle de popülerliği günden güne artmaktadır. Tablo 2.1'de tekstil ihracatçısı ülkeler sıralanmış ve dünyadaki payları görülmektedir [8].

Tablo 2.1 Tekstil ihracatçısı ülkeler ve dünyadaki payları

Ülke Adı	2019	2020	2021	2020/2021	2021
	(Değer 1000 $)	Değer (1000 $)	Değer (1000 $)	Değişim	Pay
Çin	122.335.115	156.072.263	133.589.050	-14,4%	35,0%
Hindistan	19.243.533	17.381.028	26.264.324	51,1%	6,9%
ABD	20.910.426	18.660.071	20.382.708	9,2%	5,3%
Türkiye	12.511.407	12.342.286	16.163.088	31,0%	4,2%
Almanya	14.374.630	14.389.755	15.580.284	8,3%	4,1%
İtalya	12.226.264	10.079.343	12.482.309	23,8%	3,3%
Vietnam	9.386.232	10.069.052	11.218.390	11,4%	2,9%
Güney Kore	10.737.486	9.086.027	10.264.287	12,8%	2,7%
Pakistan	7.853.099	7.420.051	9.615.399	29,6%	2,5%
Tavyan	8.711.037	7.154.869	8.576.975	19,9%	2,2%
Hollanda	6.014.731	6.165.093	7.308.548	18,5%	1,9%
Belçika	6.644.291	6.198.551	6.989.562	12,8%	1,8%
Japonya	7.209.413	6.095.630	6.746.703	10,7%	1,8%
Fransa	5.331.249	4.737.392	5.571.565	17,6%	1,5%
İspanya	4.821.542	4.174.389	5.266.286	26,6%	1,4%
Endonezya	4.821.542	3.564.991	5.266.286	26,2%	1,2%
Avustralya	3.631.080	2.148.947	4.392.949	104,4%	1,2%
Brezilya	3.407.835	3.929.463	4.322.574	10,0%	1,1%
Tayland	4.464.258	3.687.355	4.256.515	15,4%	1,1%
Liste Toplamı (İlk 20 Ülke)	290.735.926	308.713.388	318.831.608	3,3%	83,6%
Diğer Ülkeler	58.067.750	55.758.665	62.515.760	12,1%	16,4%
Genel Toplam	**348.803.676**	**364.472.053**	**381.347.368**	**4,6%**	**100,0%**

2.2.2 Türkiye'de Denimin Yeri ve Önemi

Denim, karakteristik koton dokusuyla bilinen bir kumaş türüdür ve Türkiye'de büyük bir öneme sahiptir. Türkiye, Türk tekstil tarihinde derin köklere sahiptir. Ülke uzun yıllardır denim üretimi, boyama ve dokuma işlemlerinde yer almaktadır. Bu bağlamda birçok ünlü denim markası ürünlerini Türk üreticilerden temin etmektedir.

İhracatta da Türkiye ekonomisine büyük katkı sağlamaktadır. Türkiye, Avrupa ve Asya arasında stratejik bir konumda bulunmaktadır. Bu avantajlı konum, verimli ticaret ve üretimi kolaylaştırarak Türkiye'yi denim üretiminde merkez haline getirmektedir. Denim kumaşları, kot pantolonları ve ilgili diğer ürünleri dünya genelinde çeşitli pazarlara ihraç etmektedir. Aynı zamanda üretimdeki ihtiyaç sebebiyle de binlerce işçiye de istihdam sağlamaktadır. Halihazırda Türkiye'nin denim kumaşı üretim kapasitesi 750 milyon metredir. Dünya'da en büyük 4. tedarikçi olan Türkiye'nin ihracatı ise 2022 yılında 295 milyon dolar değerindedir. Küresel denim pazarında %7,2 pay ile Türkiye, dünyanın en büyük 4. ihracatçısı konumundadır [9]. Denim günlük modada da vazgeçilmez olmuştur. İnsanlar rahatlık ve tarz için denim kot pantolonları, gömlekleri ve ceketleri tercih etmektedir.

Özetle, denim Türkiye'nin tekstil endüstrisinde, ekonomisinde ve moda kültüründe saygın bir konumdadır. Dayanıklılığı ve çeşitliliği, ülke genelinde insanlar için sevilen ve tercih edilen bir kumaş olmaya devam etmektedir. Tablo 2.2'de Türkiye'de yıllara göre ihracat ve ithalat verileri gösterilmektedir.

Tablo 2.2 Yıllara göre ihracat ve ithalat verileri

	İhracat		İthalat	
	Değer	**Değişim**	**Değer**	**Değişim**
2010	9.458.194.881		9.407.358.852	
2011	11.447.747.145	21,00%	10.787.628.546	14,7%%
2012	11.650.024.971	1,80%	9.012.671.601	-16,50%
2013	12.746.918.381	9,40%	9.653.380.446	7,1%
2014	13.111.414.479	2,90%	10.081.970.007	4,4%
2015	11.496.444.509	-12,30%	8.570.284.174	-15%
2016	11.432.055.062	-0,60%	8.443.272.414	-1,5%
2017	12.026.909.773	5,20%	9.753.239.544	15,5%
2018	12.571.216.304	4,50%	8.784.015.926	-9,9%
2019	12.508.619.876	-0,50%	9.034.738.377	2,9%
2020	12.341.481.537	-1,30%	7.771.697.975	-14%
2021	16.161.490.868	31,00%	9.982.316.107	28,4%

Tekstilde günümüze kadar moda, müşteri talepleri, miktar, fiyat ve kalite gibi faktörler önemli iken, ihracat için gerekli ölçütler sebebiyle, ekolojik dengeyi bozmayacak üretimin de önemi yüksektir.

Tekstil sektöründe temiz üretimin yararları şöyle sıralanabilir:

- Hammadde, enerji ve su sarfiyatlarının azaltılarak doğal kaynakların korunması
- Çevre kalite standartlarının uygulandığı pazarlara girebilme fırsatı
- Çevreye deşarj edilen atık miktarının azaltılması
- Standart ve yönetmeliklere uyumun kolaylaşması
- Üretim maliyetinin azaltılması
- Tüketici imajının geliştirilmesi [10].

2.3 Tekstil Endüstrisi ve Çevre

Kot üretimini de kapsayan tekstil endüstrisi, kullanılan kimyasal ve hammaddelerin çeşitliliği, yapılan işlemler ve işlemlerde kullanılan yöntemler sebebiyle çok çeşitli bir yapıya sahiptir. Geniş bir işlem aşamasına sahip bu sektörde su tüketimi oldukça yoğundur. Tekstil endüstrisindeki atık su yüksek konsantrasyonlarda sentetik veya

organik boyarmaddeler, pigmentler, çözünmüş/askıda katılar, tuzlar, yardımcı kimyasallar ve ağır metaller gibi tehlikeli maddeler içermektedir. Bu atıksular deşarj edildikleri ortamdaki çözünmüş oksijen miktarını düşürerek sucul ekosistem için risk oluşturmaktadır [11]. Atık su alıcı su ortamlarına verildiğinde çevresel riskleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

'Hızlı moda' trendlerinin yükselmesiyle birlikte, ağartma, boyama, baskı ve bitirme gibi işlemlerde daha fazla atık su üretimi meydana gelmiştir [12]. Her bir üretim aşamasında elektrik ve su gibi enerji harcamaları gibi maliyet kalemleri mevcuttur.

Denim tekstil endüstrisi kalıcı kirleticiler sebebiyle biyolojik olarak parçalanabilirliği düşük atık sular üretmektedir. Bu kirleticiler kanserojen ve toksik özelliktedir, insan ve çevre sağlığına risk oluşturmaktadır. Tekstil atıksularının biyolojik, fizikokimyasal ve ileri oksidasyon süreçleri(İOP) de dahil olmak üzere çeşitli yeni teknolojiler, boyaların giderimi için araştırılmaktadır [13]. Kullanılan proses sularının deşarj kriterlerine uygun bir şekilde arıtılıp kot yıkama ve boyama işlemleri için geri kazanılması, işletmedeki su tüketimini önemli ölçüde azaltarak çevreye verilen zararın da önüne geçilmesi için önem arz etmektedir.

Tekstil atık suyunun deşarjı, çevresel kirliliğin önemli bir kaynağıdır bu sebeple diğer sektörlerde olduğu gibi tekstil sektöründe de atık suların etkili bir şekilde arıtılması ve geri kazanılması insan ve çevre sağlığı açısından oldukça önemlidir [14].

Gelişen teknoloji ve çevreye verilen önemin artmasıyla birlikte üretimde temiz üretim teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Tekstil sanayisinde de temiz üretim teknolojilerinin kullanılması, atık su miktarını ve atık suda bulunan kirleticileri ciddi seviyede azaltırken aynı zamanda yüksek miktarda enerji ve hammadde kullanımının da önüne geçmektedir [15].

2.3.1 Tekstil Endüstrisinde Kullanılan Boyarmaddeler ve Çevresel Etkileri

Günümüzde Dünya'da üretilen kimyasalların %15'ini tekstil endüstrisi boyarmaddeleri oluşturmaktadır. Yardımcı maddeler ise %2'lik kısmı oluşturmaktadır. Bu kimyasalların insan sağlığına zarar vermemesi için uluslar arası camiada ciddi eğilimler bulunmaktadır [16].

Sentetik boyaların, toksik tekstil boyama atık sularına büyük etkisi vardır. Bu tehlikeli kimyasalların arasında, formaldehit bazlı renk sabitleyiciler, klor bazlı leke çıkarıcılar ve biyolojik olarak parçalanamayan boyama yardımcıları bulunmaktadır.

Atık suların bünyesinde bulunan bu kolloidal maddeler, su berraklığını, su kalitesini ve denizdeki yaşamı olumsuz olarak etkilemektedir [17].

Tekstil endüstrisi için kullanılan sentetik boyalar, parlak tonlar ve renk dayanıklılığı gibi avantajlar sunsa da çevre için toksik etkilere sahiptir. Boyama atık suyu bünyesinde kolloidal maddeler, nitrat ve ağır metaller gibi tehlikeli kimyasallar içermektedir [17].

Boyama işlemlerinde kullanılan yardımcı kimyasallar da atık suyun bünyesinde olumsuz etki yaratmaktadır. Boyama işlemleri bol su kullanan aşamalardan biridir ve büyük miktarda atık su ürettiğinden bünyelerinde bulunan kimyasallar ciddi problemlere sebep olmaktadır [18].

Tekstil endüstrisi boyama işlemleri atık suları, arıtılmadan doğaya deşarj edildiklerinde bünyesinde bulunan kimyasal ve ağır metaller alıcı su ortamındaki ekosisteme zarar vermektedir. Toprağa karıştıklarında ise yeraltı sularına ulaşarak insan ve canlı sağlığını tehlikeye atabilmektedir [19].

Boyar maddelerin oksidatif koşullarda biyoçözünürlüğü yoktur veya düşük düzeydedir, bu yüzden atık sulardan uzaklaştırılması gerekmektedir [20]. Boyar maddeler suyun rengini değiştirerek fotosentezi engellemektedir.

Tekstil endüstrisi atık suları içeriğinde genelde 10-50 mg/L konsantrasyonda boyar madde içerir ve renkli atık sulardır [21]. Bu atık sular arıtılmadan alıcı ortamlara deşarj edildiklerinde problemlere sebep olabilmektedirler. En önemli problem, boyaların doğada biyolojik birikime ve toksik etkiye sebep olmalarıdır. Boyar maddeler fotolitik ve kimyasal olarak stabil oldukları için, doğal çevrede kalıcıdırlar. Bu sebeplerden ötürü, arıtılmadan deşarj edilmeleri estetik problemlere ve ekotoksik risk oluşturma potansiyeline sahiptir.

Tekstil atık sularından rengin arıtılabilmesi için biyolojik ve fizikokimyasal prosesler kullanılmaktadır [22]. Genel olarak biyolojik proseslerin avantajı, çevre dostu ve ekonomik olması olarak sıralanabilir. Fakat, bu konu hakkındaki çalışmalarda görüldüğü üzere, bu proseslerden yalnızca birinin kullanılması yeterli olmamaktadır, yöntemlerin birlikte kullanımının ekonomik ve teknik olarak avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

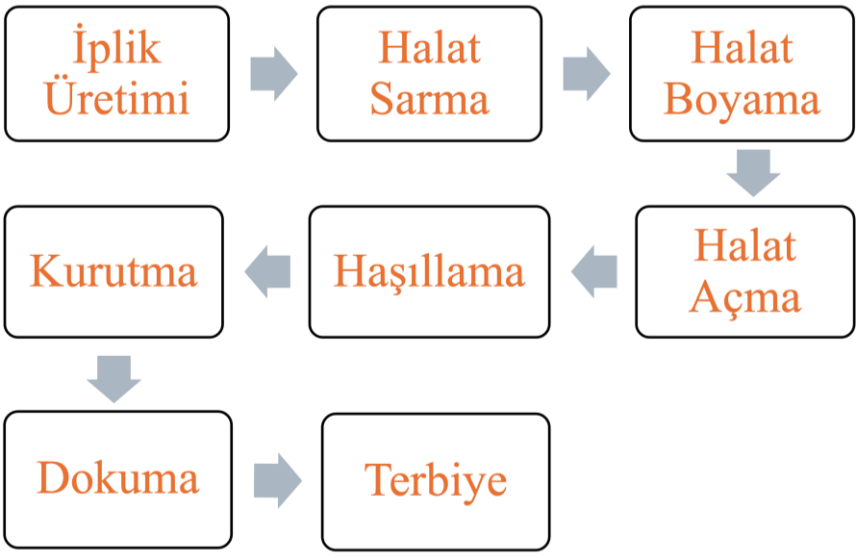
Suyun ve kimyasal maddenin yoğun kullanılması, kirli ve çok miktarda atık suyun oluşmasına sebep olmaktadır. Dünya'da 700000 ton/gün boyanın üretildiği literatürde belirtilmektedir [23]. Tekstil endüstrisinde bir ton ürüne karşılık tipik değer olarak 200-350 m^3 atık su üretilmektedir, ortalama olarak kirlilik her bir ton ürüne karşılık 100 kg KOİ şeklinde belirtilmiştir [24].

Tekstil endüstrisi atık suları içeriğinde yüksek konsantrasyonda AKM, KOİ, BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) ve boyar madde bulunduran atık sulardır. Renk verici madde ve KOİ konsantrasyonunun yüksek olması çözünmüş oksijen miktarını azaltmakla birlikte atık suyun estetiğini kötüleştirerek arıtımı güçleştirmektedir [25].

Tekstil atık sularının arıtılmasında biyolojik, kimyasal ve fiziksel metotlar kullanılmaktadır. Genel olarak kullanılan biyolojik arıtım prosesleri, bulanıklık, KOİ ve boya gideriminde etkili iken renk gideriminde yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple elektrokimyasal arıtma prosesleri en etkili proseslerden sayılmaktadır.

2.4 Tekstil Endüstrisi Denim İşleme Aşamaları

Tekstil endüstrisinde iplik hammadde olarak kullanılmaktadır ve bu iplikler; örme, dokuma ve diğer tekniklerle işlem görerek halı, triko ve kumaş gibi ürünlere dönüştürülmektedir. Tekstil endüstrisinde denim üretimi için gerekli işleme aşamaları aşağıda açıklanmaktadır ve Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Denim kumaş üretimi genel aşamaları

2.4.1 İplik Bölümü

Homojen kaliteyi sağlamak için çeşitli bölgelerden alınan pamuklar uygun dizim planıyla iplik prosesi bölümüne gönderilmektedir [26].

2.4.2 Halat Sarma

Bobinlerin metal kısmındaki bölmelere doğru şekilde dizilmesiyle başlayan bir prosestir. Halat boyama prosesi öncesi hazırlık prosesi olarak yapılan bir işlemdir. İpler yeterli gerginlikte yerleştirilmekte ve sarım işlemi yapılmaktadır. Bu işlemin amacı; iplik boyama işlemi sonrasında halatlar açılırken işleri kolaylaştırmak için yapılmaktadır [5]. Halat sarma makinesi Şekil 2.2'de görülmektedir [27].



Şekil 2.2 Halat sarma makinesi

2.4.3 Halat Boyama

Halat boyama günümüzde en yaygın boyama türü olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem geleneksel ve yüksek teknik gerektiren bir boyama yöntemidir. Boyama işlemi yapılacak olan halat ardından ön işlem teknesinden geçirilmektedir. Bu aşamada, istenilen çeşit özelliklerine göre kostikleme, ıslatma, ağartma veya boyama işlemleri uygulanmaktadır. Yıkama işlemi sonrasında halatlar boyama teknesine getirilerek 25 m/dk hızla 20 saniye boyunca teknede bekletilmekte ve sonrasında halatlar 5 metre yüksekliğe çıkarılarak oksidasyona tabi tutulmaktadır.

İpliklerin istenilen renge ulaşıncaya kadar işlem 1-12 tekrarda yapılabilmektedir. Bu yöntem ile, halatın yüzeyindeki tutunamamış halde bulunan yükseltgenmiş boyalar yıkama ile uzaklaştırılmaktadır. Boyama süresinin kısa olması sebebiyle denim boyama için ideal kabul edilmektedir [5], [11]. Halat boyama makinesi Şekil 2.3'de görülmektedir [27].



Şekil 2.3 Halat boyama makinesi

2.4.4 Halat Açma

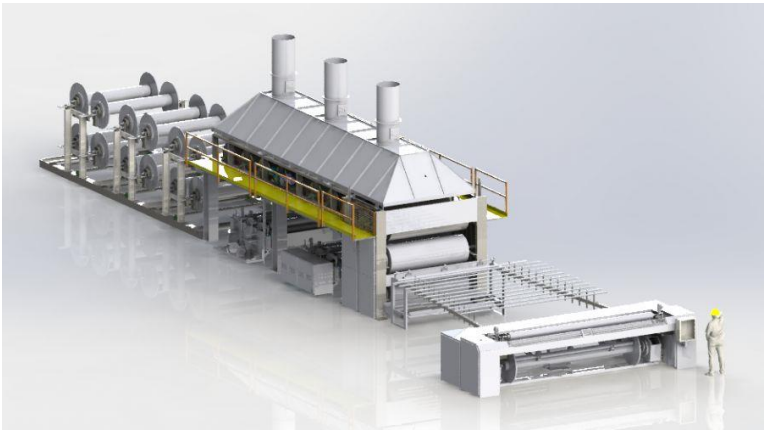
Boyama işlemi yapılmış halatın açılarak haşıl prosesine gönderildiği bölüm halat açma işlemidir. Makine ile birlikte halat sarma işleminde yapılmış olan çapraz iplikten faydalanılarak halat açma işlemi yapılmaktadır. İpliklerin birbirine dolaşması, dikey yönde hareket ettirilerek engellenmektedir. Boyama işleminin kalitesi, halat açma işlemini de doğrudan etkilenmektedir. Halat içinde çapraz dizilimler kullanmak, halatın açılmaması, çözgü dolaşması ve kopma gibi problemlerin olmasını engellemektedir. Halat açma makinesi Şekil 2.4'de görülmektedir [28].



Şekil 2.4 Halat açma makinesi

2.4.5 Haşıllama

Haşıllama, dokuma aşaması öncesinde yapılan dokumaya hazırlık aşamasıdır. Asıl amaç; ipliklere dayanıklılık kazandırmak ve mekanik etkilerden korumaktır. Bu aşamada oluşan atıkların yüksek kısmı iplik atığı, lif havı ve proseste kullanılan nişasta bazlı haşıldır. Kullanılmakta olan haşıl maddeleri proseste oluşan atık suların en büyük kirlilik kaynağını oluşturmaktadır. Bu prosesten çıkan atık sular yüksek seviyelerde AKM, BOİ ve KOİ içermektedir fakat hacimsel olarak miktarları düşüktür [5], [29]. Haşıl makinesi Şekil 2.5'de görülmektedir [30].

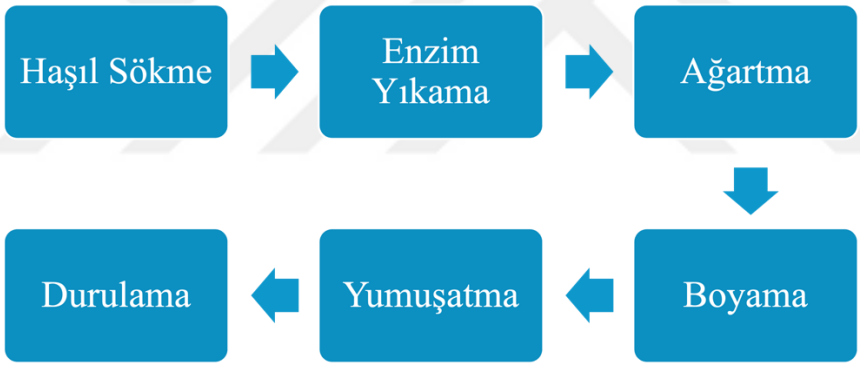


Şekil 2.5 Haşıl makinesi

2.5 Tekstil Endüstrisi Denim Yıkama Aşamaları

1950'li yıllarda işlenmiş denim ürünleri müşteri ilgisini kazanmak için parça parça olarak yıkamadan geçirilmeye başlanmış ve neticede farklı yıkama prosesleri uygulanmaya başlanmıştır. Taşlama işlemini ponza taşı ile yapma, tümüyle veya bölgesel ağartmayı farklı yükseltgen veya indirgen malzemelerle yapma, birbirinden farklı boyar madde kullanarak boyama işlemi yapma en yaygın kullanılan proseslerdir [31].

Kot yıkama işlemi yalnızca ıslak işlemler içeren proses değildir. Bu proses sırasında üretilen ürünler hem kuru hem de yaş halde bazı aşındırma şekilleriyle işlenmektedir. Kimyasal maddelerin kullanıldığı aşamalar ürün yaşken uygulanırken, mekanik yöntemler ile uygulanan aşındırma yöntemleri kuru halde yapılmaktadır. Yaş işlemlerden kaynaklanan atıksu, kot sektöründeki atık suyun asıl kaynağını oluşturmaktadır. Denim yıkama işlemleri Şekil 2.6'da görülmektedir [10].



Şekil 2.6 Denim yıkama işlemleri

2.5.1 Haşıl Sökme

Kot kumaşının üretiminde, dokuma işlemi esnasında kullanılan ipliklerin zarar görmemesi için ipliklerin üzerine haşıl adı verilen sertleştirici bir malzeme eklenmektedir. Haşıl maddesi iplik üstünde kaygan bir tabaka oluşturarak sürtünmeyi de azaltmaktadır. Fakat bu tabaka yıkama sırasında probleme sebep olmaktadır. Bu işlemin amacı; dokuma işleminin verimi için çözgü ipliklerinin üzerindeki haşıl maddelerini uzaklaştırmayı içermektedir. Haşıl sökme eğer iyi yapılmazsa terbiye aşamasında hatalar oluşmakta ve bunların çözümü de mümkün olmamaktadır.

Haşıl sökme işlemi esnasında enzimler kullanılmaktadır. Enzimler, atık sularda kolaylıkla parçalanabilmeleri, geniş proses şartlarına uyum sağlayabilmeleri ve liflere zarar vermemeleri açısından tercih edilmektedir [32].

2.5.2 Taşlama

Kot ürünlerinin, ponza taşı kullanılarak yıkanması ve eskitme desenli bir görüntüye getirilmesi için endüstriyel yıkama cihazları ile yapılan bu işleme taşlama adı verilmektedir. Bu işlemin sonucunda ürünlerde kullanılmış bir görüntü elde edilmek istenmektedir. Ponza taşı ürün üzerinde mekanik bir yıpranmaya sebep olmakta ve bu şekilde de iplik üstündeki tabakada boyar maddelerde aşınma meydana gelmektedir. Yüksek verim alabilmek için ürünler kuruyken taşlama işlemi yapılmaktadır [32]. Taşlama işlemi Şekil 2.7'de görülmektedir [33].



Şekil 2.7 Taşlama işlemi

2.5.3 Enzim Yıkama

Enzimler, günümüzde gelişmekte olan teknolojiden kaynaklı birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Denimin yıkanması aşamalarında yaygın kullanımı bulunan enzimler selülaz, lakkaz ve amilaz enzimleridir. Amilaz enziminin substrat maddesi nişasta olduğundan, haşıl sökme aşamasında nişastayı uzaklaştırmak amacıyla amilaz enzimi kullanılmaktadır. Lakkaz enzimi bakır içeren bir yapıdadır ve farklı maddelerin oksidayonu için kullanılmaktadır. Bu sebeple boya temizleme ve renk açma işlemlerinde kullanılabilmektedir. Selülaz enzimi ise kumaş yüzeyinde meydana gelen tüylenmenin yok edilmesi ve taşlama efektinin verilmesi

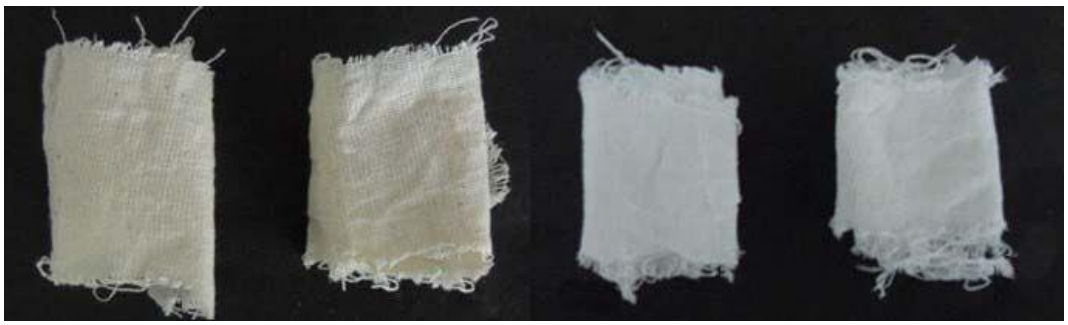
amacıyla kullanılmaktadır [34]. Denimin aşındırılması için yapılan enzimin yıkanması aşamasında, çamur miktarını arttıran enzim selülaz iken, amilaz ve lakkaz enzimleri ise atık suyun kirlilik yükünü arttırmaktadır. Enzim yıkama ünitesi Şekil 2.8'de görülmektedir [35].



Şekil 2.8 Enzim yıkama ünitesi

2.5.4 Ağartma

Bu prosesin amacı; kimyasallar yardımı ile istenmeyen renklerin giderilmesidir. Daha çok enzimler, hidrojen peroksit, sodyum silikat ve sodyum hipoklorit gibi ağartma ajanları kullanılmaktadır. Peroksitlerin veya klorürün yüksek miktarda kullanılması biyolojik arıtmada inhibisyona neden olabilmektedir. Proseste oluşan atık suyun katı madde içeriği yüksek, BOİ içeriği de düşüktür [36]. Pamuk elyafı bezinde ağartma işlemi Şekil 2.9'da görülmektedir [37].



Şekil 2.9 Pamuk elyafı bezinde ağartma işlemi

2.5.5 Boyama

Dokumaya renk vermek amacıyla genelde sentetik boyalar veya katran kullanılmaktadır. Boyama genel olarak liflere renk verme aşamasıdır. Sadece boya banyosu prosesinde değil, boyama sonrasında da su tüketimi yüksektir. Bu işlemde boyanın lif üzerine tutunmasını sağlamak amacıyla yüzey aktifler, sülfür, sülfit, formaldehit, tuzlar ve metaller gibi kimyasallar suya ilave edilebilmektedir. Bu aşama sonunda atık su içeriği, düşük organik madde ve yüksek renk içermektedir [29].

2.5.6 Yumuşatma

Yumuşatma işlemi son yıkama prosesi olarak adlandırılmaktadır. Bu proses ile ürüne, göze hitap eden ve canlı görünüm kazandırılmaktadır. Yumuşaklık hissinin %75'ini kumaş yapısı belirlerken, %25'ini yumuşatıcı madde belirlemektedir. Kullanılan yumuşatıcılar genellikle katyonik formdadır ve pH seviyeleri 5 civarında olan asitli ortamda ürüne uygulanmaktadır [29].

2.5.7 Durulama

Durulama prosesinde pamuktan, pamuğun selüloz yapıda olmayan bileşenleri, yağ ve vaks, yıkama solventleri ve sabun çözeltileri (gliserol eterler, deterjan gibi) ile uzaklaştırılır.

Uygulama sırasında suya karışan artık kimyasallar, kimyasal ve toksik maddece zengin bir atık su bileşimi meydana getiriler. Atık su pH'sı alkali formda olup, 10-11 seviyelerindedir ve yüksek miktarda katı madde ve KOİ içermektedir. Endüstri bünyesinde kirlilik yükü en yüksek olan basamak yün yıkamadır [38]. Yıkama prosesi Şekil 2.10'da görülmektedir [39].



Şekil 2.9 Yıkama prosesi

2.6 Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarjı

Tekstil endüstrisi, boyama, baskı ve bitirme gibi çeşitli süreçler esnasında önemli miktarda su tüketmektedir. Ortalama olarak, 1 kilogram tekstil kumaşı üretmek için 60-450 litre su gerekmektedir. Örneğin, 1 kilogram pamuğu reaktif boyalarla boyamak için 10-300 litre su gerekmektedir [40].

Tekstil endüstrisinin işlenmemiş veya kısmen işlenmiş atık suları, genellikle su kaynaklarına deşarj edilmektedir. Bu deşarj, alıcı ortamda su kirliliğine katkıda bulunmaktadır. Avrupa'da tekstil endüstrisinin toplam su tüketimi yaklaşık olarak 600 milyon metreküp/yıl olup, 36 milyon ton kirletici içeren 108 milyon metreküp suyun deşarj öncesinde arıtılması gerekmektedir.

Deşarj, arıtılmış veya arıtılmamış atıksuların uygun mühendislik yapıları kullanılarak alıcı ortama sistemli bir şekilde boşaltılması anlamına gelmektedir.

2.6.1 Tekstil Endüstrisi Atıksu Deşarj Edilecek Ortam Standartları

Tekstil endüstrisi çeşitli kirleticiler ve ağır metaller içeren atık suların deşarjı sebebiyle su kirliliğine önemli bir katkıda bulunmaktadır. Tekstil fabrikaları, atık sularını çevreye bırakmadan önce arıtmakla yükümlüdürler. Bu arıtma, tekstil atık suyunda bulunan boyalar ve diğer kirleticilerin etkisini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Tekstil atık suları, boyanın çeşitli kirleticilerle karıştırıldığı bir bileşimi içermektedir. Bu kirleticiler, boyama süreçlerinde kullanılan kimyasalların yanı sıra sudaki diğer kirleticileri de içermektedir. Boyaların ve kirleticilerin bileşimi, alıcı su ortamlarına deşarj edilmeden önce uygun şekilde arıtılması gereken atık sulara yol açmaktadır [21].

Tekstil üretimi; ağartma, boyama, baskı ve bitirme gibi suyun yoğun olarak kullanıldığı işlemleri içermektedir. Bu aşamalarda büyük miktarda atık su oluşmaktadır. Tekstil fabrikaları bu atık suyu yönetmeli ve arıtmalıdır, böylece soğal su ekosistemleri ve halk sağlığı üzerindeki etkisi en aza indirilmelidir [1].

Çevresel etkiyi azaltmak için düzenlemeler ve çevresel mevzuat, tekstil fabrikalarının atıklarını doğal su kaynaklarına deşarj edilmeden önce arıtmalarını gerektirmektedir. Bu, deşarj edilen atık suyun kabul edilebilir standartları karşıladığından ve çevre ve insan sağlığına zarar vermediğinden emin olmaktadır [41].

Tekstil sanayi atıksularının alıcı ortama deşarj standartları Tablo 2.3'de verilmiştir [38].

Tablo 2.3 Tekstil sanayi alıcı ortama deşarj standartları

Parametre	**Birim**	**Kompozit Numune 2 saatlik**	**Kompozit Numune 24 saatlik**
KOİ	mg/L	400	300
AKM	mg/L	140	100
Amonyum Azotu	mg/L	5	-
Serbest Klor	mg/L	0,3	-
Toplam Krom	mg/L	2	1
Sülfür	mg/L	0,1	-
Sülfit	mg/L	1	-
Fenol	mg/L	1	0,5
ZSF (Balık Biyodeneyi)	-	4	3
pH	-	6-9	6,9

2.6.2 Tekstil Endüstrisi İlgili Mevzuatlar

- 2872 Çevre Kanunu

Kanunda atıksuların geri kazanılmasıyla arıtılmış atık suların yeniden kullanılmasının teşviki kullanılmaktadır.

- 4857 İş kanunu
- Atık yönetimi yönetmeliği

Bu yönetmeliğin amacı; atığın oluşumunun azaltılması, atıklarından tekrardan kullanılması, geri dönüştürülmesi ve geri kazanımı yollarıyla atık yönteminin sağlanmaktır.

- Ambalaj atıklarının kontrolü yönetmeliği
- Su kirliliği kontrolü yönetmeliği

Bu yönetmelik; atık su yönetiminde döngüsel ekonomi prensiplerine bağlı olarak geri dönüşümünün ve yeniden kullanılmasının teşvikini sağlamaktadır.

Arıtılmış atık suların yeniden kullanılması için uygulanan arıtım neticesinde oluşan konsantre atık suların alıcı ortama deşarj edildiğinde, konsantre suyun özellikleri ve alıcı ortamın özellikleri de dikkate alınarak Bakanlıkça belirlenmiş olan alıcı ortama deşarj kriterlerini sağlamak zorunlu olmaktadır.

Yine bu yönetmeliğin eklerinde tekstil endüstrisi atık sularının alıcı ortama deşarj standartları bulunmaktadır.

- Sanayi kaynaklı hava kirliliği kontrolü yönetmeliği
- Toprak kirliliğinin kontrolü ve noktasal kaynaklı kirlenmiş sahalara dair yönetmelik
- Çevresel etki değerlendirmesi yönetmeliği
- Geri kazanım katılım payına ilişkin yönetmelik
- Çevresel gürültü kontrol yönetmeliği
- Kimyasalların kaydı, değerlendirilmesi, izni ve kısıtlanması hakkında yönetmelik
- Sıfır atık yönetmeliği
- Tekstil sektöründe temiz üretim uygulamaları genelgesi

41203884-010.06/5406660 sayılı genelgenin 2.1. maddesiyle; Boyama işlemi yapılan tekstil firmalarında boya banyosu atıksularında renk giderimi sağlanmasıyla tuzlu suyun kumaş yıkama ve boyamada yeniden kullanımını sağlayan yöntemlerin kullanılması zorunlu hale getirilmiştir [42].

2.7 Tekstil ve Denim Endüstrisi Atıksu Geri Kazanımı

Endüstriyel kirliliğin kontrol altına alınabilmesi için üretim süreçlerinin çevreye duyarlı hale getirilmesi, kirletici maddelerin oluşumunun kaynağında en aza indirilmesi ve atıkların arıtıldıktan sonra yeniden kullanıma kazandırılması gerekmektedir. Bu çerçevede, sürdürülebilir kalkınma anlayışı, sanayi faaliyetlerinin doğaya zarar vermeden gerçekleştirilmesini ve gelecekteki kaynak ihtiyacının güvence altına alınmasını amaçlamaktadır. Özellikle su kaynaklarının azalması, sanayi sektörünü su tasarrufu sağlayan ileri arıtma yöntemleri ve geri kazanım sistemlerine yönlendirmektedir.

Tekstil endüstrisi, yüksek su tüketimi ve karmaşık kimyasal içeriğe sahip atık sularıyla ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Geleneksel arıtma sistemleri, tekstil atık sularındaki boya ve kimyasalları tamamen gidermekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, suyun geri kazanılması ve yeniden kullanılması için gelişmiş arıtma teknolojilerinin uygulanması gerekmektedir. Membran prosesleri, suyun temizlenerek tekrar kullanılmasına olanak tanırken, aynı zamanda üretim süreçlerinde kullanılan kimyasalların geri kazanılmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, membran prosesleri yüksek giderim verimi, kompakt bir sistem olması, düşük kimyasal gereksinimi ve yüksek kalitede çıkış suyu gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır [43].

Türkiye'de sanayinin su talebi giderek artarken, mevcut su kaynaklarının kısıtlı olması, sanayi kuruluşlarını atık sularını ileri arıtma yöntemleriyle temizleyip yeniden kullanmaya yönlendirmektedir. Yüksek su maliyetleri ve temiz suya erişimde yaşanan zorluklar, endüstriyel tesislerin geri kazanım sistemlerini tercih etmesini teşvik etmektedir. Mevcut yasal düzenlemeler ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, atık su arıtma teknolojilerinin geliştirilmesi ve geri kazanım uygulamalarının yaygınlaştırılması büyük bir gereklilik haline gelmektedir.

Tekstil boyama endüstrisi atıksuların yeniden kullanımı için önerilen su kalite parametreleri Tablo 2.4’de görülmektedir.

Tablo 2.4 Tekstil endüstrisinde ve tekstil endüstrisi boyama adımında kullanımı için gerekli su kalitesi parametrelerinin aralıkları

Parametre	**Birim**	**Boyama Suyu Yeniden Kullanımı** [44]	**Tekstil Endüstrisi Yeniden Kullanımı** [45]
		Aralık	**Aralık**
KOİ	mg/L	0-160	-
$BOİ_5$	mg/L	0-20	-
Alkalinite	mg/L	50-200	-
Sertlik	mg/L	0-100	0-50
Toplam çözünmüş katılar	mg/L	100-1.000	100-200
Uçucu çözünmüş katılar	mg/L	100-400	-
Toplam askıda katı madde	mg/L	0-50	0-5
Uçucu askıda katı madde	mg/L	0-10	-
Bulanıklık	NTU	-	0,3-5
İletkenlik	µS/cm	800-2.200	-
pH	-	6.5–8.0	6,0-8,0
Sülfat	mg/L	-	100
Renk	Pt-Co	0-50	0-5
Fenol	mg/L	-	-
Klorür	mg/L	100-300	-
Demir	mg/L	0-0,3	0,1-0,3
Mangan	mg/L	<0,05	0,01-0,05
Bakır	mg/L	<5	0,01-5
Çinko	mg/L	<2	-
Kurşun	mg/L	<0,1	-

3
TEKSTİL ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ GENEL ARITIMI

3.1 Tekstil Endüstrisinde Atıksu Oluşumu

Tekstil sektöründe hızlı moda anlayışı küresel olarak yayıldıkça, ağartma, boyama, baskı ve bitirme gibi işlemler esnasında tekstil endüstrisi atık suyu üretimi artmaktadır [46].

Denim tekstil endüstrisi, indigo boyalar da dahil olmak üzere kalıcı kirleticiler içeren düşük biyolojik bozunurluğa sahip atık su üretmektedir [22].

Endüstri dallarından özellikle tekstil endüstrisi, suyu hemen hemen her proses basamağında kullanmakta ve sonuçta da yüksek miktarda atık su oluşturmaktadır. Tekstil endüstrisinde oluşan atık sular, ıslak işlem aşamalarında bağlı değişmektedir. Örneğin; bitim işlemleri ve haşıl sökme aşamalarında oluşan atık sular yüksek BOİ, boyamadan çıkan atık sular KOİ, BOİ ve ağır metal içerebilmektedir.

Tekstil endüstrisi atık suları bileşen ve miktar açısından değişiklik göstermektedir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte işletme prosesleri yenilenmektedir ve endüstrideki atık suların içeriği de değişmektedir. Örnek verecek olursak, boyama ve yıkama proseslerinde yüksek miktarda su kullanılmaktadır, oluşan atık suyun ise hacmi yüksek, renkli ve organik madde içeriği düşüktür. Haşıllama prosesinde ise oluşan atık su miktarı düşük, kirlilik yükü ise yüksektir. (Toplam KOİ miktarının %30-70'ini oluşturmaktadır) [46].

Tekstil endüstrisinde atıksular, diğer kirleticilere göre çevre için çok daha fazla zorluk doğurmaktadır. Elyaftan başlayan, kumaşa kadar uzanan büyük tesislerde 1 ton ürün başına 16 ton su harcanmaktadır [47]. Kullanılan çeşitli kimyasallar

sebebiyle bu sektörden meydana gelen atıksularda, elyaf kaynaklı maddeler ve bu kimyasallar yüksek miktarda bulunmaktadır. Tablo 3.1'de tekstil endüstrisi işlemlerinde kullanılan bazı kimyasallar ve arıtım zorlukları verilmektedir (EPA, 1996).

Tablo 3.1 Tekstil işlemlerinde kullanılan kimyasallar ve kirletme kabiliyetleri

Genel Kimyasal Tipi	**Arıtma Zorluğu**	**Kirlenme Kategorisi**
Alkali Mineral Asitler Doğal Tuzlar Oksitleyici Maddeler	Nispeten zararsız inorganik kirleticiler	1
Nişasta Bitkisel ve Hayvansal Yağlar, Vakslar Ayrışabilen Deterjanlar Organik Asitler İndirgeyici Maddeler	Kolay ayrışma ve yüksek BOİ'ye neden olma	2
Boyar Maddeler ve Floreosan Maddeler Elyaflar ve Polimerik Safsızlıklar Poliakrilat Suni Polimer Bitim Maddeler Silikonlar	Boyar maddeler ve polimerler ayrışmaya direnç gösterir	3
Yün yağı PVA (Poli Vinil Asetat) Nişasta Eter ve Esterleri Mineral Yağ Ayrışmaya Dayanıklı Deterjan Anyonik ve Non İyonik Yumuşatıcılar	Ayrışması zor ve orta derecede BOİ'ye neden olma	4
Formaldehit ve N-metilol Reaktanlar Klorlu Solventler ve Carrier Maddeler Katyonik Geciktirici ve Yumuşatıcılar Biyositler Ağır Metal Tuzları	Biyolojik arıtma ile giderilemez. Önemsiz BOİ'ye neden olma	5

Boyama aşaması sırasında boyar maddeler haricinde yardımcı kimyasallar da kullanılmaktadır. Bu kimyasallar aşağıda sıralanmıştır;

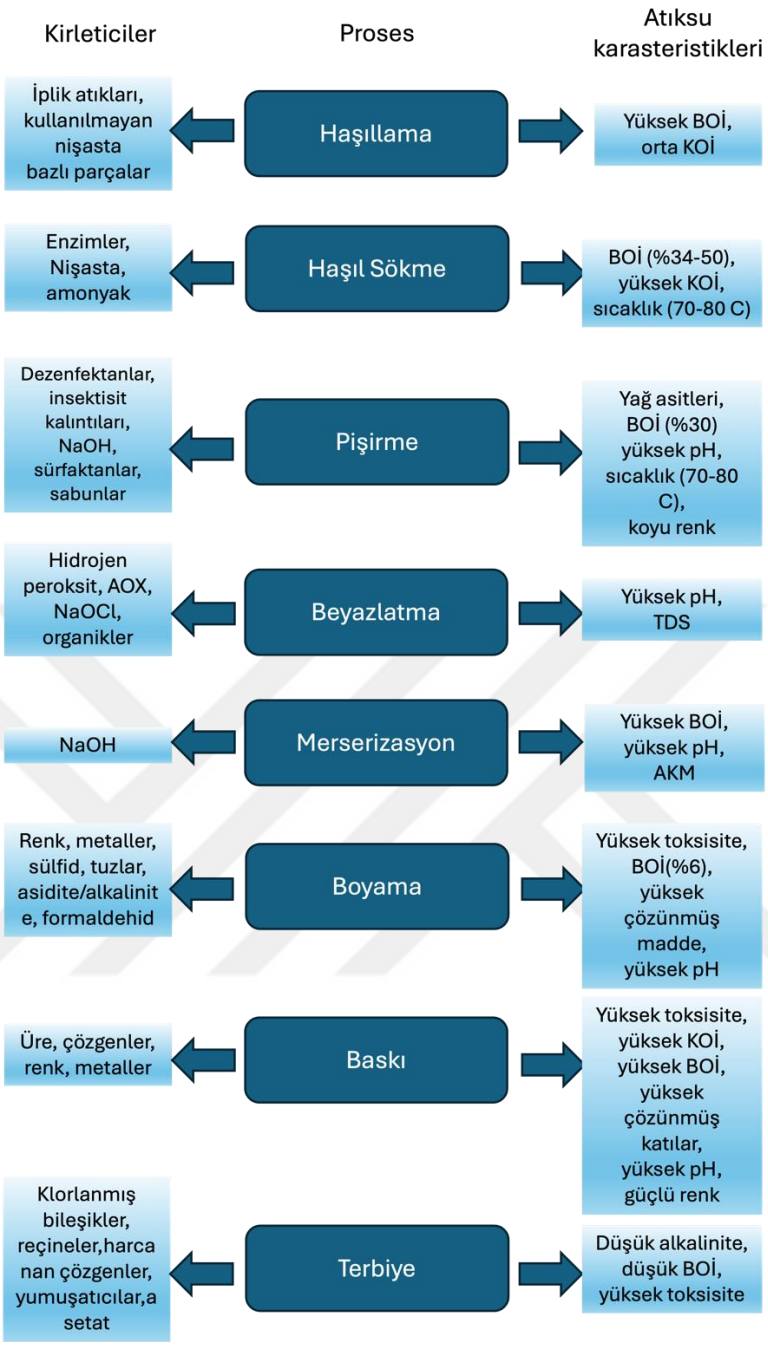
- Tuzlar (Na_2SO_4 veya NaCl): elyafın zeta potansiyelini kırar ve iyon etkisiyle boyar maddelerin elyafa taşınması ve tutulumunu kolaylaştırmaktadır.
- Asit ve bazlar (Sülfürik asit, asetik asit, sodyum karbonat, kostik)
- pH tamponlayıcılar (Trisodyumfosfat)
- İndirgenler (Sodyum sülfat): Kullanım amacı reaksiyona girmeyen boyayı uzaklaştırmaktır.
- Oksidantlar, ağartıcılar (Sodyum nitrit, hidrojen peroksit): kullanım amacı boyayı tespit etmektir.
- Dispersantlar (Noniyonik, katyonik ve anyonik deterjanlar): teknedeki boyanın homojen dağılması amacıyla kullanılmaktadır [50].

Tekstil atık sularının içeriği kullanılan kimyasal çeşitlerine ve uygulanan işletme koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Bu atık sular BOİ, pH, KOİ, tuzluluk ve renk gibi kirlilik parametrelerinde değerleri yüksek olmaktadır ve bu atık sular da standart arıtma yöntemleri ile arıtılamamaktadır.

Tekstil sektörü işletmeleri; haşıllama, haşıl sökme, merserizasyon, yıkama ve boyama proseslerini içermektedir. Her işlem basamağında kullanılan maddeler atık su kompozisyonunun oluşturmaktadır. Tekstil proseslerinde işlem basamakları ve atık su içeriği Tablo 3.2'de [51] ve tekstil endüstrisi basamaklarında kirletici bileşenleri de Şekil 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.2 Tekstil endüstrileri işlem basamakları ve atık su içeriği

Parametre	Elyaf Türü	Haşıl Sökme	Yıkama	Ağartma	Boyama	Baskı
KOİ (mg/L)	Yün	-	5000-90000	-	7920	-
	Pamuk	950-20000	8000	288-13500	1115-4585	-
	Sentetik	-	-	-	620	1515
BOİ5(mg/L)	Yün	-	2270-60000	400	400-2000	-
	Pamuk	-	100-2900	90-1700	970-1460	-
	Sentetik	-	500-2800	-	530	590
Renk (ADMI)	Yün	-	2000	-	1450-4750	-
	Pamuk	64-1900	694	153	1750	-
	Sentetik	-	-	-	-	-
Toplam Katı (mg/L)	Yün	-	28900-49300	910	-	-
	Pamuk	-	-	2300-14400	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	150-250
Toplam Askıdaki Katı (mg/L)	Yün	-	1000-26200	900	-	-
	Pamuk	18-800	184-17400	130-25000	120-190	-
	Sentetik	-	600-3300	-	140	-
Toplam Çözünmüş Katı (mg/L)	Pamuk	530-6900	-	4760-19500	-	-
Çözünmüş Organik Karbon(mg/L)	Yün	-	5800	-	-	-
	Pamuk	250-2750	-	320	-	-
Toplam Kjeldahl Azotu(mg/L)	Pamuk	70	-	40	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	164
Amonyum Azotu(mg/L)	Yün	-	604	-	-	-
	Pamuk	9-19	-	8-19	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	129
Toplam Fosfor (mg/L)	Pamuk	4-10	-	6-60	-	-
	Sentetik	-	-	-	-	21
Fosfat (mg/L)	Yün	-	89	-	-	-
Sülfür(mg/L)	Yün	-	0-2	-	-	-
	Pamuk	-	-	-	325-900	-
Sülfat(mg/L)	Pamuk	-	-	-	1750-2690	-
Klorür(mg/L)	Genel Elyaflar	-	-	90-100	26000	-
Yağ Gres (mg/L)	Yün	-	580-55000	-	-	-
Cr-2 (mg/L)	Yün	-	50	-	-	-
pH	Yün	-	7.6-10.4	6	4.6-8	-
	Pamuk	8.8-9.2	7.2-13	6.5-13.5	9.2-10.1	-
	Sentetik	-	8-10	-	11.7	-
Su Tüketimi (L.kg-1 elyaf)	Yün	-	4-77.5	-	40-150	280-520
	Pamuk	-	2.5-43	30-50	38-143	-
	Sentetik	-	17-67	-	38-143	-



Şekil 3.1 Tekstil endüstrisi basamaklarında kirletici bileşenleri

3.2 Tekstil Endüstrisi Atıksu Karakterizasyonu

Tekstil endüstrisi uygulamaları sonucunda oluşan atıksuların karakterizasyonları incelendiğinde, genellikle yüksek AKM, renk, pH, sıcaklık, KOİ ve BOİ miktarlarına sahip oldukları gözlemlenmektedir [50].

Tekstil endüstrisi atık suyu, kumaş üretiminde kullanılan boyalar ve pigmentlerden kaynaklı olarak genellikle yoğun bir renge sahiptir. Renk yoğunluğu ise, atık su içeriğinde bulunan çeşitli kimyasalların varlığından kaynaklanmaktadır. Tekstil

atık suyu yüksek KOİ ve BOİ değerlerine sahip olmaktadır. Bu parametreler genel kirlilik seviyesi ve organik yükü göstermektedir [25].

Tekstil endüstrisinde farklı aşamalarda suya karışan kirleticilerin, suyu hangi parametre açısından etkilediği aşağıda açıklanmaktadır.

- Haşıl Sökme:

Haşıl sökme işlemi, kumaşta bulunan haşıl ve bu haşıl maddesini uzaklaştırmak amacıyla kullanılan kimyasallardan kaynaklı atık suda yüksek miktarda kirlilik yüküne neden olan işlemlerden biridir. Bu yöntem, yüksek sıcaklıklarda yıkama ve sonrasında yüksek konsantrasyonlarda yüzey aktif maddelerin kullanılmasıyla gerçekleşmektedir. Bu işlemin sonucunda oluşan atık su, yüksek miktarda KOİ, toplam AKM, pH ve toplam çözünmüş madde içermektedir [51].

- Yıkama ve Ağartma:

Yıkama aşaması, tekstil üretim sürecinde boyaların sabitlenmesi ve kumaşların temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Yıkama işlemi esnasında oluşan atık su, genelde yüksek miktarda KOİ içermektedir. Bu da, suya organik maddelerin karıştığı ve oksijen tüketiminin de arttığı anlamına gelmektedir. Yıkama atık sularının karakterizasyonu, arıtma tesisi işletilmesi ve tasarımı açısından oldukça önemlidir.

Ağartma aşaması, ürünlerin renklerinin açılması ya da beyazlatılması için kullanılmaktadır. Bu işlem esnasında kumaşa zarar verildiğinden enzim yıkama işlemiyle eş zamanlı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Eş zamanlı yapılan bu işlem atık suyun miktarını attırmakta ve çamur oluşum hızının etkilenmesine sebep olmaktadır. Ağartma işlemi esnasında meydana gelen atık su, genelde yüksek miktarda kimyasal bileşikler, KOİ, BOİ, toplam AKM, toplam çözünmüş madde içermektedir. Ağartma atık suları karakterizasyonu, arıtma sürecini optimize etmek ve çevresel etkileri değerlendirmek açısından oldukça önemlidir [47], [52].

- Boyama:

Tekstil endüstrisi boyama işleminde meydana gelen atıksuların özellikleri, boyama esnasında kullanılan boyalar, yardımcı maddeler ve kimyasallar sebebiyle değişebilmektedir. Boyama işlemi esnasında kullanılan kimyasalların

ve boyaların etkisinde kaynaklı atık sular genelde bulanık ve koyu renkli olabilmektedir. Yine boyamada kullanılan kimyasallar sebebiyle atık sular kuvvetli alkali özelliği taşımaktadır. pH değeri boyama işlemine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu aşamada yoğun miktarlarda kullanılan kimyasallar, boyar maddeler ve tuz atık suyun kirlilik yükünü önemli seviyede arttırmaktadır. Toplam AKM, sülfat, pH, BOİ ve KOİ kirliliklerinin yükselmesine sebep olmaktadır [53].

- Yumuşatma:

Tekstil endüstrisinde yumuşatma prosesi, kumaşların esnek ve daha yumuşak hale getirilmesi için yapılmaktadır. Bu işlem için kullanılan kimyasallar, katyonik yüzey aktif maddeleri içermektedir. Bu maddeler, kumaşın liflerini kaplayarak kumaşa yumuşaklık sağlamaktadır. Tekstil endüstrisinde yumuşatma prosesi sonucunda atık sular, genelde biyolojik olarak parçalanabilir ve toksik olmayan bileşikler içermektedir. Atık sudaki organik madde miktarının artmasıyla birlikte KOİ ve BOİ seviyeleri yükselmektedir. Bunun yanı sıra, yağ-gres miktarı da olumsuz yönde etkilenmektedir [54], [24].

- Baskı:

Baskı işlemi, kumaşlara renk veya desen uygulamak amaçlı gerçekleştirilmektedir. Baskı için kullanılmakta olan kimyasallar, genelde yardımcı kimyasallar, bağlayıcılar ve boya maddeleri içermektedir. Boya maddeleri, kumaşa rengi ve deseni aktarırken kullanılmaktadır. Bağlayıcılar ise, boyanın kumaşa yapışmasını sağlamaktadır. Yardımcı kimyasallar, baskı aşamasının veriminin arttırılması ve istenen sonucun elde edilmesi için kullanılmaktadır. Baskı sonucunda meydana gelen atık suların, genelde organik madde içeriği yüksektir ve renkli bileşikler içermektedir. Bağlayıcılar ve boya maddeleri atık suda önemli kirletici bileşenlerindendir. Bu kirlilikler sonucu olarak atık suyun BOİ ve KOİ değerleri yükselmektedir [55].

3.3 Tekstil Endüstrisi Atıksuyu Arıtma Teknolojileri

Tekstil endüstrisi kalıcı kirleticilerin varlığı nedeniyle düşük biyolojik parçalanabilirlikte atık su üretmektedir. Bu kirleticiler, kanserojen ve toksik bileşikler üretebilir ve halk sağlığı ve su yaşamı açısında risk oluşturmaktadır.

Doğru arıtım, bu riskleri azaltmakta ve doğal kaynakların kirlenmesini önlemektedir [25].

Günümüzde milyon lira seviyesinde maliyetlere mal olan tekstil fabrikasının, atıksu arıtma tesisisin maliyeti örneğin yüz bin lira seviyesinde olabilmektedir. Fakat bu, arıtma tesislerinin ucuz olduğu anlamına gelmemektedir. Bu sebeple her tesisin atık su karakterizasyonları ayrı değerlendirilmeli ve arıtılabilirlikleri laboratuvar ve pilot ölçekli tesislerde denendikten sonra arıtma biçimine ve kademelerine karar verilmelidir [16].

Tekstil sektörü suyun yoğun kullanıldığı bir endüstri olduğundan, boyalar ve toksik kimyasallar içeren yüksek miktarda atık su üretmektedir. Arıtılmadan deşarj edildiğinde, bu kirli atıksu, alıcı ortamın ekosistemine zarar vermektedir. Arıtım, zararlı maddelerin alıcı ortama deşarjından önce uzaklaştırılmasını sağlamaktadır [25].

Tekstil atık suyunun arıtılması, su, hammadde ve enerji gibi değerli kaynakların da geri kazanılmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, atık su miktarını azaltmaktadır, hem endüstriye hem de çevreye fayda sağlamaktadır.

3.3.1 Fiziksel Arıtma Yöntemleri

Fiziksel arıtma, arıtma proseslerinin birinci aşaması olarak belirtilmektedir. Bu aşamada AKM giderimi yapılmaktadır. Birincil arıtma yöntemlerinde, fiziksel kuvvet kullanılarak uygulanan yöntemlerle birlikte kirleticileri uzaklaştırılmaktadır. Bu yöntemler; ızgara, flotasyon, filtrasyon ve adsorpsiyondur [56].

3.3.2 Biyolojik Arıtma Yöntemleri

Mikroorganizmalar, biyolojik proseslerde atıksuda bulunan karbonlu organik bileşikleri, çökebilir inorganik ve organik maddelere dönüştürür ve bu maddelerin çöktürme tankında uzaklaştırılmasını sağlar.

Tekstil endüstrisi atık sularının yeniden kullanılması için biyolojik arıtma prosesleri, adsorpsiyon, ozonlama ve membran prosesleri gibi ileri arıtım yöntemleri ile birleştirilmektedir. Biyolojik proseslerin kimyasal ve fiziksel prosesler ile kullanılması atık suyun besin içeriğini ve organik içeriğini (KOİ ve BOİ) azaltmaktadır [25], [54].

Tekstil endüstrisinde atıksu biyolojik arıtımında, diğer arıtma yöntemlerine kıyasla daha az çamur üretilmektedir. Bu da atık bertaraf maliyetlerini ve çevresel etkiyi azaltmaktadır. Bu yöntem, mikroorganizmalar ve doğal süreçlere dayandığı için ucuzdur. Diğer yandan, biyolojik arıtma süreçleri genellikle yavaş ilerlemektedir. Mikroorganizmaların çözünmeyen kirleticileri parçalamaları zaman almaktadır. Sıcaklı ve pH değişikliklerine duyarlıdırlar, optimal koşulların sağlanması gerekmektedir. Bazı kirleticiler (örneğin ağır metaller) biyolojik süreçlerde etkili bir şekilde giderilmemektedir.

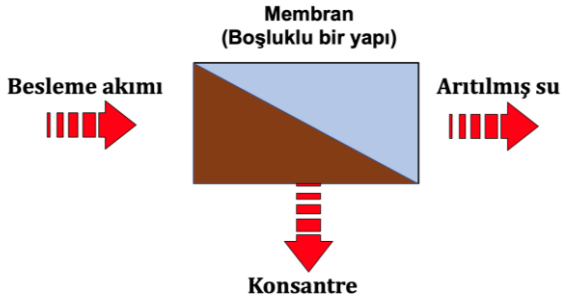
3.3.3 İleri Oksidasyon Yöntemleri

Bu yöntem, klasik arıtma yöntemleriyle giderilemeyen kirleticilerin etkili bir şekilde giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Organik kirleticileri yüksek seviyelerde oksitleyerek giderimini amaçlamaktadır.

İOP'ler; ilaçlar, pestisitler, endüstriyel kirleticiler ve boyalar dahil inorganik ve organik kirleticileri etkili bir şekilde gidermektedir. Kirleticileri mineralizasyon yolu ile daha küçük inorganik moleküllere parçalamaktadır. İOP'ler ozon veya hidrojen peroksit dışında kimyasal eklemeyi gerektirmemektedir. Yani, kimyasal depolanması ve taşınması gibi ihtiyaçları azaltmaktadır. Bunların yanında bu sistemler yüksek arıtma maliyeti ve yüksek enerji ihtiyacı gerektirmektedir. Reaktif kimyasal maddelerin (ozon, H_2O_2) kullanımından kaynaklı özel güvenlik ihtiyacı gerekmektedir [57], [58].

3.3.4 Membran

Membran, iki fazı birbirinden ayırmak için kullanılan seçici bir bariyerdir. Bu proseslere, son zamanlarda ilgi gittikçe artmaktadır. Bu ilginin sebepleri arasında; çıkış suyu kalitesinin yüksek verimde olması, alan ihtiyacının az olması, işletiminin kolay olması, çamur üretiminin ve enerji ihtiyacının düşük olması, kurulumunun kolaylığı ve patojen giderimi gösterilmektedir. Bu sistemlerin dezavantajı ise membran tıkanmasıyla birlikte süzüntü akısının azalmasıdır [59], [60]. Membran sistemi Şekil 3.2'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.2 Membran sisteminin şematik gösterimi

Kimyasal maddelerin geri kazanılması ve atıksuyun tekrar kullanılması amacıyla membran prosesleri kullanılmaktadır. Membranlar gözenek çaplarına göre sınıflandırılmaktadır. Bunlar Ultrafiltrasyon (UF), Nanofiltrasyon (NF) ve ters osmozdur (RO). Tekstil endüstrisinde membran renk, KOİ ve BOİ gidermek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda çeşitli proseslerde suya karışmış yardımcı maddeler ve boyanın geri kazanımı da sağlanmaktadır. Membran prosesisin dezavantajı ise yüksek bir ilk yatırım maliyetinin olmasıdır [61], [62].

Membran yüzeyinde, kolloidal maddeler, partiküller, tuzlar vb.lerin membran yüzeyine birikmesiyle tıkanma oluşmaktadır. Membran tıkanmasının engellenmesi ve arıtım veriminin arttırılması için membran öncesinde koagülasyon-flokülasyon veya biyolojik arıtım prosesleri uygulanmaktadır. Bunun dışında, tıkanmanın engellenmesi için, periyodik temizleme, işletme parametrelerinin optimizasyonu ve alt kritik akı ile işletme stratejileri uygulanmaktadır.

Membran proseslerinin avantajları:

- Sürekli işletme halinde olabilir.
- Çok az yer ihtiyacı vardır.
- Modüler olarak kullanılabilir.
- Yüksek konsantrasyonlara uygulanabilmektedir.
- Taşınabilirdir.
- Herhangi bir inşaat gerektirmez.
- Maliyeti gün geçtikçe azalmaktadır [60], [63].

Membran proseslerinin karşılaştırılması Tablo 3.3'de görülmektedir.

Tablo 3.3 Membran proseslerinin karşılaştırılması

Membran Prosesi	MF	UF	NF	TO
Membran Tipi	Gözenekli	Gözenekli	Gözeneksiz	Gözeneksiz
Membran Yapısı	Simetrik asimetrik	Asimetrik	Asimetrik, ince film kompozit	İnce film kompozit
Sürücü Kuvvet	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç	Hidrostatik basınç
Tipik Kullanım Alanları	AKM giderimi	Virüsler, kolloidlerin giderimi	İyonlar ve renk giderimi, su yumuşatma	İyonlar ve küçük moleküllerin giderimi
Geçirgenlik Dışında Performans Göstergesi	Gözenek çapı	MWCO (Moleküler Ağırlık Dağılımı)	$MgSO_4$ giderimi	NaCl giderimi
Membran Tertip Tarzı	Düz plaka, içi boşluklu fiber, tübülar	Düz plaka, içi boşluklu fiber, tübüler	Düz plaka, içi boşluklu fiber	Düz plaka
Tipik İşletme Basıncı	0,1-2	0,5-5	3-15	8-60

3.3.4.1 Membran Çeşitleri

- Mikrofiltrasyon: MF (Mikrofiltrasyon) membranlarının gözenek çapı 0,05-2 µm aralığında değişmektedir. Bu membranlar çözeltilerden; başta bakteriler ve virüsler olmak üzere gözenek çapından büyük tüm maddeleri gidermektedir. Mikrofiltrasyon membranı ayırma mekanizması, elekten geçirme prensibine fiziksel olarak benzemektedir. Maddeler gözenek çapından büyük ise membran yüzeyinde tutulmaktadır [63], [64].
- UF: UF membranları MWCO ile sınıflandırılmaktadır. Gözenek çapı 0.005 ve 0.1 µm veya MWCO'su 10.000-200.000 Da aralığında membranlar ile en az 1 log virüs giderebilmektedir. UF membranları basınç sürücü kuvveti ile çalışmaktadır. Bu membranlar; AKM'leri, virüsleri, kolloidleri, bakterileri ve makromolekülleri ayırmak amacıyla kullanılmaktadır [65], [66].
- NF: NF membranları genelde %NaCl ve $MgSO_4$ giderme verimiyle sınıflandırılmaktadır. Ayrıca MWCO da kullanılmaktadır. MWCO değeri 200-500 Da arasındadır. Çözünmüş organikler, kalsiyum, renk, magnezyum ve diğer iyonları sudan uzaklaştırabilmektedir. Sodyum klorür giderimi 0 ile %95

aralığındadır. RO membranına göre sodyum klorür giderimi düşüktür. NF membranı tek değerlikli iyonları geçirirken, çok değerlikli iyonları alıkoymaktadır [67].

- RO: RO membranları genelde %NaCl giderme verimi ile sınıflandırılmaktadır. RO membranları MWCO'su 200 Da'dan küçüktür. Dezenfeksiyon yan ürünü öncüleri, renk, sertlik, çözünmüş organikler ve çözünmüş katıları sudan ayırmaktadır. Sodyum klorürü %95 üzerinde giderebilmektedir [68].

Mikrofiltrasyon ve UF membranları bulanıklık seviyesi yüksek olan suların arıtılmasında, içme sularından bakteri ve virüs giderilmesinde veya NF ve RO membranları için ön arıtma olarak kullanılmaktadır. Bunun sonucunda da RO membranlarının kullanım ömürleri artmaktadır. RO öncesinde UF membranlarının ön arıtma olarak kullanılması; kolay ve sürekli otomatik işletme olanağı, kimyasal madde ihtiyacının az olması ve RO membranları için yüksek kalitede su üretimi gibi önemli avantajlar sağlamaktadır.

4
MATERYAL METOT

4.1 Çalışmada Kullanılan Atıksuların Karakterizasyonu

Çalışmada, İstanbul'da bulunan bir tekstil firmasından ham atık su, MBR çıkış suyu, RO konsantre suyu ve RO süzüntü suları temin edilmiştir. Tesisten kaynaklanan atıksular toplama tankına verilmektedir. Toplama tankından geçen sular, büyük partiküllerin (kum, plastik vb.) ayrılması amacıyla önce sepet ızgaradan geçirilmektedir. Atık su sıcaklığının optimum işletme şartlarına düşürülmesi amacıyla soğutma kulesine iletilmektedir. Soğutma kulesinden sonra sular 300 μm gözenek çaplı disk filtreden geçerek 420 m^3 hacimli dengeleme tankına ulaşmaktadır. Dengeleme tankında, atıksuyun debi ve kirlilik yükünün dengelenmesi sağlanmaktadır. Dengeleme tankı çıkışında sulara $FeCl_3$ ve NaOH ilave edilmektedir. Kimyasal ilave edilen sular boru tipi hızlı karıştırma ünitesinden geçmektedir. Hızlı karıştırma çıkışında suya polielektrolit ilave edilmekte ve boru tipi yavaş karıştırma ünitesinden geçen sular 40 m^3 hacimli çözünmüş hava ile yüzdürme (DAF) ünitesine verilmektedir. DAF ünitesinde yağ, gres ve AKM'lerin uzaklaştırılması amaçlanmaktadır. DAF ünitesinden çıkış suları 1.840 m^3 hacimli membran biyoreaktör (MBR) ünitesine verilmektedir. MBR ünitesinde Polivinilden Florür (PVDF) malzemeden üretilmiş ve hollow fiber UF membranları kullanılmıştır. UF membranının gözenek çapı 0,03-0,1 μm aralığındadır. 15 m^2 membran alanı ile 150-300 L/sa debi elde edilebilmektedir. Başka bir ifade ile membran akısı10-20 L/m^2.sa'dir. 5 adet 1000 m^2 membran alanına sahip modül kullanılmıştır. Toplam 5000 m^2 UF membranı bulunmaktadır.

UF membranları tarafından aktif çamur içerisindeki mikroorganizmalar alıkonulurken, su ve çözünmüş maddeler süzülmektedir. Böylece, MBR ünitesinde yüksek konsantrasyonda mikroorganizma olması sağlanmakta ve biyolojik olarak

ayrışabilir organik maddeler bu mikroorganizmalar tarafından son ürünlere dönüştürülmektedir. Dirençli bazı organik maddelerde zamanla MBR ünitesinde gelişen dayanıklı mikroorganizma türleri tarafından son ürünlere dönüştürülebilmektedir. Bu durum ilk zamanlardan göre tesis işletmeye alındıktan birkaç ay sonra görülebilmektedir.

Membranlar vakum basıncı ile işletilmektedir. Vakum pompası 75 m^3/sa kapasitelidir. Ayrıca, 160 m^3/sa kapasiteli geri devir pompası da bulunmaktadır. MBR ünitesinde hem mikroorganizmalar için gerekli oksijenin sağlanması ve hem de membranlar üzerinde kirleticilerin birikimin engellenmesi için havalandırma yapılmaktadır. 1 asıl ve 1 yedek blower bulunmaktadır. Blowerın kapasitesi 1900 m^3/sa'tir. MBR ünitesinin tabanında 320 adet difüzör ile ünitede hava dağıtımı yapılmaktadır. Bu ünitede çözünmüş oksijen online olarak analiz edilmektedir.

MBR membranlar belirli bir süre vakum basıncı ile çalıştıktan sonra temiz su ile geri yıkanmaktadır. Yılda birkaç kez de kimyasal ile temizlenmektedir. MBR membranları tankın dışına çıkarılarak temizlenmek için kimyasallarla temas etmektedir.

MBR ünitesinde fazla çamur 10 m^3/sa kapasiteli pompa ile filtre pres ünitesine gönderilmektedir. MBR ünitesi çıkış suları 72 m^3 hacimli tanka verilmektedir. Tanktan 2,4 m çapında basınçlı zeolit filtreye sular verilmektedir. Zeolit filtreden geçen sular 5 µm gözenek çaplı 2 adet kartuş filtre ünitesinden geçmektedir. Kartuş filtre girişinde suya antiskalant ilave edilmektedir. İhtiyaç durumunda HCl ve biyosit de ilave edilebilmektedir.

Kartuş filtreden geçen sular ters osmoz membranlarına verilmektedir. Toray Advanced Materials Korea tarafından üretilen CSM RE8040-FEN34 RO membranı kullanılmıştır. 1 membranın uzunluğu 1.016 mm, çapı 200 mm ve temiz su toplama borusunun çapı ise 28,5 mm'dir. 5 adet RO ünitesi bulunmakta ve toplamda 60 adet RO membranı kullanılmaktadır.

Bir RO membranı 37,16 m^2'dir. Yüksek basınç pompasının maksimum basınç değeri 16,8 bar'dır.

RO ile suyun içindeki çözünmüş tuz ve iyonlar ayrıştırılarak yüksek kalitede arıtılmış su elde edilmektedir. RO sonrası aktif karbon ünitesi de bulunmaktadır. Aktif karbon ile RO membranından geçen organik maddelerin giderimi amaçlanmıştır.

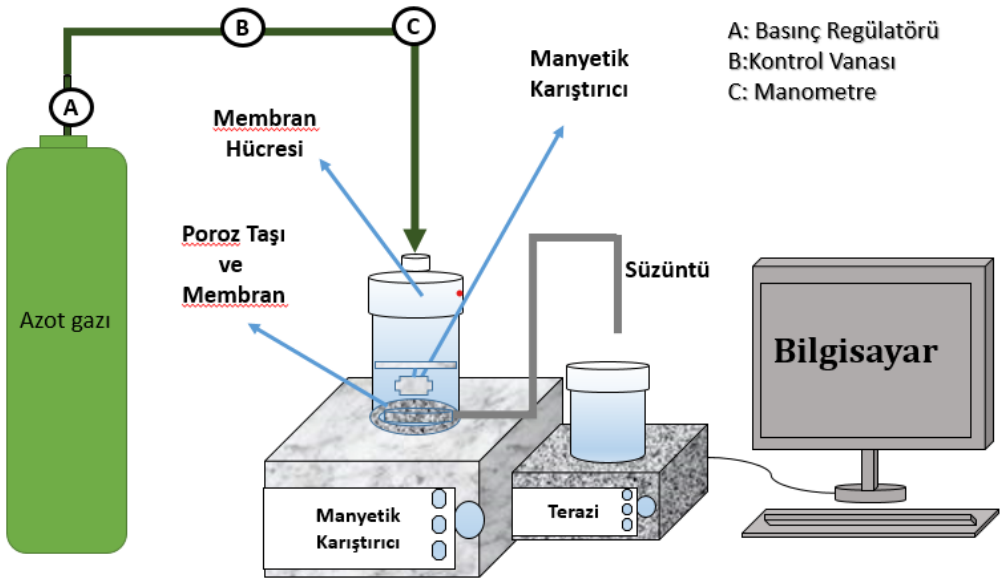
Dengeleme tankı çıkışı (ham atıksu), MBR çıkış süzüntüsü, RO süzüntüsü ve RO konsantresi olmak üzere 4 adet farklı noktadan numune temin edilmiştir. Atık su numuneleri laboratuvarda +4 ^{o}C'de muhafaza edilmiştir. Numunelerin su kalite parametreleri analiz edilmiş ve analiz sonuçları Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1 Su kalite parametreleri analiz sonuçları

	pH	İletkenlik (µS/cm)	Renk (Pt-Co)	Bulanıklık (NTU)	KOİ (mg/L)	AKM (mg/L)	Sülfat (mg/L)
Ham su	8,91	4.800	1.580	89,1	1.714	80	753,95
MBR Çıkış	8,9	6.000	1.140	11,9	390	-	698
RO Süzüntü	8,43	175,5	2	<10	20,78	-	27
RO Konsantre	8,72	21.920	4.610	59,3	1.333	190	1.186

4.2 Laboratuvar Ölçekli Dik-Akışlı Membran Filtrasyonu Düzeneği

Çalışmada laboratuvar ölçekli membran deney düzeneği kullanılmıştır ve deney düzeneğine ait akış diyagramı Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Deney düzeneği

Şekil 4.1'de görülen düzenekte hacmi 1,4 L ve efektif membran alanı 0,12 m^2 olan paslanmaz çelikten imal edilmiş Millipore YT30 142 HW ve 300 mL hacme 0,00146 m^2 efektif membran alanına sahip paslanmaz çelikten imal edilmiş Sterlitech HP4750 membran hücreleri kullanılmıştır. Her iki membran düzeneğinde de basınç azot gazı ile sağlanmıştır. Hücrelerde filtrasyon sırasında membran yüzeyinde kirlilik birikiminin önlenmesi amacıyla manyetik karıştırıcılar bulunmaktadır. Membran akısının belirlenmesi amacıyla 0,1 g hassasiyete sahip hassas terazi kullanılmıştır. Toplanan süzüntünün ağırlığı tartılmakta ve veriler bilgisayara kaydedilmektedir.

4.2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Membranlar

Deneysel çalışmada ticari olarak temin edilen farklı MWCO'lara sahip membranlar kullanılmıştır. Kullanılan membranlara ait özellikler Tablo 4.2'de görülmektedir.

Tablo 4.2 Çalışma kapsamında kullanılan membranların özellikleri

Marka ve Model	Türü	Materyali	MWCO	Akı (L/m^2.sa)
NADIR RM US 100 P 1016	UF	PSUH	100 kDa(KiloDalton)	100
Sterlitech YMCQSP3001	UF	PES	10 kDa	85/30 Flux (GFD)/psi
Sterlitech YMGESP3001	UF	Kompozit poliamid	1 kDa	18/400 Flux (GFD) psi
Sterlitech YMXN453001	UF	Poliperazin-amid	0,5 kDa	35/110 Flux (GFD) psi
Sterlitech YMTS403001	UF	Poliperazin-amid	0,2 kDa	20/110 Flux (GFD) psi

4.2.2 Moleküler Ağırlık Dağılım Belirleme Çalışmaları

Atık suların geri kazanılarak tekrar kullanılması için suyun kullanım amacına uygun bir arıtma prosesinin seçilmesi önemlidir. Atık suda bulunan kirleticilerin moleküler ağırlık dağılımlarının belirlenmesi, uygun arıtma ünitelerinin seçimine katkı sağlayabilir. Bu tez çalışması kapsamında moleküler ağırlık dağılımı çalışmaları Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği laboratuvarında Şekil 4.1'de akış diyagramı verilen laboratuvar ölçekli filtrasyon düzenekleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 1,5 L numune 100, 10, 1, 0,5 ve 0,2 kDa MWCO'ya sahip membranlardan sıralı olarak geçirilmiş ve her membran sonrası su kalitesi parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 300 mL numune alınmıştır. MBR çıkışı,

RO konsantre ve ham atıksuda kirlilik yükleri yüksek olduğundan 100, 10, 1, 0,5 ve 0,2 kDa membranlar ve RO süzüntü suyunda 1, 0,5 ve 0,2 kDa membranlar ile moleküler ağırlık dağılımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4.2.3 Çalışma Kapsamında Analiz Edilen Su Kalite Parametreleri

Analiz edilen parametreler, analiz yöntemi ve analiz için kullanılan cihazlar Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Su kalite parametreleri, analiz yöntemleri ve analiz için kullanılan cihazlar

Analiz	Metot	Materyal/Yöntem	Cihaz
Bulanıklık	Standart Metotlar, 2130 B	Spektrofotometrik	Hach Lange DR3900
İletkenlik	Standart Metotlar, 2510	İletkenlik probu	Thermo Orien 5-Star Plus
pH	Standart Metotlar, 4500 H^+	pH probu	Thermo Orien 5-Star Plus
Renk	Standart Metotlar, 2550	Spektrofotometrik	Hach Lange DR3900
Sülfat	Standart Metotlar, 4500 SO_4^{2-}	Spektrofotometrik	Shimadzu UV-Vis 1800
AKM	Standart Metotlar, 2540 D	Süzme seti	
BOİ	Standart Metotlar, 5210 D	Titrasyon	
KOİ	Standart Metotlar, 5220 C	Kapalı Reflux	Velp Eco 23

4.2.3.1 KOİ Analizi

KOİ ölçümü için Standart Metotlar, 5220 C, titrimetrik metot kullanılmıştır. Numunelerin KOİ'sini ölçmek için KOİ tüplerine 2,5 mL numune veya farklı oranlarda seyreltilerek 2,5 mL'ye tamamlanmıştır. Seyreltme oranları ham atıksuların KOİ değerlerine ve metodun analiz aralığına (25-400 mg/L) göre belirlenmiştir. Tüplerdeki numunelere ilave olarak 1,5 mL hacminde standart $K_2Cr_2O_7$ çözeltisi ve 3,5 mL hacminde Ag_2SO_4 reaktifi eklenmiştir. Ayrıca deney esnasında numuneye bulaşabilecek organik maddeleri ölçebilmek ve mukayese için şahit numune hazırlanmıştır. Şahit için numune yerine 2,5 mL saf su alınarak deney tekrarlanmıştır. Eklenen kimyasallardan sonra tüpün kapağı hemen kapatılıp hafifçe karıştırılmıştır. Hazırlanan tüpler 150 ^oC sıcaklığa ayarlanmış Şekil 4.2'de

görülen termoreaktöre yerleştirilmiş ve 2 saat boyunca ısıtılmıştır. Numuneler 2 saat sonunda termoreaktörden çıkartılarak tüplerin soğuması amacıyla bekletilmiştir. Oda sıcaklığına gelen numuneler erlenlere boşaltıldıktan sonra üzerine 2-3 damla ferroin indikatörü ilave edilmiş ve standart demir amonyum sülfat (DAS) çözeltisi ile titre edilmiştir. Titrasyon, numune mavi renkten kiremit kırmızısı renge dönene kadar devam etmiştir. DAS çözeltisinin molaritesi her deney öncesi değişiklik gösterebileceği için 5 mL $K_2Cr_2O_7$ ile titre edilmiştir. DAS'ın titrasyon hacminden numunenin KOİ miktarı hesap yoluyla belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Termoreaktör

4.2.3.2 Sülfat Analizi

Gravimetrik ve türbidimetrik yöntemler sülfat analizi için kullanılan en yaygın yöntemlerdir. Çalışma kapsamında sülfat tayini yapmak için türbidimetrik analiz yöntemi olan SM-4500D-SO_4^{-2} metodu kullanılmıştır. Bu metodun temeli, askıda bulunan maddeler içeren bir çözeltinin ışığı yayma özelliğine dayanmaktadır. Sülfat iyonu içeren suya, $BaCl_2.2H_2O$ kimyasalı eklenerek asitli ortamda baryum sülfat ($BaSO_4$) oluşturulmuştur.

$SO_4^{-2} + Ba^{+2}$ -----> $BaSO_4$

Sülfat deneyini yaparken erlenlere 100 mL numune veya farklı oranlarda seyreltilerek 100 mL'ye tamamlanmış numune konulmuştur. Seyreltme oranları ham atık suların sülfat değerleri ve yöntemin okuma aralığına göre belirlenmiştir. Şahit numune için ise erlene 50 mL saf su eklenmiştir. Erlenlerdeki numunelere ilave olarak 1 mL standart sülfat tampon çözeltisi ilave edilmiştir. Daha sonra şahit numune haricinde diğer numunelere hassas terazi ile tartılmış 1 g $BaCl_2.2H_2O$

kimyasalı eklenerek karıştırma düzeneğinde 1 dakika boyunca karıştırılarak eklenen kimyasalın sülfat ile reaksiyona girmesi beklenmiştir. Şahit numune ile cihaz kalibre edildikten sonra karıştırma süresi sonrasında numunelerin, $BaSO_4$ kimyasalının çökmesi istenmediğinden 5 dakika içerisinde analizi yapılmıştır. Sülfat ölçümü için numune 3,5 mL'lik kuvars tüpüne konularak 420 nm dalga boyuna sahip spektrofotometrede okunmuştur. Cihaza bağlı bulunan bilgisayar programı ile kalibrasyon grafiği oluşturulmuş ve okunan sülfat değeri yapılan seyreltme oranına göre hesaplanıp kaydedilmiştir.

4.2.3.3 Renk ve Bulanıklık Analizi

Sularda çözünmüş maddeler renk, kolloidal maddeler ise bulanıklık oluşumuna sebep olur. Çalışmada renk ve bulanıklık ölçümü için Şekil 4.3'de görülen spektrofotometre kullanılmıştır. Cihazın kalibrasyonu için saf su kullanılarak renk ve bulanıklık ölçümleri yapılmadan önce ayrı ayrı kalibrasyon ayarlanması yapılmıştır. Deney yapılırken 10 mL numune veya farklı oranlarda seyreltilerek 10 mL'ye tamamlanmış numune kuvars küvetine konulmuştur.



Şekil 4.3 Türbidimetre

4.2.3.4 AKM Analizi

AKM ölçümü Standart Metotlar (SM) 2540D metoduna göre AKM deney seti ile yapılmıştır. Filtrasyon düzeneği kurulduktan sonra, 0,45 µm'lik membran filtre kağıdı (temiz su için) ve cam elyaf filtre kâğıdı (atıksu için) kullanılarak sabit bir tartım alınmıştır. Filtre kağıdı, önce 105 °C'de 1 saat etüvde ve ardından desikatörde bekletilmiştir.

Vakum altında süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Süzme işlemi sonrasında filtre kağıdı 103-105°C'de 1 saat süreyle etüvde ve sonrasında ise desikatörde bekletilmiştir. Süzme düzeneği ve desikatördeki filtre kağıtları Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4 Süzme düzeneği ve desikatördeki filtre kağıtları

4.2.3.5 pH ve İletkenlik Analizi

Çalışma kapsamında pH ölçümleri için SM-4500 H^+ ve iletkenlik ölçümleri için ise SM-2510 standart metotları kullanılmıştır. pH ve iletkenlik ölçümleri Şekil 4.5'de görülen cam elektrotlara sahip taşınabilir multimetre ile gerçekleştirilmiştir.



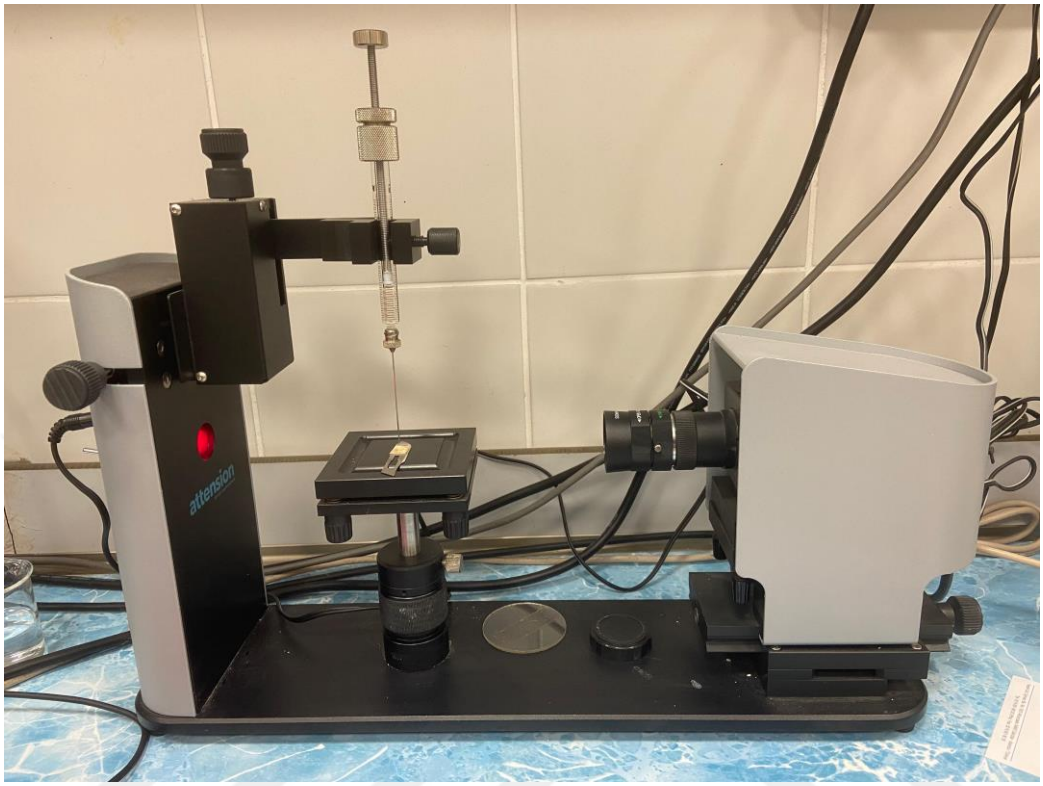
Şekil 4.5 Thermo Orion 5 Star Model mulitmetre

4.2.4 Membran Karakterizasyon Çalışmaları

4.2.4.1 Temas Açısı

Temas açısı, bir katı yüzey ile temas halindeki sıvı arasında oluşan açı ya da sıvının katı yüzeyi ıslatma yeteneğinin bir göstergesi olarak ifade edilmektedir. Temiz ve çalışmalarda kullanılan membranların hidrofilik ve hidrofobik özelliklerinin tespiti amacıyla gerçekleştirilen temas açısı analizlerinde, YTÜ Çevre Mühendisliği

laboratuvarında bulunan Attension marka Theta Lite optik tensiyometre cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6). Analiz sırasında, membran yüzeyine damlatılan sıvı olarak çift distile saf su tercih edilmiştir.



Şekil 4.6 Attension marka Theta Lite optik tensiyometre cihazı

5
DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

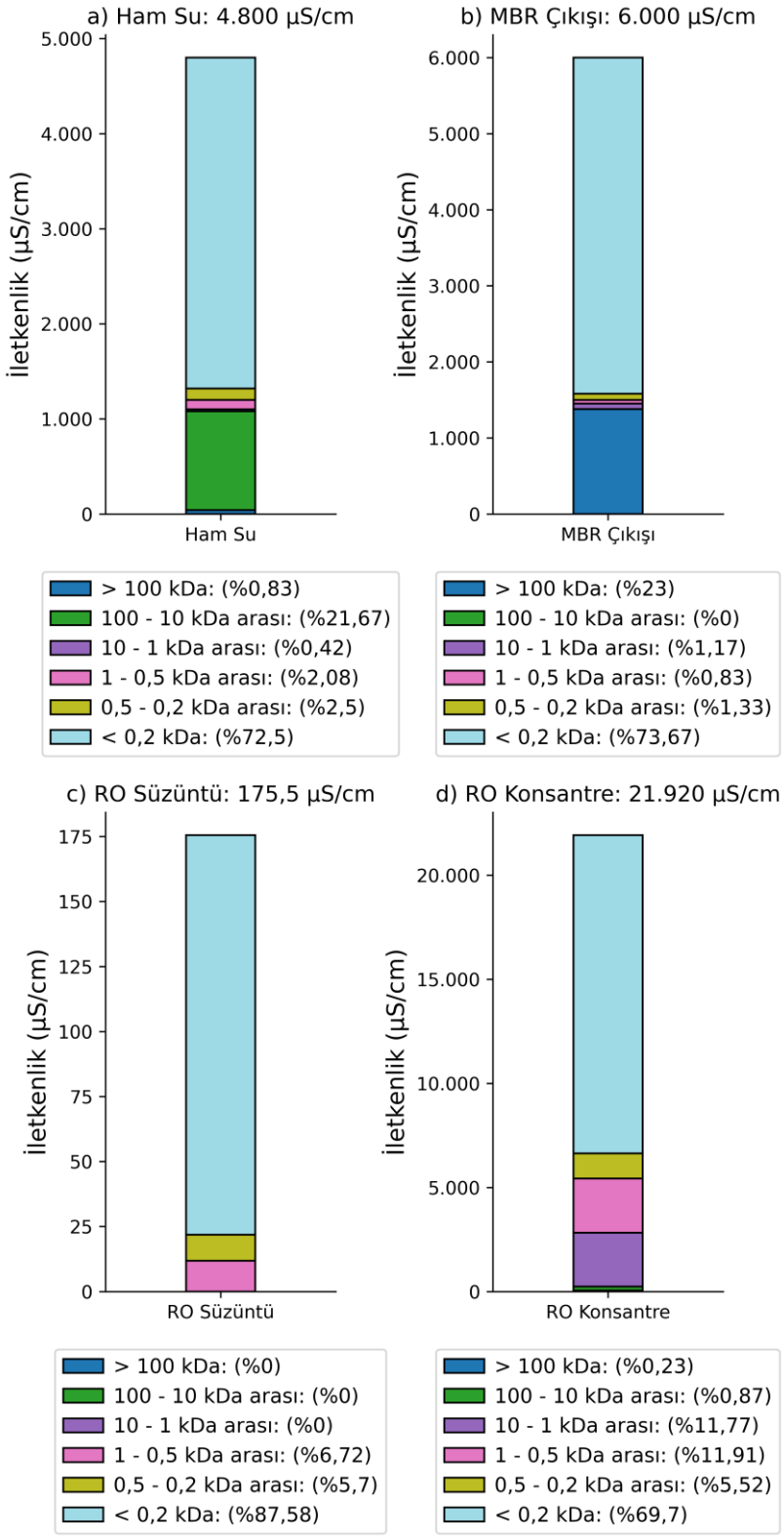
İstanbul'da bulunan bir tekstil firmasına ait arıtma tesisinin tesis girişi, MBR çıkışı, RO çıkışı ve RO konsantre akımlarından numuneler alınmıştır. Numuneler 100, 10, 1, 0,5 ve 0,2 kDa MWCO'ya sahip membranlardan sırasıyla süzülmüş ve elde edilen süzüntülerde pH, iletkenlik, renk, bulanıklık, KOİ, AKM ve sülfat parametreleri analiz edilmiştir.

5.1 İletkenlik

İletkenlik, su numunesindeki elektrik akımını ileten çözünmüş halde bulunan iyonların toplam konsantrasyonunun bir ifadesi olup su kalitesinin değerlendirilmesi için önemli bir parametredir. NF ve RO membranlarının süzüntülerinde iletkenlik değerleri genellikle azalmaktadır ancak bu membranların süzüntülerinde zamanla iletkenlik değerlerinde artış görülmesi membranda tıkanma veya hasar meydana geldiğini göstermektedir [69]. Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de, tekstil atık suyu arıtma tesisi ünitelerinde iletkenliğin moleküler ağırlık dağılımı ve oranları görülmektedir.

Tablo 5.1 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde iletkenliğinin moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (µs/cm)	MBR Çıkışı (µs/cm)	RO Süzüntü (µs/cm)	RO Konsantre (µs/cm)
Giriş	4.800	6.000	175,5	21.920
100 kDa	4.760	4.620	-	21.870
10 kDa	3.720	4.620	-	21.680
1 kDa	3.700	4.550	175,5	19.100
0,5 kDa	3.600	4.500	163,7	16.490
0,2 kDa	3.480	4.420	153,7	15.280



Şekil 5.1 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde iletkenliğinin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyun iletkenlik değeri 4.800 µS/cm iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 4.760 µS/cm'ye düştüğü ve %0,83 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.1-a'da görülmektedir. İletkenliğin %72,5'sinin 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmesi ham suyun iletkenliğinin büyük bir kısmını düşük moleküler ağırlıklı çözünmüş kirleticilerden oluştuğunu göstermektedir.

Ham suyun iletkenliği 4800 µS/cm iken MBR çıkışında bu değer artarak 6.000 µS/cm olmuştur. MBR (MF veya UF membranları), çözünmüş tuzları gidermez ancak zamanla parçalanmış mikroorganizma hücresi içeriğinde bulunan iyonlar (K^+, Na^+, Cl^-, fosfatlar vs.) suya karışabilir ve iletkenlik değerini artırabilir. Ayrıca iyonize olmuş bazı kirleticilerin oksidasyonu da iletkenliği artırabilmektedir. Bu çalışmada da benzer bir durumun gerçekleştiği görülmektedir. Uyanık ve Özkan (2018) tarafından yapılan çalışmada da MBR çıkışında iletkenliğin ham suya kıyasla yüksek olduğu tespit edilmiştir [70]. Yılmaz vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada tekstil atık suları MBR ile arıtılmış ancak iletkenlik giderimi gözlenmemiştir [71].

MBR süzüntü suyunun iletkenlik değeri 6.000 µS/cm iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 4.620 µS/cm'ye düştüğü (Tablo 5.1) ve %23 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.1-b'de görülmektedir. İletkenliğin %73,67'si 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür. İletkenliğe en büyük katkıyı 0,2 kDa'dan düşük (%73,67) moleküler ağırlıklı iyonlar ve tuzlar gibi çözünmüş maddelerin sağladığı görülmektedir. Bu iyonların giderilmesi için genellikle RO prosesi kullanılmaktadır.

RO süzüntü suyunun iletkenlik değeri 175,5 µS/cm iken 0,2 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 153,7 µS/cm (Tablo 5.1) düştüğü ve %12,5 oranında bir azalma olduğu, iletkenliğin %87,5'inin 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçüldüğü Şekil 5.1-c'de görülmektedir. RO membranları ile iletkenlik oluşturan çözünmüş tuzlar %95 üzerinde giderilebilmektedir. Yurtsever vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada tekstil atık suları üç farklı ticari RO membranı ile arıtılmış ve iletkenlik %99 oranında giderilmiştir [72]. Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de görüldüğü üzere literatüre benzer bir durum gözlemlenmekte olup, MBR süzüntüsünün iletkenlik değeri (6.000 µS/cm) dikkate alındığında RO membranı (175,5 µS/cm) ile %97,08 oranında iletkenliğin giderildiği görülmektedir.

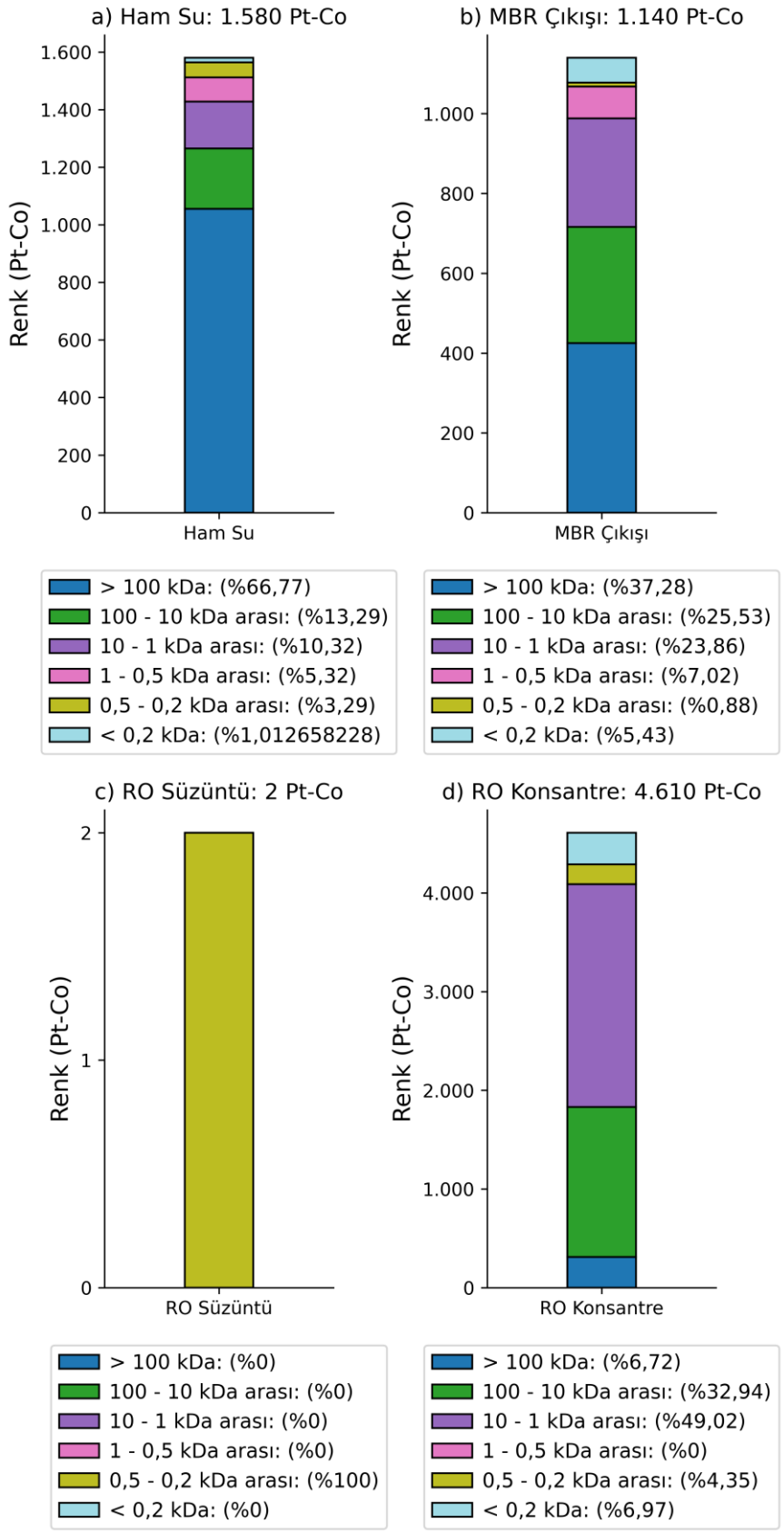
Çözünmüş iyonlar, genelde tekstil proseslerinde kullanılan boyar maddelerin elektrolitleri ve diğer kimyasallardan kaynaklanmaktadır [71], [73], [74], [75]. Besleme suyu içerisinde bulunan iyon ve çözünmüş maddelerin RO membranı tarafından sudan uzaklaştırıldığı ve konsantre akımda bu kirleticilerin birikerek iletkenlik değerini artırdığı Şekil 5.1-d'de görülmektedir. MBR süzüntü suyunda iletkenlik değeri 6.000 µS/cm iken RO konsantre suyunun iletkenlik değeri 21.920 µS/cm'dir. 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen RO konsantre suyunda iletkenlik değerinin 21.870 µS/cm (Tablo 5.1) düştüğü ve %0,23 oranında bir azalma olduğu, iletkenliğin %69,71'inin 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçüldüğü Şekil 5.1-d'de görülmektedir.

Tekstil atık suyunda yoğun olarak bulunan boyar maddeler genellikle 500-1500 Da moleküler ağırlığa sahiptir[76]. Bu moleküler ağırlığa sahip boyar maddelerin boyutları kullanım sonrasında değişmektedir. Bölüm 5.2'de görüldüğü üzere renk gideriminin sağlandığı membranlar ile aynı oranda iletkenlik değerinde önemli bir azalma olmadığı görülmektedir. Bu sebeple, boyar maddelerin iletkenliğe katkısının pek fazla olmadığı kanaatine varılmıştır [77].

Tablo 2.4'de tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanımı için <2.200 µS/cm olması gerektiği önerilmiştir. MBR ve sonrasında 0,2 kDa'dan süzülen suyun iletkenlik değerinin yeniden kullanım için önerilen sınır değeri sağlanamadığı görülmüştür. MBR sonrası RO kullanılarak iletkenlik değeri 175,5 µS/cm kadar düşmüş ve önerilen sınır değer aralığında kalmıştır [44].

5.2 Renk

Renk, suda bulunan organik ve inorganik bileşikler, çözünmüş bileşikler, ağır metaller ve boyaların varlığı ile oluşurken; bulanıklık suda bulunan askıda partiküller, organik maddeler ve mikroorganizmaların varlığı ile meydana gelmektedir. Tablo 5.2 ve Şekil 5.2'de, tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde rengin moleküler ağırlık dağılımı ve oranları görülmektedir.



Şekil 5.2 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde rengin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları

Tablo 5.2 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde rengin moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (Pt-Co)	MBR Çıkışı (Pt-Co)	RO Süzüntü (Pt-Co)	RO Konsantre (Pt-Co)
Giriş	1.580	1.140	2	4.610
100 kDa	525	715	2	4.300
10 kDa	315	424	2	2.780
1 kDa	152	152	2	520
0,5 kDa	68	72	2	520
0,2 kDa	16	62	0	320

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyun renk değeri 1.580 Pt-Co iken 100 kDa MWCO'lu membran süzülen suda 525 Pt-Co'ya düştüğü ve %66,77 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.2-a'da görülmektedir. Rengin %1'i 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür. Tekstil endüstrisinde kullanılan boyar maddeler genellikle 500 Da-1500 Da moleküler ağırlığa sahip olmasına rağmen boyam işlemi sonrasında oluşan atıksuda molekül yapılarında değişimler olduğu ve boyutlarının artarak UF membranları tarafından sudan uzaklaştırılabildiği anlaşılmaktadır. Tekstil boyalarının büyük bir kısmı biyolojik arıtma sistemlerinde giderilmesi zor bileşikler olarak sınıflandırılmaktadır [78]. Bu çalışmada ham atıksuda renk değeri 1.580 Pt-Co iken MBR süzüntüsünde 1.140 Pt-Co değerine düşmüştür. MBR reaktöründe rengin önemli oranda giderilememesi sebebiyle rengi oluşturan kirleticilerin biyolojik olarak parçalanmaya karşı dirençli olduğu anlaşılmaktadır. 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda rengin 715 Pt-Co'ya düştüğü (Tablo 5.2) ve %37,28 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.2-b'de görülmektedir. Rengin %5.44'ü 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür.

RO süzüntü suyunun renk değeri 2 Pt-Co iken 0,2 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 0 Pt-Co'ya (Tablo 5.2) düştüğü ve %100 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.2-c'de görülmektedir. Bu sonuç, RO membranının rengi oluşturan tüm moleküler ağırlık gruplarını (500 Da-1500 Da) %99'un üzerinde giderdiğini göstermektedir.

Jager vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada iki aşamalı MBR-RO hibrit prosesi kullanılarak tekstil atık sularından renk giderimi araştırılmıştır. Çalışmada MBR ile renk parametresinde %38'lik bir azalma görülürken, RO ile arıtım sonrasında ise %99,1 oranında azalma görülmüştür[79]. Zahra ve Gzar (2019) tarafından yapılan çalışmada

MBR-RO hibrit sistemi ile tekstil atık sularının arıtılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada ham atıksudaki 350-450 Pt-Co renk değeri MBR ile %75 oranında giderilirken RO ile %99 oranında giderim verimi elde edilmiştir[80].

RO konsantre suyunun renk değeri 4.610 Pt-Co iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 4.300 Pt-Co'ya (Tablo 5.2) düştüğü ve %6,72 oranında bir azalma olduğu, rengin %49,02'inin 1 kDa membran süzüntüsünde ölçüldüğü Şekil 5.2-d'de görülmektedir. RO ile boyar maddeler %99 oranında sudan uzaklaştırılmış ve membran konsantresinde renk değeri ham atıksuya göre oldukça artmıştırtır.

Yaman vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada pamuk boyama atıksuyundaki renk oluşturan kirleticilerin %89'unun 1 kDa ve daha düşük MWCO'ya sahip olduğu belirtilmiştir [81]. Yurtsever vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada tekstil atıksuyundan NF90 membranı ile %99'un üzerinde renk giderimi sağlandığı rapor edilmiştir [82].

Sonuç olarak, Tablo 5.2 ve Şekil 5.2'de görüldüğü üzer MBR ile MBR süzüntüsünün geçirildiği 0,2 kDa membran çıkışında da renk değeri Tablo 2.4'de önerilen sınır değeri aşmaktadır. Rengi oluşturan kirleticilerin hem biyolojik parçalanmaya dayanıklı ve hem de moleküler ağırlıklarının 0,2 kDa'da kısmen düşük olduğunu göstermektedir. Tablo 2.4'de artıksuların yeniden kullanımı için önerilen renk sınır değeri 50 Pt-Co'dır ve RO süzüntüsünde bu değer 2 Pt-Co'ya düşmektedir. Böylece, atıksuların yeniden kullanımı için MBR ve sonrasında RO membranına ihtiyaç olduğu anlaşılmaktadır.

5.3 Bulanıklık

Bulanıklık, suda bulunan organik maddeler, askıda partiküller ve mikroorganizmalar nedeniyle oluşmaktadır. Tablo 5.3 tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde bulanıklığın moleküler ağırlık dağılımı ve oranları görülmektedir.

Tablo 5.3 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde bulanıklığın moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (NTU)	MBR Çıkışı (NTU)	RO Süzüntü (NTU)	RO Konsantre (NTU)
Giriş	89,1	11,9	-	59,3
100 kDa	2,62	3,82	-	37
10 kDa	2,5	-	-	19
1 kDa	2,23	-	-	10
0,5 kDa	1,9	-	-	5
0,2 kDa	1,5	-	-	2

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham suyun bulanıklık değeri 89,1 NTU iken 100 kDa MWCO'lu membran süzülen suda 2,62 NTU'ya düştüğü ve %97,06 oranında bir azalma olduğu Tablo 5.3'de görülmektedir.

MBR süzüntü suyunun bulanıklık değeri 11,9 NTU iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 3,82 NTU'ya düştüğü (Tablo 5.3) ve %67,90 oranında bir azalma olduğu Tablo 5.3'de görülmektedir. Tekstil atık suyunda bulanıklık oluşturan polisakkarit, hümik asit, anyonik sürfaktanlar gibi kirleticiler bulunmaktadır. Hümik asit atık sularda bulanıklığı oluşturan ana kaynaklardan biri olup yüksek konsantrasyonda hümik asit içeren atıksularda membran ile filtrasyon sonucu süzüntüde bulanıklık gözlenebilmektedir. Tang vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada tekstil atıksuları 30 kDa MWCO'ya sahip UF ve 300 Da MWCO'ya sahip NF membranları ile arıtılmıştır. 160 mg/L hümik asit konsantrasyonuna sahip atıksuda UF çıkışında 0,62 NTU ve NF çıkışında 0,27 NTU bulanıklık tespit edilmiştir. Süzüntüde bulanıklık tespit edilmesinin bazı hümik asit bileşiklerinin oldukça düşük moleküler ağırlığa sahip olması ve membran gözeneklerinden geçebilmesi nedeniyle olduğu belirtilmiştir [83]

RO konsantre suyunun bulanıklık değeri 59,3 NTU iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 37 NTU'ya (Tablo 5.3) düştüğü ve %37,61 oranında bir azalma olduğu Tablo 5.3'de görülmektedir.

Tablo 2.4'de görüldüğü üzere arıtılmış atıksuların tekstil endüstrisinde yeniden kullanılması için <5 NTU olması önerilmektedir. Bu çalışmada da MBR süzüntü suyunun 100 kDa membrandan süzülmesi sonrasında yeniden kullanım için önerilen bulanıklık değeri sağlanmaktadır. MBR sonrası RO süzüntüsünde ise bulanıklık değeri ölçülememiştir. MBR ve sonrasında RO ile bulanıklık sınır değerinin sağlandığı ve yeniden kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

5.4 KOİ

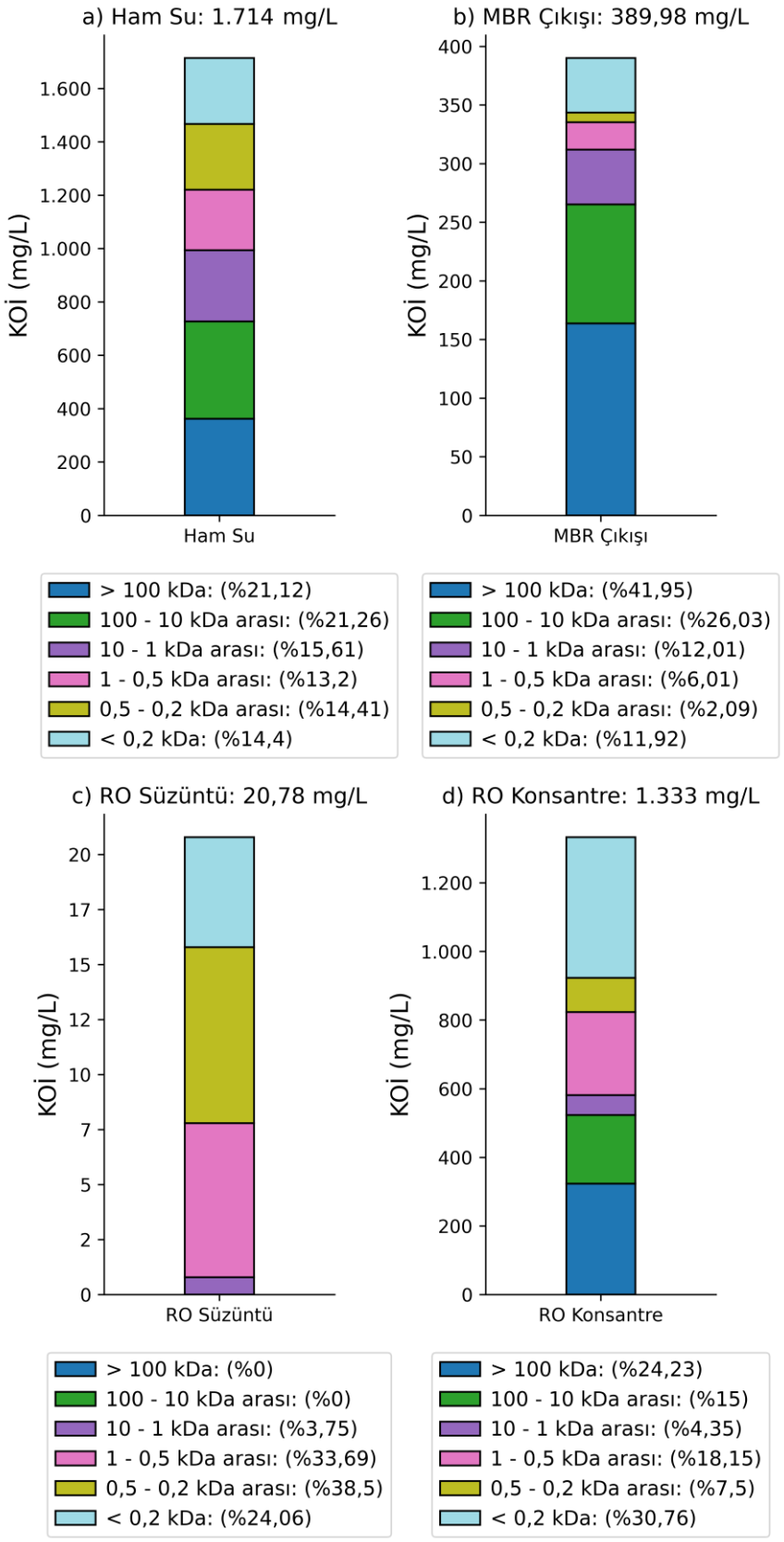
Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde KOİ'nin moleküler ağırlık dağılımı ve oranları Tablo 5.4 ve Şekil 5.3'de görülmektedir.

Tablo 5.4 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde KOİ'nin moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (mg/L)	MBR Çıkışı (mg/L)	RO Süzüntü (mg/L)	RO Konsantre (mg/L)
Giriş	1.714	390	20,78	1.333
100 kDa	1.352	226,4	-	1.010
10 kDa	987,7	124,9	-	810
1 kDa	720,2	78,05	20	752
0,5 kDa	493,8	54,63	13	510
0,2 kDa	246,9	46,48	5	410

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyun KOİ değeri 1.714 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membran süzülen suda 1.352 mg/L'ye düştüğü ve %21,12 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.3-a'da görülmektedir. KOİ'nin %21,26'sı 10 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür.

Ham atıksuyun KOİ değeri 1.714 mg/L'den MBR süzüntüsünde 390 mg/L'ye kadar azalmıştır. MBR reaktöründe organik maddelerin biyolojik olarak parçalanıp son ürünlere dönüşmesi ve MBR membranının (0,03-0,1 μm) gözenek çaplarından daha büyük moleküler ağırlıklı organik maddelerin sudan uzaklaştırılması ile KOİ değerinde azalma olmuştur. MBR süzüntüsünün 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülmesi ile KOİ değerinin 226,4 mg/L'ye düştüğü (Tablo 5.4) ve %41,95 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.3-b'de görülmektedir. 10 kDa membran süzüntüsünde KOİ'nin %26,03'ü ölçülmüştür. Yang vd. (2021) yılında yapılan çalışmada akışkan yataklı biyofilm-MBR prosesi ile %93 oranında KOİ giderimi gerçekleşmiştir [84].



Şekil 5.3 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde KOİ'nin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları

MBR süzüntü suyunda 390 mg/L KOİ var iken bu değer RO süzüntü suyunun 20,78 mg/L'ye kadar azalmış ve %98,8 oranında KOİ giderimi sağlanmıştır. 0,2 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda KOİ değeri 5 mg/L'ye (Tablo 5.4) düştüğü ve %38,50 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.3-c'de görülmektedir.

RO konsantre suyunun KOİ değeri 1.333 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 1.010 mg/L'ye (Tablo 5.4) düştüğü ve %24,23 oranında bir azalma olduğu, KOİ'nin %30,76'sinin 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçüldüğü Şekil 5.3-d'de görülmektedir.

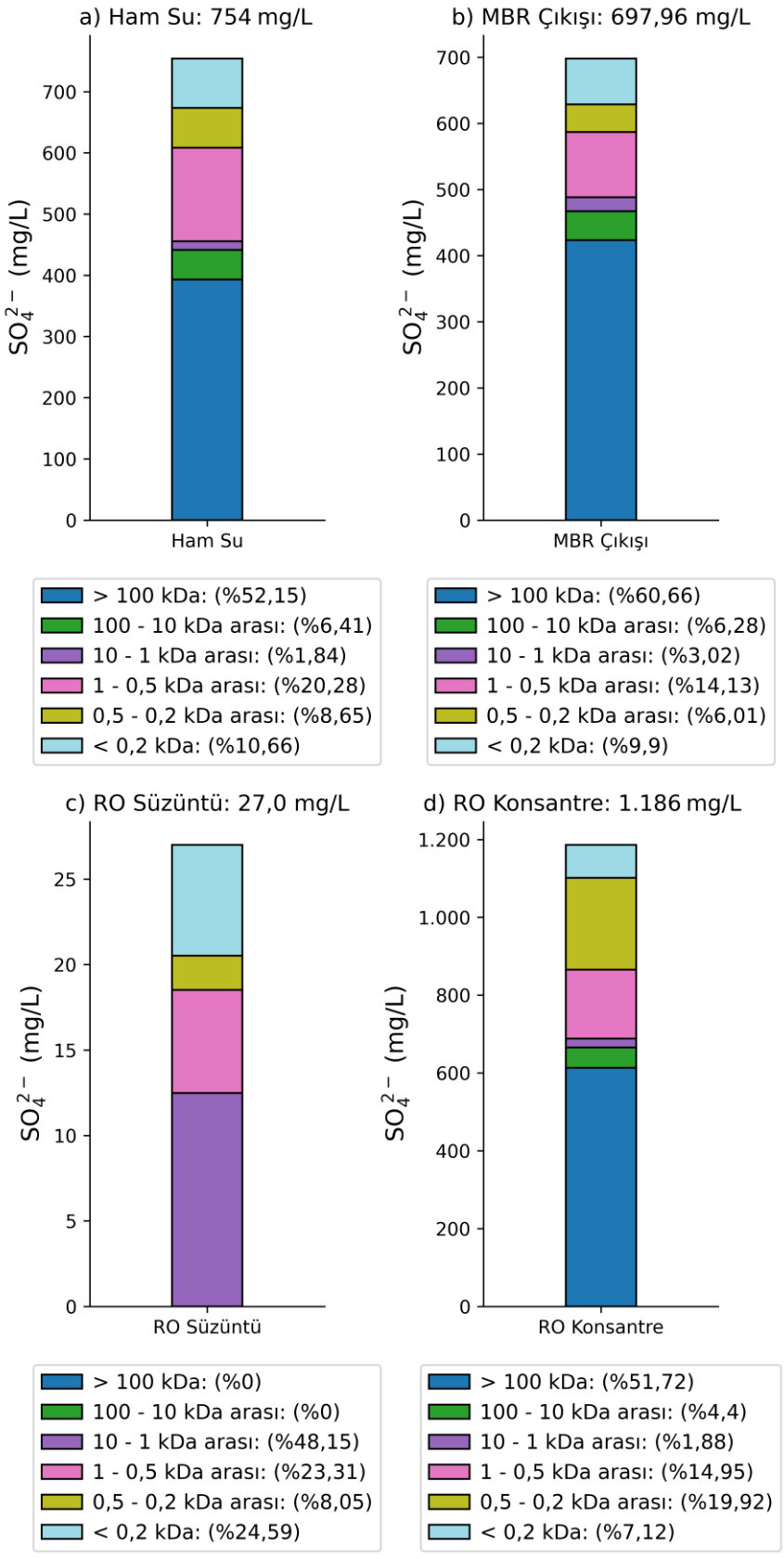
Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanılması için önerilen KOİ değeri Tablo 2.4'de görüldüğü üzere <160 mg/L'dir. MBR süzüntüsü ile bu değerin sağlanamadığı ancak MBR çıkış suyunun 10 kDa membrandan süzülmesi ile bu değerin sağlanabildiği görülmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada tekstil atıksuyunda MBR ve RO kombinasyonuyla KOİ giderimi %98,8 düzeyine ulaşmış ve önerilen KOİ değeri sağlanmaktadır.

5.5 Sülfat

Tekstil atık suyu arıtma tesisi ünitelerinde sülfatın moleküler ağırlık dağılımı ve oranları Tablo 5.5 ve Şekil 5.4'de görülmektedir.

Tablo 5.5 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde sülfatın moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (mg/L)	MBR Çıkışı (mg/L)	RO Süzüntü (mg/L)	RO Konsantre (mg/L)
Giriş	753,95	698	27	1.186
100 kDa	360,8	274,6	-	572,6
10 kDa	312,5	230,7	-	520,3
1 kDa	298,6	209,6	14,52	498
0,5 kDa	145,7	111	8,48	320,7
0,2 kDa	80,36	69,01	6,40	84,46



Şekil 5.4 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde sülfatın moleküller ağırlık dağılımına göre oranları

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyun sülfat konsantrasyonu 753,95 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membran süzülen suda 360,8 mg/L'ye düştüğü ve %52,15 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.4-a'da görülmektedir. Sülfatın %10,66'sı 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür.

Ham atıksuyun 753,95 mg/L iken MBR süzüntüsünde bu değer 698 mg/L'ye kadar azalmıştır. 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda sülfat konstrasyonu 274,6 mg/L'ye düştüğü (Tablo 5.5) ve %60,66 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.4-b'de görülmektedir. Sülfatın %9,89'u 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçülmüştür.

MBR süzüntüsünde sülfat konsantrasyonu 698 mg/L iken RO süzüntü suyunda 27 mg/L'ye kadar azalmış ve %96,13 oranında giderilmiştir. 1 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda sülfat konsantrasyonu 14,52 mg/L'ye (Tablo 5.5) düştüğü ve %46,22 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.4-c'de görülmektedir.

RO konsantre suyunun sülfat değeri 1.186 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda 572,6 mg/L'ye (Tablo 5.5) düştüğü ve %51,72 oranında bir azalma olduğu, sülfatın %19,52'sinin 0,2 kDa membran süzüntüsünde ölçüldüğü Şekil 5.4-d'de görülmektedir.

Firdaus vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada yüksek sülfat konsantrasyonuna sahip biyodizel atık sularında NF2-4040 nanofiltrasyon membranı ile %73,95 giderim verimi elde edilmiştir [85].

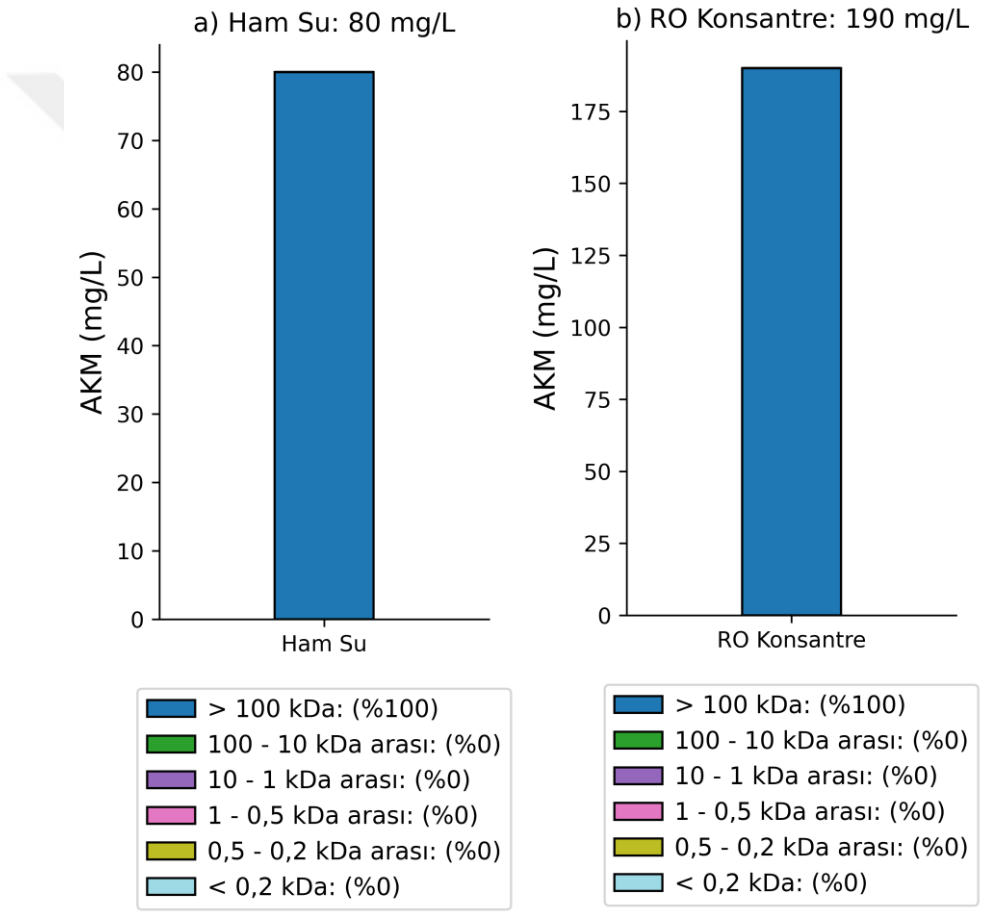
Tablo 2.4'de tekstil endüstrisinde arıtılmış atıksuların yeniden kullanılması için önerilen sülfat konsantrasyonu 100 mg/L'dir. MBR sonrasında 0,2 kDa membran süzüntüsünde önerilen sınır değerin sağlandığı görülmektedir. MBR ve sonrasında RO ile Tablo 2.4'de önerilen sınır değeri sağlanmaktadır.

5.6 AKM

Tekstil atık suyu arıtma tesisi ünitelerinde AKM'nin moleküler ağırlık dağılımı ve oranları Tablo 5.6 ve Şekil 5.5'da görülmektedir.

Tablo 5.6 Tekstil atıksuyu arıtma tesisi ünitelerinde AKM'nin moleküler ağırlık dağılımı

	Ham su (mg/L)	MBR Çıkışı (mg/L)	RO Süzüntü (mg/L)	RO Konsantre (mg/L)
Giriş	80	<1	<1	190
100 kDa	<1	<1	<1	<1
10 kDa	<1	<1	<1	<1
1 kDa	<1	<1	<1	<1
0,5 kDa	<1	<1	<1	<1
0,2 kDa	<1	<1	<1	<1



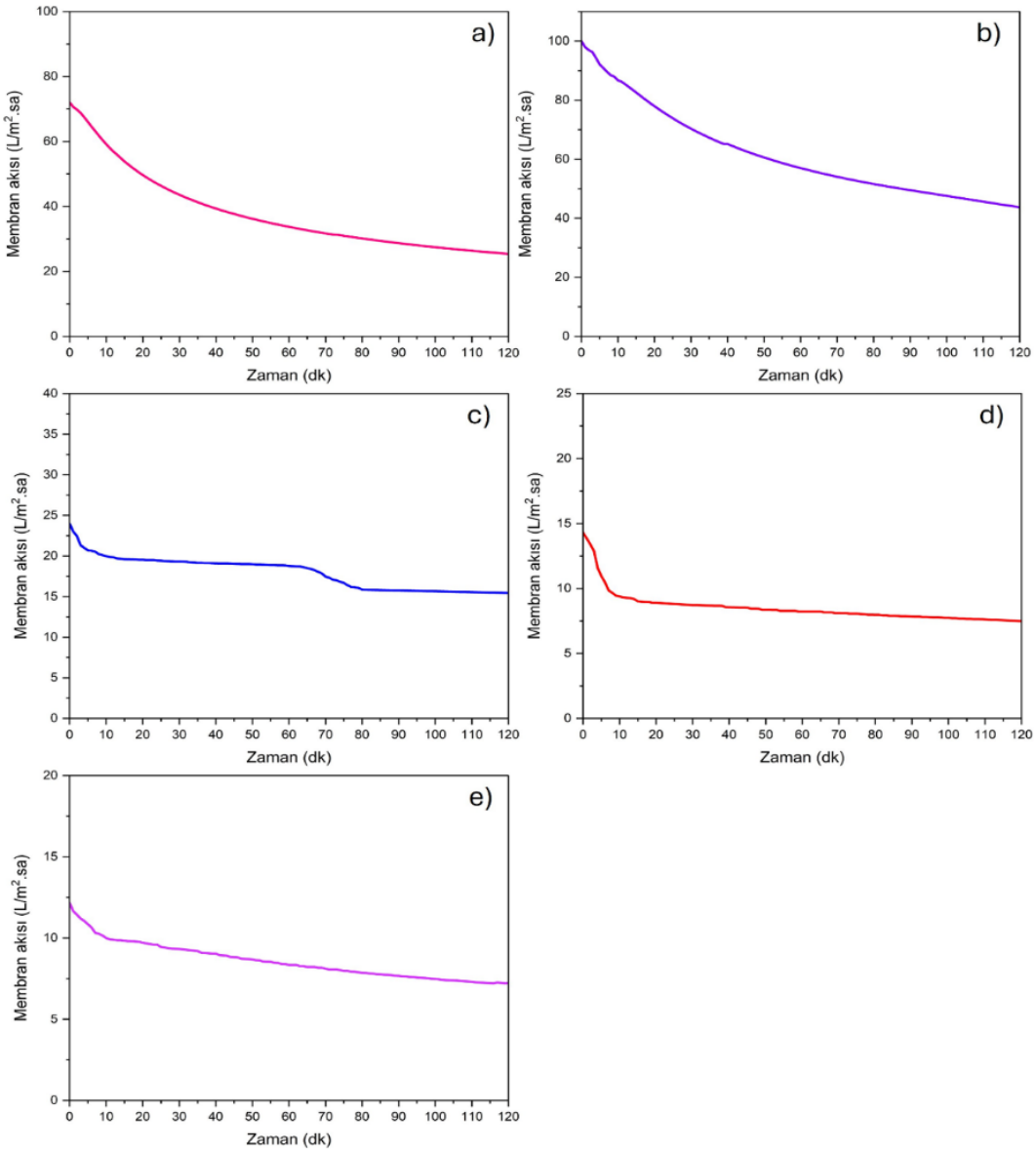
Şekil 5.5 Tekstil atıksuyu arıtma ünitelerinde AKM'nin moleküller ağırlık dağılımına göre oranları

Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyun AKM değeri 80 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membran süzülen suda <1 mg/L'ye düştüğü ve yaklaşık %100 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.5-a'da görülmektedir. RO konsantre suyunun AKM değeri 190 mg/L iken 100 kDa MWCO'lu membrandan süzülen suda <1 mg/L'ye (Tablo 5.6) düştüğü ve %100 oranında bir azalma olduğu Şekil 5.5-b'de

görülmektedir. Tablo 5.6'da görüldüğü üzere AKM'nin tamamı >100 kDa gözenek çapından daha büyük ebatta sahiptir. Tablo 2.4'de tekstil endüstrisinde AKM konsantrasyonu <5 mg/L olması önerilmektedir. MBR süzüntü suyunda bu değer <1 mg/L'dir ve yeniden kullanım için uygundur. Sonuç olarak MBR ve RO ile arıtılan su AKM konsantrasyonu açısından yeniden kullanım için uygundur.

5.7 Membranların Akıları

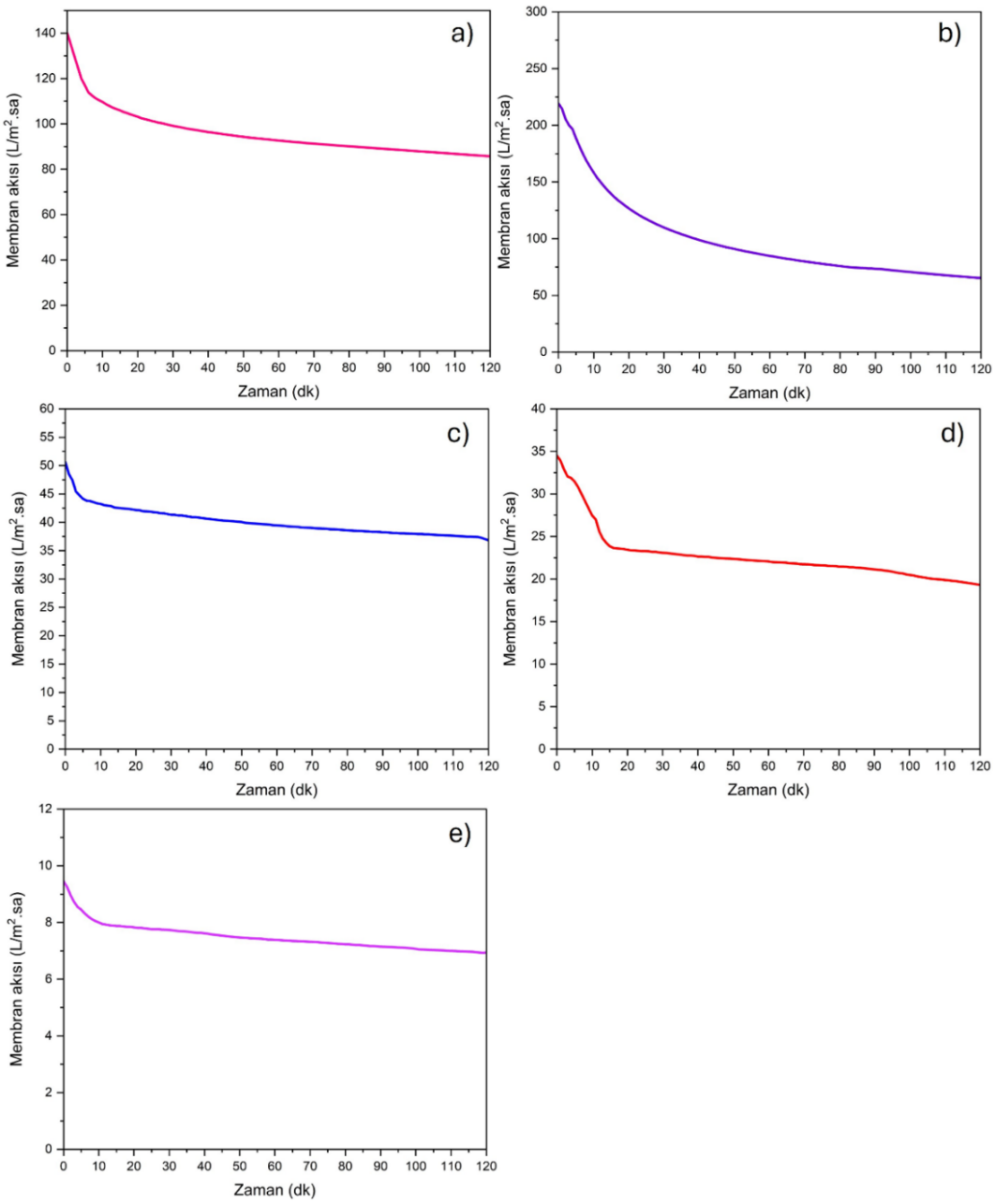
Dengeleme tankı çıkışından temin edilen ham atıksuyunun moleküler ağırlık dağılımı çalışmasında kullanılan membranların akı değerleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Ham atıksuyun moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa

100 kDa'ya sahip membranda başlangıç akısı 72 LMH (L/m^2.saat) iken akıda düşüş gözlenmiş ve membran akısı 30 LMH civarında sabit kalmıştır. Akıdaki düşüşün atık suda bulunan büyük moleküler ağırlıklı organik bileşiklerin membran yüzeyinde birikerek akıyı azalttığı düşünülmektedir. Ham suya ilişkin su kalitesi parametreleri incelendiğinde KOİ oluşturan bileşiklerin %21,6'sının ve AKM oluşturan askıda organik partiküllerin tamamının bu membran ile tutulduğu görülmektedir. 10 kDa MWCO'ya sahip membranda akı 2 saat içinde 100 LMH'dan 43,7 LMH'a düşmüştür. Membran gözenek boyutunun daha düşük olmasına rağmen akının yüksek olmasının sebebi askıda partiküllerin tamamının 100 kDa membranıyla tutulmasının olduğu düşünülmektedir. 1 kDa MWCO'ya sahip membranda başlangıç akısı 24 LMH iken iki saatin sonunda 15,49 LMH'a düşmüştür. 0,5 ve 0,2 kDa MWCO'ya sahip membranlarda ortalama membran akıları sırasıyla 8,51 ve 8,58 LMH'tır. İki membranda da çalışmanın ilk 15 dakikasında akıda bir düşüş meydana gelmiş ve daha sonra akı stabildir.

Şekil 5.7'de MBR süzüntü suyunun moleküler ağırlık dağılımı çalışmasında kullanılan membranların akılarının 2 saatlik süredeki değişimi görülmektedir. MBR süzüntü suyu, biyolojik arıtma sonrası elde edilen, ham atıksuya kıyasla daha düşük partiküller madde ve organik madde konsantrasyonuna sahiptir. Tüm membranlarda membran yüzeyinde kirletici birikimi nedeniyle akı ilk 20 dakika içinde azalmış sonra daha stabil hale gelmiştir. Ham sudan farklı olarak 100 ve 10 kDa membranlarda ortalama akılar benzer ve sırasıyla 95,80 ve 98,29 LMH'dır MBR'da bulunan MF membranı ile askıda katı maddelerin tamamı sudan uzaklaştırılmaktadır. Bu nedenle 100 kDa MWCO'ya sahip membranda AKM'ye bağlı bir tıkanma olmadığı düşünülmektedir. 1 kDa membranında ortalama akı 40,06 LMH'dır. Ham atıksu ile kıyaslandığında MBR süzüntüsündeki düşük kirlilik yükü nedeniyle aynı gözenek çapına sahip membrana göre akının daha yüksek olduğu görülmektedir. 0,5 ve 0,2 kDa gözenek çaplı membranlarında da akı daha düşük olsa da ham atıksu ile kıyaslandığında daha yüksek akılar elde edilmiştir.

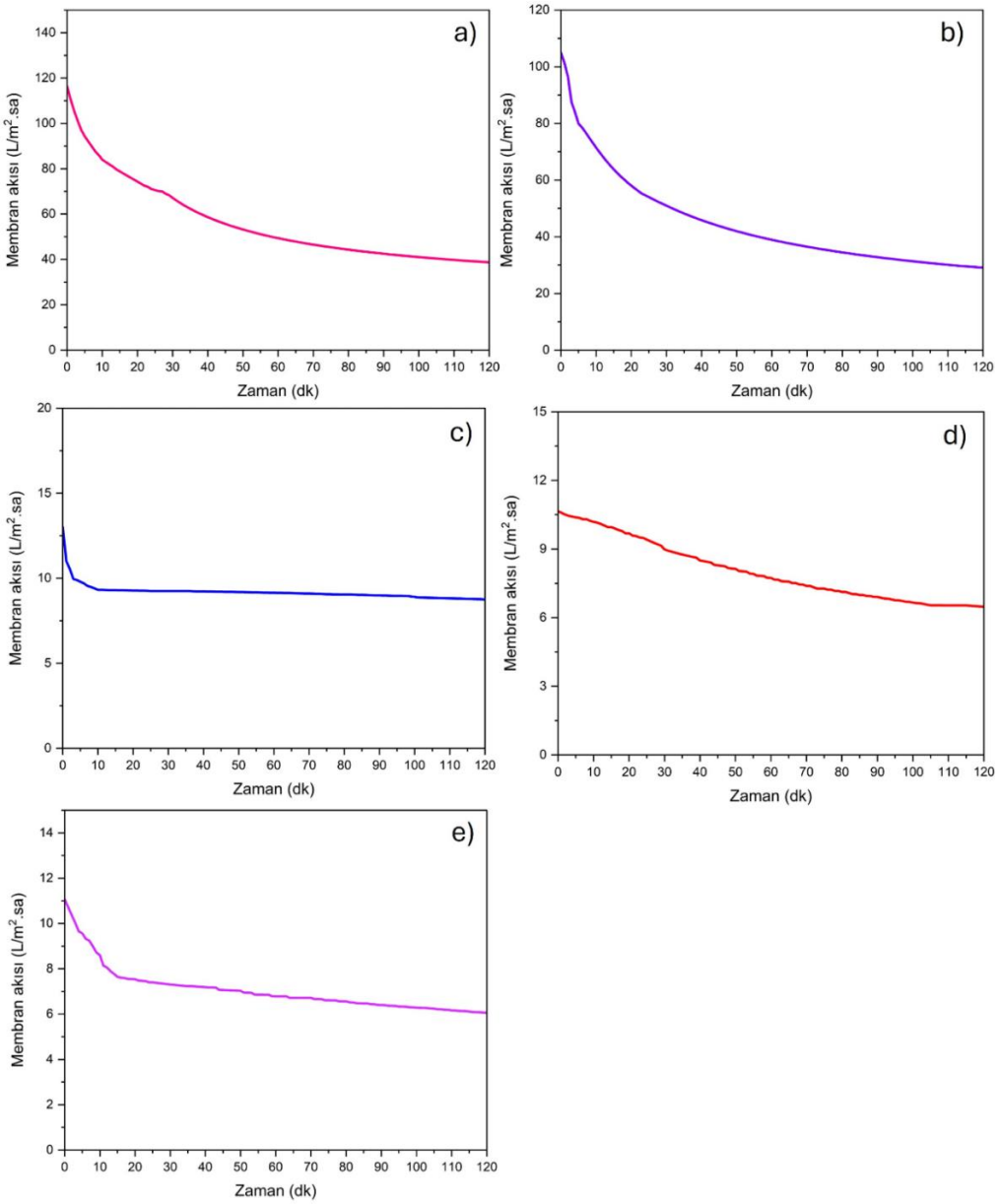


Şekil 5.6 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları MBR Çıkış – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa

Şekil 5.8'de RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımı çalışmasında kullanılan membranların akılarının 2 saatlik süredeki değişimi gösterilmiştir. 100 kDa membran, başlangıçta 116 LMH akı sağlasa da, yüksek kirletici yükü ve partikül birikimi nedeniyle ilk 30 dakikada akı %42,2 azalarak 67,1 LMH'a düşmüştür.

120 dakika sonunda akı 38,0 LMH düşmüş ve ortalama akı 42,90 LMH olarak görülmüştür. 10 kDa membranın başlangıç akısı 105 LMH akı olup osmotik basınç ve iyonik etkileşimler nedeniyle akı, ilk 30 dakikada %39,2 (63,8 LMH) ve 120

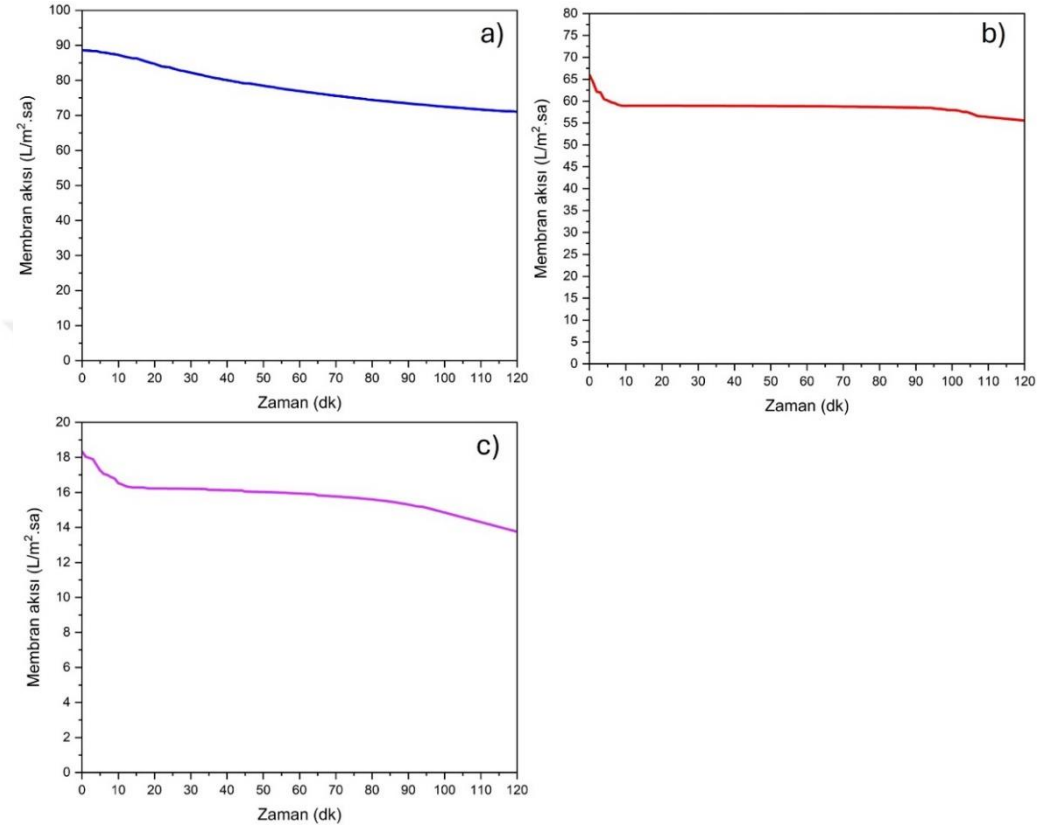
dakikada %72,3 (29,1 LMH) azalmıştır. Ortalama akı 44,68 LMH olmuştur. 1 kDa MWCO'ya sahip membranda başlangıç akısı 13 LMH iken, 30 dakikada %28,5 (9, LMH) ve 120 dakikada %41,5 (7,6 LMH) düşüş gözlenmiştir. 2 saat sonundaki ortalama akı 9,06 LMH olmuştur. 0,5 ve 0,2 kDa MWCO'ya sahip membranların ortalama akıları sırasıyla 8,04 ve 7,06 LMH olmuştur.



Şekil 5.7 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 100 kDa b) 10 kDa c) 1 kDa d) 0,5 kDa e) 0,2 kDa

RO membranı ile iyonlar da sudan uzaklaştırıldığı için RO konsantrenin iletkenlik değeri ham suya kıyasla oldukça yüksektir (21,920 µS/cm). Bu nedenle RO konsantre suyunun süzüldüğü membranlarda ortalama akıların ham suya göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 5.9'da RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımı çalışmasında kullanılan membranların akılarının 2 saatlik süredeki değişimi gösterilmiştir. RO süzüntüsünün kirletici konsantrasyonları diğer numunelerle kıyaslandığında oldukça düşüktür. Kirlilik konsantrasyonun düşük olması membran tıkanma riskini azaltmakta ve membran akılarının daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

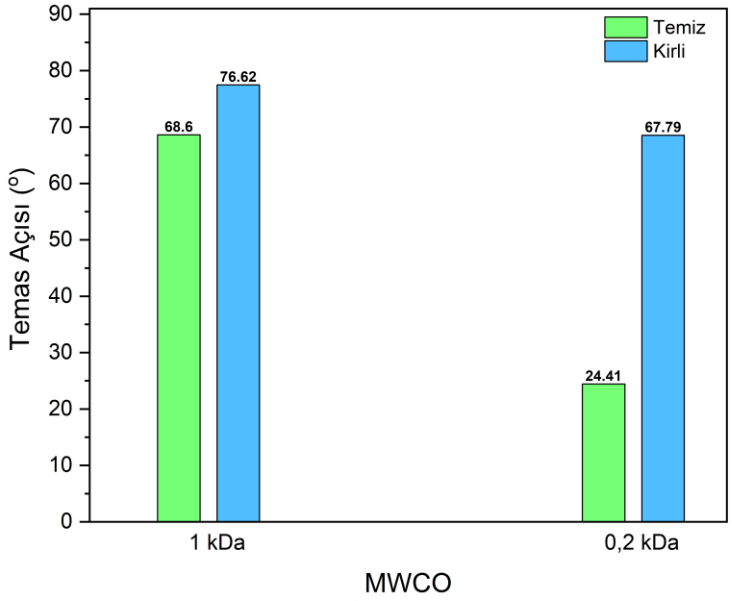


Şekil 5.8 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların akıları – a) 1 kDa b) 0,5 kDa c) 0,2 kDa

1 kDa membranın akısı 88,6 LMH olarak ölçülmüş, 120 dakika sonunda 71,0 LMH'a düşerek ortalama 78,16 LMH değerine ulaşmıştır. Diğer numunelerle karşılaştırıldığında bu membranda en yüksek akı RO süzüntüsünde elde edilmiştir. 0,5 kDa Membran için başlangıç akısı 65,97 LMH iken, 120 dakika sonunda 58,6 LMH'a hafif bir düşüş gözlenmiş ve ortalama akı 58,60 LMH olarak kaydedilmiştir. 0,2 kDa MWCO'ya sahip membranda ise başlangıç akısı 18,3 LMH olup 120 dakika sonunda 15,7 LMH'a düşmüş ve ortalama akı 15,74 LMH olmuştur.

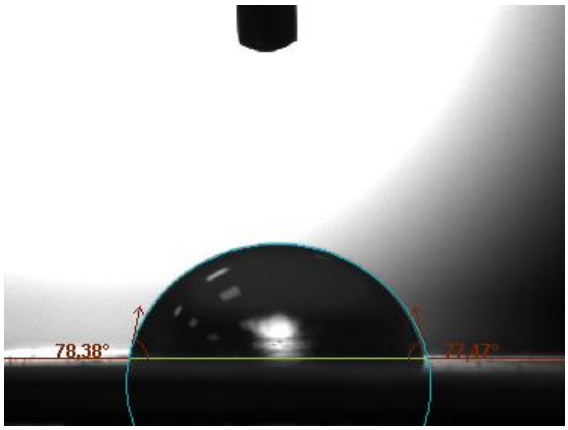
5.8 Temas Açısı

RO süzüntünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.9 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları

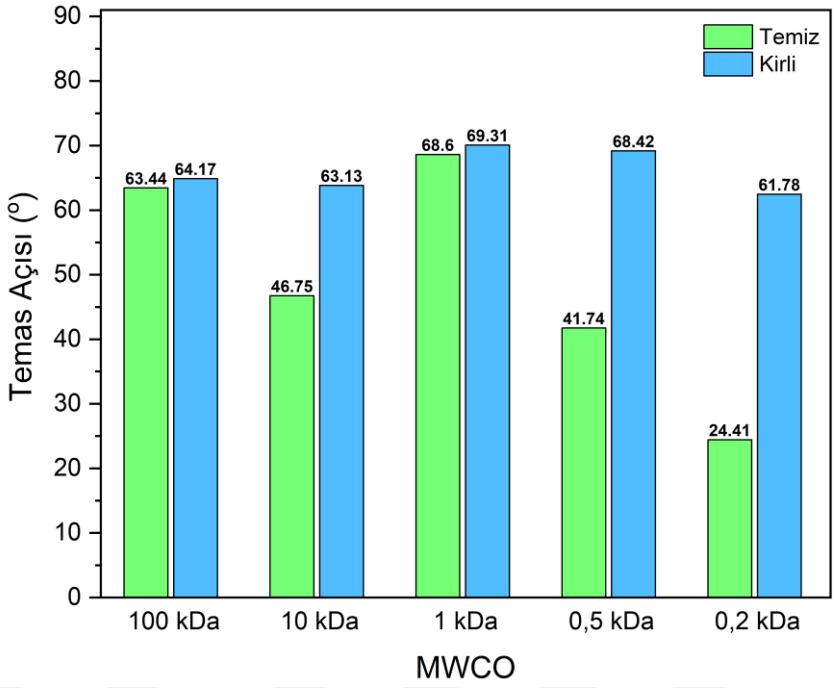
Şekil 5.10 RO süzüntü suyu için kullanılan membranların ve Şekil 5.11'de, RO süzüntüsünden elde edilen tekstil atık suyuna ait bir 1 kDa gözenek çapına sahip membranın temas açısı yer almaktadır. Temas açısı ölçümü, membranın yüzey hidrofobikliğini değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Ölçülen temas açıları 78,38° ve 77,47° olup, temiz membranın temas açısı ile kıyaslandığında belirgin bir artış olduğu görülmektedir.



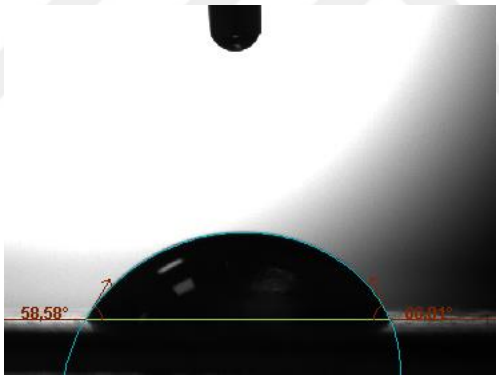
Şekil 5.10 RO süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 1 kDa membranın temas açısı

RO süzüntüsündeki kirleticilerin membran yüzeyinde birikmesi sonucu temas açıları artmıştır.

MBR çıkış suyu moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de görülmektedir.



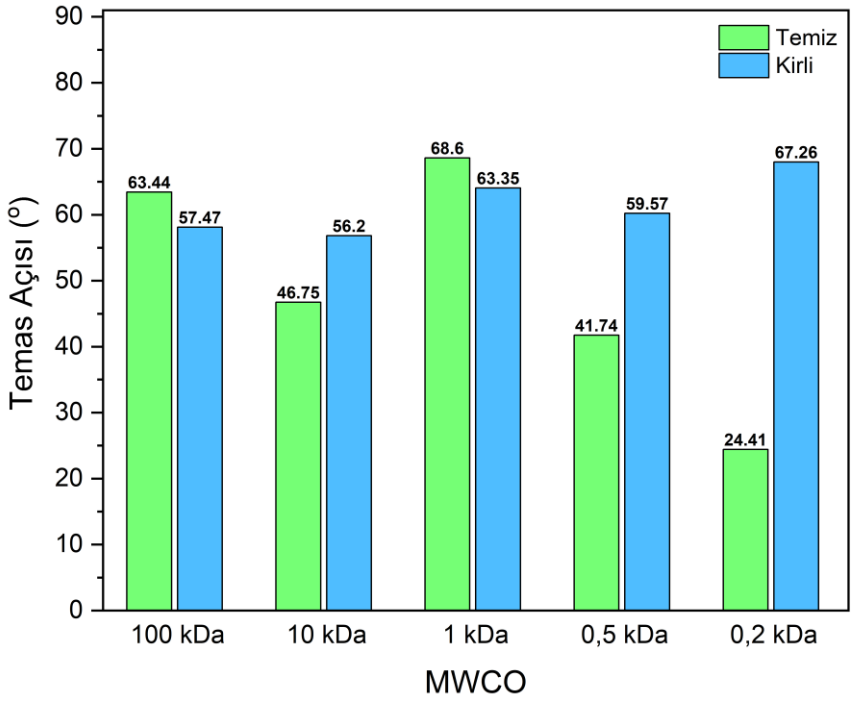
Şekil 5.11 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları



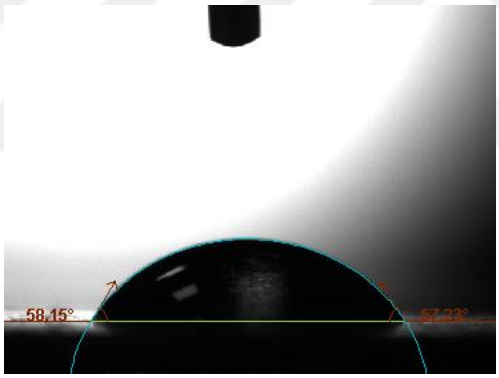
Şekil 5.12 MBR süzüntüsünün moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 100 kDa membranın temas açısı

Şekil 5.12 MBR süzüntü suyu için kullanılan membranların ve Şekil 5.13'de, MBR süzüntüsünde kullanılan 100 kDa gözenek çapına sahip membranın temas açısı ölçümünü yer almaktadır. Temiz membran için ölçülen temas açısı 63,3° olup, bu membranın başlangıçta hidrofilik karakterde olduğunu göstermektedir. Şekil 5.13'de temas açısı 58,58° ve 66,01° olarak ölçülmüştür. Literatürde, organik kirleticiler, biyolojik birikimler ve inorganik tortuların membran yüzeyinde birikerek temas açısını artırabileceği belirtilmiştir [86].

RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de görülmektedir.



Şekil 5.13 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları

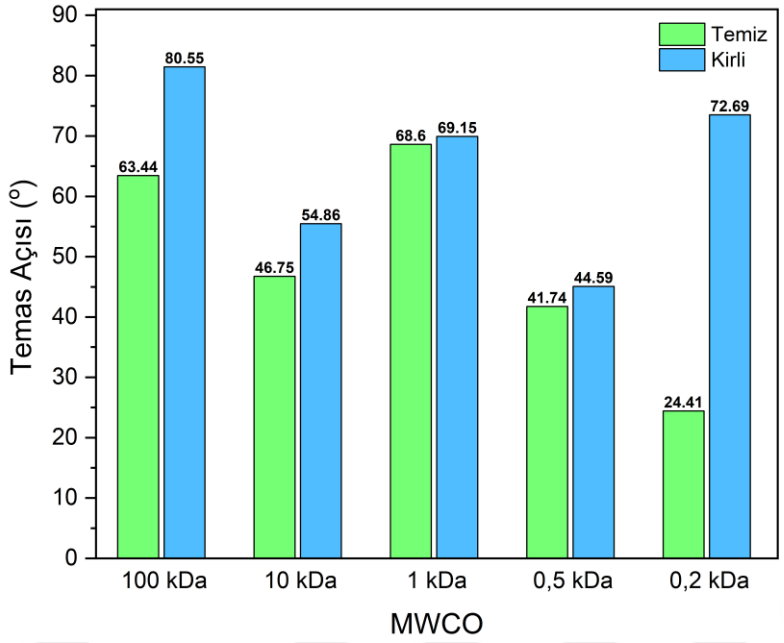


Şekil 5.14 RO konsantresinin moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 100 kDa membranın temas açısı

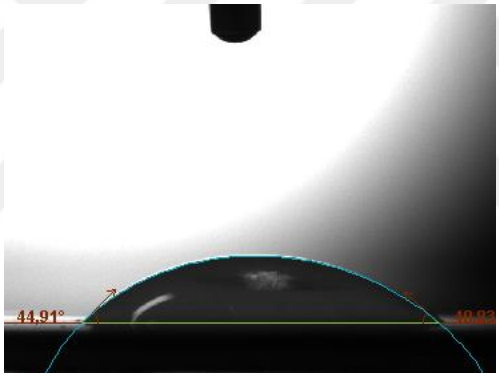
Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de, RO konsantresinden elde edilen tekstil atık suyuna ait bir 100 kDa gözenek çapına sahip membranın temas açısı ölçümünü göstermektedir. Temiz membranın temas açısı 57,475° olarak verilmektedir.

Temiz membrana kıyasla temas açısında önemli bir değişim görülmemiştir. Ancak, küçük farklar bile membran yüzeyinde biyo-kirlenme (biofouling), organik kirlenme veya inorganik çökelme gibi sorunların işareti olabilir [87], [88].

Ham tekstil suyunun moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.15 Ham atıksuyun moleküler ağırlık dağılımında kullanılan membranların temas açıları



Şekil 5.16 Ham atıksuların moleküler ağırlık dağılımında kullanılan 0,5 kDa membranın temas açısı

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de, ham suyundan elde edilen tekstil atık suyuna ait bir 0,5 kDa gözenek çapına sahip membranın temas açısı ölçümünü göstermektedir. Temiz membranın temas açısı 44,59 ° olarak verilmektedir.

Zhao vd. (2025) yılında yapılan çalışmada poliester (PE) ve poliamid (PA) materyale sahip iki nanofiltrasyon membranı ile tekstil atık sularının arıtımı sonrası membran tıkanması ve geri yıkama stratejileri üzerine yoğunlaşılmıştır. Filtrasyon sonrası iki membranın da temas açılarında artma gözlenmiştir. Temas açısındaki artışın nedeninin membran yüzeyinde kirletici ve boya birikimi olduğu belirtilmiştir. Membranlarda geri yıkama yapıldıktan sonra temas açısında düşüş gözlendiği görülmüştür [89]. Çalışmada, kullanılan membran materyalinin membran yüzeyinde madde birikimi üzerindeki etkisi olduğu belirtilmiştir.

Filtrasyon sonrası PE membranının temas açısının PA membranına kıyasla yüksek olmasının Congo red gibi bazı boyaların PE membranı yüzeyinde daha fazla birikmesi sonucu olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde, moleküler ağırlık dağılımı çalışmasında kullanılan membranlar farklı materyallere sahip olup bazı membranlarda filtrasyon sonrası temas açısının daha fazla yükselmesinin membran yüzeyinde tutulan kirletici maddeler ve boyalar ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

6
SONUÇ

Günümüzde sanayileşme ve nüfusun hızla artması sonucu insanların tüketim alışkanlıkları değişmektedir. Tekstil ürünleri de alışkanlıkların değişmesinde önemlidir. Tekstil, su tüketimi ve atıksu oluşumu fazla olan endüstrilerdendir. Bu çalışma kapsamında İstanbul'da bulunan bir tekstil firmasından ham atıksu, MBR çıkış suyu, RO süzüntü suyu ve RO konsantre suları temin edilmiştir. Temin edilen 4 farklı atıksu 100 kDa, 10 kDa, 1 kDa, 0,5 kDa ve 0,2 kDa MWCO'lara sahip 5 farklı membrandan geçirilip iletkenlik, renk, bulanıklık, KOİ, sülfat ve AKM analizleri gerçekleştirilmiş olup bu kirleticilerin moleküler ağırlık dağılım analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

İletkenliğin ham atıksuda %72,5'i, MBR süzüntüsünde %73,67'si, RO süzüntüsünde %87,58'i ve RO konsantresinde ise %69,71'i 0,2 kDa membrandan geçmiştir. Bu verilere göre 0,2 kDa membrandan süzülen suda iletkenliği oluşturan kirleticilerin genellikle tek değerlikli iyonlardan oluştuğu düşünülmektedir. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanımı için önerilen iletkenlik değeri MBR ve sonrasında 0,2 kDa membrandan süzülen suda sağlanmamaktadır. Arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı için sınır değer sadece RO süzüntüsünde sağlanmıştır.

Rengin ham atıksuda %90,38'i, MBR süzüntüsünde %86,67'si, RO süzüntüsünde %0'ı ve RO konsantresinde ise %88,72'si 1 kDa membran ile sudan uzaklaştırılmıştır. Rengi oluşturan kirleticilerin moleküler ağrılıklarının genellikle 1 kDa ve üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanımı için önerilen renk değeri MBR ve sonrasında 0,2 kDa membrandan süzülen suda sağlanmamaktadır. Arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı için sınır değer sadece RO süzüntüsünde sağlanmıştır.

Bulanıklığın ham atıksuda %97,06'sı, MBR süzüntüsünde %67,90'ı ve RO konsantresinde ise %37,61'i 100 kDa membran ile sudan uzaklaştırılmıştır. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanımı için önerilen bulanıklık değeri MBR ve sonrasında 100 kDa membrandan süzülen suda ve RO süzüntüsünde sağlanmıştır.

KOİ'nin ham atıksuda %21,12'si, MBR süzüntüsünde %49,95'i ve RO konsantresinde ise %24,23'ü 100 kDa membran ile ve ham atıksuda %85,60'ı, MBR süzüntüsünde %88,08'i, RO süzüntüsünde %75,94'ü ve RO konsantresinde ise %69,24'ü 0,2 kDa membranla sudan uzaklaştırılmıştır. Organik maddelerin önemli oranda çözünmüş formda olduğu anlaşılmaktadır. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanılması için önerilen KOİ değeri MBR süzüntüsü ile sağlanamadığı ancak MBR çıkış suyunun 10 kDa membrandan süzülmesiyle sağlanabildiği görülmektedir. MBR ve RO kombinasyonuyla KOİ giderimi %98,8 düzeyine ulaşmış ve arıtılmış atıksularının yeniden kullanım önerilen KOİ değeri sağlanmaktadır.

Sülfatın ham atıksuda %47,85'i, MBR süzüntüsünde %60,66'sı ve RO konsantresinde ise %51,72'si 100 kDa membran ile ve ham atıksuda %89,34'ü, MBR süzüntüsünde %90,11'i, RO süzüntüsünde %76,30'u ve RO konsantresinde ise %92,88'i 0,2 kDa membranla sudan uzaklaştırılmıştır. Sülfatın önemli bir kısmı 0,2 kDa ve üzerinde moleküler ağırlığa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanılması için önerilen sülfat değeri MBR süzüntüsü ile sağlanamadığı ancak MBR çıkış suyunun 0,2 kDa membrandan süzülmesiyle sağlanabildiği görülmektedir. MBR ve RO kombinasyonuyla sülfat giderimi %96,41 düzeyine ulaşmış ve arıtılmış atıksularının yeniden kullanım önerilen sülfat değeri sağlanmaktadır.

Moleküler ağırlık dağılımı için kullanılan membranlar tarafından ham atıksuda, MBR süzüntüsünde ve RO konsantresinde 100 kDa membran ile AKM hemen hemen %100 oranında sudan uzaklaştırılmıştır. Tekstil boyama endüstrisinde atıksuların yeniden kullanımı için önerilen AKM konsantrasyonu MBR ile RO membranları süzüntüleri ile kullanılan tüm moleküler ağırlık membranları ile sağlanmıştır.

Kirletici konsantrasyonları ile membranların moleküler ağırlıkları akı değerleri üzerinde etkili olduğu literatürde belirtildiği üzere bu çalışma sonuçları ile de görülmüştür.

Moleküler ağırlık azaldıkça membran yüzeyinde biriken kirleticilerin membranların temas açılarını daha fazla artırdığı görülmektedir. Ancak, 100 kDa gibi düşük moleküler ağırlıklı membranlarda ise bu temas açısının çok daha düşük oranda değiştiği görülmektedir.

Moleküler ağrılık dağılımı analiz sonuçlarına göre boyama atıksularının yeniden kullanılabilmesi iletkenlik, renk ve sülfat parametreleri için önerilen sınır değerlerin sağlanması amacıyla MBR sonrasında RO membranlarına ihtiyaç olduğu görülmektedir.

KAYNAKÇA

[1] X. Wang, J. Jiang, ve W. Gao, "Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies", *Water Science and Technology*, c. 85, sy 7, ss. 2076-2096, Mar. 2022, doi: 10.2166/wst.2022.088.

[2] S. Khan ve A. Malik, "Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater", *Environmental Deterioration and Human Health: Natural and Anthropogenic Determinants*, ss. 55-71, Eki. 2013, doi: 10.1007/978-94-007-7890-0_4.

[3] B. Şahin, *Kot kumaş üretimi & kalite*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2017.

[4] Ö. Kahraman, "Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirliği," Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye, 2019.

[5] A. Z. Çelik, "Denim Çözgü İpliği Atıklarından Pre Consumer İplik Elde Ederek Denim Kumaş Üretilmesi ve Kumaş Performans Değerlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 2022.

[6] Ö. Kahraman, "Kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.

[7] *Topic: Denim market worldwide*, Statista. [Çevrimiçi]. Erişim: 01 Şubat 2025. Erişim adresi: https://www.statista.com/topics/5959/denim-market-worldwide/

[8] T.C. Ticaret Bakanlığı, Tekstil ve Hammaddeleri Sektör Raporu 2022. [Çevrimiçi].Erişim:https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Tekstil%20ve%20Hammaddeleri%20Raporu%202022.pdf, 2025.

[9] C. Öztürk ve E. İ. Develi, "Denim işletmelerinde sürdürülebilirlik stratejilerinin pazarlamada ürün geliştirme ve fiyatlandırmadaki rolü üzerine derinlemesine mülakat," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Dış Ticaret Dergisi*, c. 1, sy. 1, May. 2023, doi: 10.5281/zenodo.7966527.

[10] WWF-Türkiye, *Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Rehberi*, 25 Eylül 2018. [Çevrimiçi].Erişim:19 Nisan 2025. Erişim adresi: https://wwftr.awsassets.panda.org/downloads/wwf_turkiye_rehber_temiz_uretim_250918_1.pdf

[11] F. Seda, "Denim kumaş üretiminde su ve enerji kullanımının değerlendirilerek üç farklı denim kumaşının çevresel etkilerinin YDA ile karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2018.

[12] M. Mostafa, "Waste water treatment in textile industries – the concept and current removal technologies," Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, cilt 7, sayı 1, ss. 501–525, Temmuz 2015. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/303453038_Waste_water_treatment_in_Textile_Industries-_the_concept_and_current_removal_Technologies. [Erişim tarihi: 19-Nisan-2025].

[13] L. A. Castillo-Suárez, A. G. Sierra-Sánchez, I. Linares-Hernández, V. Martínez-Miranda ve E. A. Teutli-Sequeira, "A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes," International Journal of Environmental Science and Technology, cilt 20, ss. 10553–10590, Mar. 2023.

[14] B. R. Babu, A. K. Parande, S. Raghu, and T. P. Kumar, "Cotton textile processing: Waste generation and effluent treatment," *Journal of Cotton Science*, vol. 11, no. 3, pp. 141–153, 2007.

[15] Z. Badani, H. Ait-Amar, A. Si-Salah, M. Brik, W. Fuchs, Treatment of textile waste water by membrane bioreactor and reuse, Desalination, Volume 185, Issues 1–3, 2005.

[16] *S. Sarıoğlu, Endüstriyel Kirlenme Kontrolü, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2004.*

[17] Khattab, T.A., Abdelrahman, M.S. & Rehan, M. Textile dyeing industry: environmental impacts and remediation. *Environ Sci Pollut Res* 27, 3803–3818 (2020). https://doi.org/10.1007/s11356-019-07137-z

[18] TeksArGe, "Tekstil Sektöründe Su Tüketimi ve Sürdürülebilir Çözümler," 8 Temmuz 2024. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.teksarge.com/2024/07/08/tekstil-sektorunde-su-tuketimi-ve-surdurulebilir-cozumler/

[19] H. A. Eren, P. Kurcan, ve P. Aniş, "Boyamada Kullanılan Yardımcı Kimyasal Maddelerin Reaktif Boyama Atık Sularının Ozonlanmasına Etkileri", *UUJFE*, c. 12, sy. 2, 2007, doi: 10.17482/uujfe.42907.

[20] F. O. Kocaer ve U. Alkan, "Boyar madde içeren tekstil atıksularının arıtım alternatifleri," *Çevre Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 3, pp. 123–130, 2016.

[21] D. A. Yaseen and M. Scholz, "Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 1193–1226, Feb. 2019, doi: 10.1007/s13762-018-2130-z.

[22] N. Y. Donkadokula, A. K. Kola, I. Naz, ve D. Saroj, "A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques", *Rev Environ Sci Biotechnol*, c. 19, sy 3, ss. 543-560, Eyl. 2020, doi: 10.1007/s11157-020-09543-z.

[23] H. Erikler, "Türkiye ve Dünya'da Boya Sektörü Ekonomisi ve Vergi Hasılatına Katkı Değerlendirmesi," Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2019.

[24] E. Kalayci, E. Çağlarer, “Tekstilde boyama atık suyundan ısı geri kazanımı: Gerçek işletme örneği”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol. 26, no. 2, pp. 609–620, 2021, doi: 10.17482/uumfd.874025.*

[25] O. Ö. Namal, “Tekstil Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Kullanılan Proseslerin Araştırılması”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, ss. 388–396, 2017, doi: 10.17100/nevbiltek.322169.

[26] "Denim kumaş üretiminde su ve enerji kullanımının değerlendirilerek üç farklı denim kumaşının çevresel etkilerinin YDA ile karşılaştırılması," AVESİS, 01 Şubat 2025.

[27] "HFGA136B Halat Sarma Makinası – Ermak Dış Ticaret ve Tekstil Makineleri Ltd. Şti.," Ermak Makina, 01 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://ermak-makina.com/hfga136b-halat-sarma-makinasi/.

[28] H. W. Tasarım, "Metal Makina Sanayi ve Ticaret - Tekstil Makineleri," Metal Makina Sanayi ve Ticaret, 01 Şubat 2025. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.metalmak.com/metalmak/ham-01-halat-acma-makinesi.

[29] R. Güngör, “Tesis içi geri kazanım-yeniden kullanım alternatifi sonrasında denim yıkama atıksularının İnert KOİ’sinin belirlenmesi”, 2011.

[30] H. W. Tasarım, “Kartaloğlu | Makina San. Tic. Ltd. Şti.,” Kartaloğlu | Makina San. Tic. Ltd. Şti. Erişim: http://www.kartaloglumakina.com/sizing-machine. 2025.

[31] Ural, Ö., Denim Ürünler Hakkında Tüketici Bilincinin Araştırılması. Akdeniz Sanat, 2011.

[32] M. Tarhan, "Eskitme Yöntemlerinin Denim Mamullerin Performans Özelliklerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2005.

[33] “Kot taşlamayı artık robotlar yapacak,” Milliyet, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.milliyet.com.tr/ekonomi/kot-taslamayi-artik-robotlar-yapacak-1441433, 2025.

[34] M. Toksöz ve S. Mezarcıöz, “Denim Kumaşlara Uygulanan Özel Yıkama Uygulamaları”, *cukurovaummfd*, c. 28, sy. 2, ss. 141–148, 2016.

[35] “Enzim Yıkama - Denim Gold Boyama,” [Online]. Erişim adresi: https://www.denimgoldboyama.com/enzim-yikama/, 2025.

[36] O. Sefer, “Çevre Dostu Organik Denim Terbiyesinin Klasik Denim Terbiyesiyle Karşılaştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2009.

[37] testextextile, “Tekstil Ön İşlem Prosesleri: Yakma, Haşıl Sökme, Temizleme, Ağartma, Merserize...,” Testex, [Online]. Erişim Adresi: https://www.testextextile.com/tr/textile-pretreatment-processes-singeing-desizing-scouring-bleaching-mercerizing/, 2025

[38] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, “Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği,” Resmî Gazete, Sayı: 25687, 31 Aralık 2004.

[39] Island Denim, “Yıkama Temel Prensipleri,” [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: https://www.island-denim.com/tr/Sayfa/yikama-temel-prensipleri/11/. 2025.

[40] M. Yaqub, M. D. Celebi, M. Dilaver, S. K. Bhagat, M. Kobya, and W. Lee, "Treating Textile Wastewater to Achieve Zero Liquid Discharge: a Comprehensive Techno-economic Analysis," Water, Air, & Soil Pollution, vol. 234, no. 651, Oct. 2023, doi: 10.1007/s11270-023-06646-5.

[41] Corpseed, "Standards for Discharge of Effluents from Textile Industry," [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: https://www.corpseed.com/knowledge-centre/standard-for-discharge-of-effluents-from-textile-industry. 2025.

[42] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "2022/20 Sayılı Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları Genelgesi," 2022.

[43] H. Aksu, "Türkiye'de İçmesuyu Arıtımında Membran Uygulamaları ve Uygulama Aşamasında Karşılaşılan İşletme Problemleri," Uzmanlık Tezi, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2019.

[44] S. Vajnhandl and J. Volmajer Valh, "The status of water reuse in European textile sector," *Journal of Environmental Management*, vol. 141, pp. 29–35, 2014, doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.014.

[45] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Arıtılmış Atıksuların Yeniden Kullanımı Projesi, Ankara, Türkiye: Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2022. [Çevrimiçi]. Erişim: https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/aritilmis-atiksularin-yen-den-kullanimi-projes–20220912145340.pdf

[46] Ahsan, A., Jamil, F., Rashad, M.A. *et al.* Wastewater from the textile industry: Review of the technologies for wastewater treatment and reuse. *Korean J. Chem. Eng.* 40, 2060–2081 (2023).

[47] R. Kant, "Textile Dyeing Industry: An Environmental Hazard," *Natural Science*, vol. 4, no. 1, pp. 22–26, 2012.

[48] S. M. Burkinshaw, *Physico-Chemical Aspects of Textile Coloration*, Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2015.

[49] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, "Tekstil Sektöründe Temiz Üretim Uygulamaları Projesi – Nihai Rapor," Gebze Teknik Üniversitesi iş birliğiyle, 21 Aralık 2021.

[50] N. Tuncer, "Tekstil Endüstrisi Atık Sularında Fenton ve UV Prosesleri ile KOİ ve Renk Gideriminin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, Türkiye, 2020.

[51] T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, "Su Verimliliği Rehber Dokümanları Serisi – Dokusuz Kumaşların ve Dokusuz Kumaştan Yapılan Ürünlerin İmalatı, Giyim Eşyası Hariç. Ankara, Türkiye, 2023.

[52] İ. Üçgül ve F. Yılmaz, "Investigation of Energy Production by Microbial Fuel Cell Using Textile Wastewaters," Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, cilt 20, sayı 2, ss. 57–66, 2015.

[53] A. Erkuş, E. Oygun, M. Türkmenoğlu ve A. Aldemir, "Boya Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu," Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt 23, sayı 3, ss. 308–319, 2018.

[54] G. N. Asri, “Tekstil Endüstrisi Atıksularının İleri Oksidasyon Yöntemleri ile Arıtılması,” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Türkiye, 2021.

[55] S. İleri ve F. Karaer, “Tekstil İşletmesi Atıksularında Fenton Prosesi ile Akut Toksisite Giderimi,” Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 16, sayı 2, 2011.

[56] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, “Fiziksel Arıtma,” Atıksu Arıtma Tesisleri El Kitabı, Bölüm 4, 2019. [Çevrimiçi]. Erişim: 1 Şubat 2025. [Erişim adresi:https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/bolum_4-20191127122836.pdf].

[57] A. Sharma, J. Ahmad ve S. J. S. Flora, “Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products,” Environmental Research, cilt 167, ss. 223–233, Kas. 2018.

[58] T. Stephenson, S. Judd, B. Jefferson ve K. Brindle, Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, IWA Publishing, 2000.

[59] S. Alzahrani, A. Mohammad, “Challenges and Trends in Membrane Technology Implementation for Produced Water Treatment: A Review,” ResearchGate, Erişim: 1 Şubat 2025.

[60] S. Weijie, H. Xiaofeng ve W. Yinhua, “Application of Membrane Technology in Chemical Wastewater Treatment,” Strategic Study of CAE, cilt 16, sayı 12, ss. 67–75, Haz. 2024.

[61] Z. Ma, H. Chang, Y. Liang, Y. Meng, L. Ren, H. Liang, “Research progress and trends on state-of-the-art membrane technologies for textile wastewater treatment: A review,” Chemical Engineering Journal, 2023.

[62] E. Obotey Ezugbe, S. Rathilal, “Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review,” ResearchGate, Erişim: 20 Nisan 2025.

[63] TU Delft OpenCourseWare, “Micro- and Ultrafiltration – Water Treatment,” Delft University of Technology, Erişim: 20 Nisan 2025.

[64] R. Shoshaa, M. Y. Ashfaq ve M. A. Al-Ghouti, “Recent developments in ultrafiltration membrane technology for the removal of potentially toxic elements, and enhanced antifouling performance: A review,” *Environmental Technology & Innovation*, cilt 31, s. 103162, 2023. doi: 10.1016/j.eti.2023.103162.

[65] R. Singh, N. Hankins, “Introduction to Membrane Processes for Water Treatment,” *in* Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment, 2016.

[66] A. I. Schäfer, N. Andritsos ve A. J. Karabelas, “Fouling in Nanofiltration,” *Nanofiltration: Principles and Applications*, Elsevier, 2004, ss. 169–239.

[67] G. Caputo, A. Giaconia, “Membrane technologies for solar-desalination plants,”, Membranes for Clean and Renewable Power Applications, 2014, ss. 347–364. doi: 10.1533/9780857098658.5.347.

[68] Z. Yang, Y. Zhou, Z. Feng, X. Rui, T. Zhang , Z. Zhang, “A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification,” *Polymers*, cilt 11, sayı 8, s. 1252, 2019. doi: 10.3390/polym11081252.

[69] W. Gwenzi, N. Dunjana, and T. Mupfiga, “Biological wastewater treatment systems: performance and challenges in treating high-strength textile effluents,” Environ. Technol. Innov., vol. 22, p. 101478, 2021

[70] İ. Uyanık and O. Özkan, “Laboratory Scale Applications of Membrane Treatment Systems for Organized Industrial Zones,” in Proc. Int. Symp. on Applied Sciences (ISAS 2018 - Winter), Samsun, Turkey, 2018, pp. 986–989. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.set-science.com/manage/uploads/ISAS2018-Winter_0039/SETSCI_ISAS2018-Winter_0039_00189.pdf

[71] T. Yilmaz, E. K. Demir, G. Aşık, S. T. Başaran, E. Çokgör, S. Sözen ve E. Şahinkaya, “Performance of a high-rate membrane bioreactor for energy-efficient treatment of textile wastewater,” Journal of Environmental Management, cilt 358, s. 120845, Mayıs 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://research.itu.edu.tr/en/publications/performance-of-a-high-rate-membrane-bioreactor-for-energy-efficie/fingerprints/

[72] A. Yurtsever, D. Uçar ve E. Şahinkaya, “Tekstil Endüstrisi Atıksularının Sonlu Filtrasyon Sistemi ile Nanofiltrasyon ve Ters Ozmoz Membranları Kullanılarak Filtrasyonu,” Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, cilt 9, sy. 2, ss. 875–891, Haz. 2020. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/342180882_Tekstil_Endustrisi_Atiksularinin_Sonlu_Filtrasyon_Sistemi_ile_Nanofiltrasyon_ve_Ters_Ozmoz_Membranlari_Kullanilarak_Filtrasyonu

[73] H. K. Shon, S. Vigneswaran, and S. A. Snyder, “Effluent organic matter (EfOM) in wastewater: Constituents, effects, and treatment,” Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., vol. 36, no. 4, pp. 327–374, 2006, doi: 10.1080/10643380600580011.

[74] W. Gao, H. Liang, J. Ma, M. Han, Z.-l. Chen, Z.-s. Han ve G.-b. Li, “Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: A review,” *Desalination,* cilt 272, sy. 1–3, ss. 1–8, 2011. doi: 10.1016/j.desal.2011.01.051.

[75] S. Devaisy, S. Jeong, J. Kandasamy ve S. Vigneswaran, “Membrane Hybrid System for Sustainable Removal of Organic Micropollutants and Biofoulants from Reverse-Osmosis Concentrate,” ResearchGate, Ekim 2024.

[76] M. A. Kuenemann, M. Szymczyk, Y. Chen, N. Sultana, D. Hinks, H. S. Freeman, A. J. Williams, D. Fourches ve N. R. Vinueza, “Weaver’s Historic Accessible Collection of Synthetic Dyes: A Cheminformatics Analysis,” Chemical Science, cilt 8, sy. 6, ss. 4339–4351, Nisan 2017. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/315965033_Weaver’s_Historic_Accessible_Collection_of_Synthetic_Dyes_A_Cheminformatics_Analysis

[77] L. Bilińska ve M. Gmurek, “Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions”, *Water Resources and Industry,* c. 26, s. 100160, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.wri.2021.100160.

[78] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, ve P. Nigam, “Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative”, Bioresource Technology, c. 77, sy 3, ss. 247-255, May. 2001, doi: 10.1016/S0960-8524(00)00080-8.

[79] D. De Jager, M. S. Sheldon, ve W. Edwards, “Colour removal from textile wastewater using a pilot-scale dual-stage MBR and subsequent RO system,” Separation and Purification Technology, cilt 135, ss. 135–144, 2014. [Çevrimiçi]. Erişim: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.008

[80] S. H. Zahraa and H. A. Gzar, “Evaluation of the Performance of MBR-RO Technology for Treatment of Textile Wastewater and Reuse,” in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 584, no. 1, Art. no. 012049, 2019. [Çevrimiçi]. Erişim: https://doi.org/10.1088/1757-899X/584/1/012049

[81] F. B. Yaman, M. Çakmakcı, D. Karadağ, B. Özkaya, V. Bali, ve B. Dora, “Molecular weight distributions in cotton-dyeing textile wastewaters”, Desalination and Water Treatment, c. 57, sy 27, ss. 12684-12691, Haz. 2016, doi: 10.1080/19443994.2015.1049956.

[82] A. Yurtsever, D. Uçar, ve E. Şahinkaya, “Tekstil Endüstrisi Atıksularının Sonlu Filtrasyon Sistemi ile Nanofiltrasyon ve Ters Ozmoz Membranları Kullanılarak Filtrasyonu”, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 9, sy 2, Art. sy 2, Haz. 2020, doi: 10.17798/bitlisfen.597691.

[83] H. Tang, M. Shan, Q. Cheng, R. Wen, S. Liu, H. Zeng, J. Yu ve J. Luo, “Rapid pretreatment strategy to control nanofiltration membrane fouling in recycling of real textile wastewater: Comparison and mechanisms,” Chemical Engineering Journal, cilt 494, 152913, 2024. [Çevrimiçi]. Erişim: https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152913

[84] A. A. F. Firdaus, A. Slamet, A. Yuniarto ve N. I. Said, “Removal of total phosphate and sulfate from industrial wastewater by recirculating flow in nanofiltration,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, cilt. 1307, no. 1, s. 012020, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1307/1/012020.

[85] X. Yang, V. López-Grimau, M. Vilaseca, X. Martínez-Lladó ve M. Crespi, “Reuse of textile wastewater treated by moving bed biofilm reactor coupled with membrane bioreactor,” Review of Progress in Coloration and Related Topics, cilt 51, ss. 1–12, Mart 2021. [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.researchgate.net/publication/350465395_Reuse_of_textile_wastewater_treated_by_moving_bed_biofilm_reactor_coupled_with_membrane_bioreactor

[86] P. K. Gkotsis, D. Ch. Banti, E. N. Peleka, A. I. Zouboulis, ve P. E. Samaras, “Fouling Issues in Membrane Bioreactors (MBRs) for Wastewater Treatment: Major Mechanisms, Prevention and Control Strategies”, Processes, c. 2, sy 4, ss. 795-866, 2014, doi: 10.3390/pr2040795.

[87] C. Y. Tang, T. H. Chong, ve A. G. Fane, “Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review”, Advances in Colloid and Interface Science, c. 164, sy 1, ss. 126-143, May. 2011, doi: 10.1016/j.cis.2010.10.007.

[88] J. Jhaveri ve Z. V. P. Murthy, “A comprehensive review on anti-fouling nanocomposite membranes for pressure driven membrane separation processes”, Desalination, c. 379, ss. 137-154, Şub. 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.11.009.

[89] S. Kim ve C. Park, “Fouling behavior and cleaning strategies of ceramic ultrafiltration membranes for the treatment and reuse of laundry wastewater,” Journal of Water Process Engineering, cilt 48, s. 102840, 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102840.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Yildirim, G.B., Saral, M., Zengin, İ.H., Turk, O.K., Çakmakci, M. (2024). "Treatment and Recovery of Textile Industry Dyeing Wastewaters Using Membrane Systems", 7th *EurAsia Waste Management Symposium*, 21-23 Ekim 2024, İstanbul, Türkiye.