

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İTHAL KÖMÜR DEPOLAMA SAHASI ATIKSULARININ
NANOFİLTRASYON PROSESİ İLE ARITILMASI VE GERİ
KAZANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

EBRU AVCI KAPLAN

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İTHAL KÖMÜR DEPOLAMA SAHASI ATIKSULARININ
NANOFİLTRASYON PROSESİ İLE ARITILMASI VE GERİ
KAZANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

EBRU AVCI KAPLAN

Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Ayla ARSLAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Derya YÜKSEL İMER
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.02.2021

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde, benden desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgi ve birikimini benimle paylaşan, hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Esra CAN DOĞAN'a,

Laboratuvar çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Ali Oğuzhan NARCI'ya, tez çalışmamda desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşım Burçin GÜNERİ'ye, ağır metal ölçümlerimi yapan Akare Çevre Laboratuvarı ve Dan. Hiz. Tic. Ltd. Şti'nden Adem YILDIRIM'a

Eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman bana destek olan, iyi bir eğitim almam için bütün olanaklarını sonuna kadar kullanan bütün zor zamanlarımda yanımda olan annem Hatice Nur AVCI, babam Mehmet AVCI, ablam Burcu AVCI DENİZÖZ ve sevgili eşim Taner KAPLAN'a içtenlikle sevgi ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat - 2021

Ebru AVCI KAPLAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR BİLGİSİ	3
1.1. Kömür Oluşumu.....	3
1.2. Kömür Endüstrisi	4
1.2.1. Kömür endüstrisinin Türkiye ve Dünya'daki genel durumu	4
1.2.2. Kömür endüstrisinde atıksuların oluşumu	7
1.2.3. Kömür endüstrisinde oluşan atıksuların arıtımı	10
1.3. Endüstriyel Atıksuların Geri Kazanımı.....	14
1.3.1. Atıksuların geri kazanımı.....	14
1.3.2. Endüstriyel atıksuların geri kazanımında kullanılan teknolojiler	17
1.3.3. Kömür endüstrisi atıksularının geri kazanımı	20
1.4. Membran Prosesler.....	21
1.4.1. Membranların çalışma prensibi.....	21
1.4.2. Membran sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	23
1.4.3. Basınç sürücü membran prosesler.....	24
1.4.4. Membranların çalışma prensibi.....	25
1.4.4.1. Mikrofiltrasyon (MF).....	25
1.4.4.2. Ultrafiltrasyon (UF)	26
1.4.4.3. Nanofiltrasyon (NF).....	26
1.4.4.4. Ters Osmoz (TO)	28
1.4.5. Membran proseslerde işletme parametreleri	29
1.4.6. Endüstriyel atıksuların geri kazanımında membran proseslerin kullanımı.....	31
1.4.7. Kömür endüstrisi atıksularının membran prosesler ile geri kazanımı.....	34
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	36
2.1. Malzeme.....	36
2.1.1. Membranlar	36
2.1.2. Çapraz akış membran ünitesi	36
2.1.3. İthal kömür yıkama atıksuyu karakretizasyonu	37
2.2. Yöntem.....	38
2.2.1. Analitik yöntemler	38
2.2.2. Proses değişken ve performans parametreleri	39
2.2.3. Deneysel tasarım yöntemi	40
3. DENEYSEL BULGULAR	41
3.1. Kömür Atıksuyundan Kirletici Uzaklaştırma Verimliliği.....	41
3.2. Anova Analizi	44

3.3. Süzüntü Akı Grafikleri.....	46
3.4. Doğrulama Deneyi ve Elde Edilen Çıkış Suyu Kalitesi.....	48
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	54
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	63
ÖZGEÇMİŞ	64



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	1971-2020 arasında küresel toplam kömür ihtiyacı, kömür eşdeğeri megaton (Mtce)	4
Şekil 1.2.	1971-2019 arasında küresel toplam kömür üretimi, milyon ton.....	5
Şekil 1.3.	Kömür depolama sahalarındaki proses akım şeması	6
Şekil 1.4.	Pülverize sistem ile kömür yığınlarının sulanması	9
Şekil 1.5.	Pülverize sistem ile eleme-paketleme ünitelerinin sulanması	9
Şekil 1.6.	Atıksu arıtma ve geri dönüşüm teknolojileri şeması	16
Şekil 1.7.	Membranların iki farklı fazı ayırma mekanizmaları	23
Şekil 1.8.	Basınç sürücü membran prosesleri için basitleştirilmiş akış şeması	24
Şekil 1.9.	Kirlenici maddelerin farklı basınç sürücü membran prosesleri ile giderimi	25
Şekil 2.1.	Nanofiltrasyon Deney Düzenegi	37
Şekil 3.1.	Kömür yıkama atıksularının NF prosesi ile geri kazanımında sonuç parametrelerinin giriş değişkenlerine bağlı olarak değişimleri	43
Şekil 3.2.	9'lu deney setinde kullanılan Nanofiltrasyon membranlara ait akı grafikleri a)NP030 b)DESAL-5-DK c)ESNA	47

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Uluslararası kömür sınıflandırması.....	6
Tablo 1.2.	Dünya ve Türkiye kömür rezervlerinin karşılaştırılması.....	7
Tablo 1.3.	Maden suyu, asit maden suyu, kömür yıkama atıksuları, kok tesisi atıksuları ve uçucu kül sızıntı sularının karakteristikleri	10
Tablo 1.4.	Kömür endüstrisi atıksularının arıtım yöntemleri.....	13
Tablo 1.5.	Atıksu geri kazanımında uygulanan arıtma teknolojileri ve giderdikleri kirleticiler	17
Tablo 1.6.	Literatürde endüstriyel atıksuların geri kazanımı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar	19
Tablo 1.7.	Membranların sürücü kuvvetlerine göre sınıflandırılması.....	22
Tablo 1.8.	Membran sistemlerinin avantaj ve dezavantajları	23
Tablo 2.1.	Deneylerde kullanılan membranların özellikleri	36
Tablo 2.2.	Kömür yıkama atıksuyunun karakterizasyonu	38
Tablo 2.3.	Taguchi deney tasarımı değişkenler ve seviyeleri	40
Tablo 2.4.	Taguchi deney tasarımı çalışma koşulları.....	40
Tablo 3.1.	L9 (3 ⁴) Orthogonal dizin tasarımına karşılık gelen proses değişkenleri ve seviyeleri.....	41
Tablo 3.2.	KOI parametresi için Anova analizi	45
Tablo 3.3.	TÇK parametresi için Anova analizi	45
Tablo 3.4.	İletkenlik parametresi için Anova Analizi.....	46
Tablo 3.5.	Akı Parametresi için Anova Analizi	46
Tablo 3.6.	Tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları.....	48
Tablo 3.7.	TSE, Avrupa Birliği, DSÖ tarafından verilen “İnsani Tüketim Amaçlı Su Kullanımı” sınır değerleri	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Etkili Membran Alanı (m ²)
C _b	: Besleme Çözeltisindeki Kirletici Madde Konsantrasyonu
C _s	: Süzüntüdeki Kirletici Madde Konsantrasyonu
dV/dt	: Süzüntü akış hızı
F	: İstatistik değeri
J	: Süzüntü Akısı (L/m ² .sa)
P	: Olasılık değeri
R(%)	: Kirletici Madde Giderim Verimi
t	: Filtrasyon Süresi
T	: Sıcaklık (°C)
V	: Toplam Süzüntü Hacmi (m ³)
V _f	: Başlangıçtaki Besleme Hacmi (L)
V _r	: Filtrasyon Sırasındaki Konsantre Hacmi (L)
ΔC	: Konsantrasyon farklılığı
ΔE	: Elektriksel potansiyel farklılığı
ΔP	: Basınç farklılığı
ΔT	: Sıcaklık farklılığı

Kısaltmalar

AB	: Avrupa Birliği
AKM	: Askıda Katı Madde
AKR	: Ardışık Kesikli Reaktör
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi
İOP	: İleri Oksidasyon Prosesi
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
KGA	: Kömür Gazlaştırma Atıksuyu
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MBR	: Membran Bioreaktör
MD	: Membran Distilasyon
MF	: Mikrofiltrasyon
MWCO	: Molecular Weight Cut Off (Moleküler Ağırlık Engelleme Sınırı)
NF	: Nanofiltrasyon
SSD	: Sıfır Sıvı Deşarjı
TÇK	: Toplam Çözünmüş Katı
TMB	: Trans Membran Basıncı
TN	: Toplam Nitrojen
TO	: Ters Osmoz

TOK : Toplam Organik Karbon
TP : Toplam Fosfor
TSE : Türk Standardları Enstitüsü
UF : Ultrafiltrasyon
VRF : Volume Reduction Factor (Hacim Azaltma Faktörü)



İTHAL KÖMÜR DEPOLAMA SAHASI ATIKSULARININ NANOFİLTASYON PROSESİ İLE ARITILMASI VE GERİ KAZANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Nüfus artışı ve endüstrileşme, temiz su kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmış ve ulaşılabilir su kaynaklarının hızla tükenmesine neden olmuştur. Su kaynaklarının etkin kullanılması için alternatif kaynak arayışları başlamış ve endüstriyel atıksuların geri kazanımı/yeniden kullanımı ile ilgili çalışmalar ivme kazanmıştır. Bu çalışmada, ithal kömür depolama tesislerinde kömürlerin yıkanması sonucu ve yağmur sonrası oluşan atıksuların geri kazanılabilirliği için Nanofiltrasyon (NF) membran prosesi laboratuvar ölçeğinde araştırılmıştır. Deneyler Taguchi deneysel tasarım uygulaması ile planlanmış ve membran türü (ESNA-1-LF; NP030; DESAL-5-DK), basınç (10; 12,5; 15 bar), VRF (Hacim Azaltma Faktörü; 2; 3; 4) ve pH (5; 7,6-7,7; 10) faktörlerinin geri kazanım suyu kalitesi üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Proses performans değerlendirmeleri Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Toplam Çözünmüş Katı (TÇK), elektriksel iletkenlik, renk, bulanıklık ve sülfür parametreleri ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda NF prosesinde 41,78 L/m².sa akıda DESAL-5-DK membranı ile, yüksek organik madde giderimi (%95 KOİ) ve %100'e yakın renk ve bulanıklık giderimleri sağlanmıştır. Benzer kalitede atıksu üreten endüstrilerde yüksek kalitede su geri kazanımı için NF prosesinin etkin olarak kullanılabilir bir alternatif olduğu teknik olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu Arıtımı, Kömür Endüstrisi, Membran Proses, Nanofiltrasyon, Su Geri Kazanımı.

INVESTIGATION OF WATER TREATMENT AND RECOVERY OF IMPORTED COAL STORAGE AREA WASTEWATER WITH NANOFILTRATION

ABSTRACT

Population growth and industrialization have increased the need for clean water resources and have caused the rapid depletion of available water resources. Searching of alternative resources has started for the efficient use of water resources, and studies on the recovery / reuse of industrial wastewater have gained momentum. In this study, Nanofiltration (NF) membrane process was investigated for the recovery of wastewater, which was formed after rain and washing coal in imported coal storage fields, on a laboratory scale. Experiments were planned with the "Taguchi Experimental Design" and the effects of membrane type (ESNA-1-LF, NP030, DESAL-5-DK), pressure (10, 12.5, 15 bar), VRF (Volume Reduction Factor, 2, 3, 4) and pH (5, 7.63-7.71, 10) factors on the recycled water quality were evaluated. Process performance evaluations were made with chemical oxygen demand (COD), total dissolved solid (TDS), conductivity, color, turbidity and sulfur parameters. As a result of the study, high organic removal efficiency (95% COD), 41.78 L/m².h flux and nearly 100% color, turbidity removal performance were obtained with the DESAL-5-DK membrane in the NF process. It has been technically determined that the NF process is an effective alternative for high quality water recovery in industries which produce similar quality wastewater.

Keywords: Wastewater Treatment, Coal Industry, Membrane Process, Nanofiltration, Water Recovery.

GİRİŞ

Nüfus artışı ve endüstrileşme, temiz su kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmış ve alternatif su kaynaklarına yönelmeye sebep olmuştur. Su kaynaklarının etkin kullanılması için alternatif kaynak arayışları başlamış ve endüstriyel atıksuların geri kazanımı/yeniden kullanımı ile ilgili çalışmalar ivme kazanmıştır. Atıksuların arıtılması ve yeniden kullanılabilir hale getirilmesi önemli bir husustur. Taşıdığı önemle beraber maliyetli de olan atıksuların arıtılması, bilim adamları tarafından daha az maliyetli ve daha ulaşılabilir teknolojilerin kullanılarak aynı sonuca ulaşılmasını sağlayacak yöntemlerin aranmasına neden olmuştur. Tüm bunların yanında, atıksuyun karakterizasyonu ve arıtılan suyun son kullanım ömrü, atıksuyun arıtımında hangi yöntemin kullanılacağına belirlenmesinde ciddi rol oynamaktadır. Dünya çapında, suyun yeniden kullanımı uygulamaları arasında tarımsal sulama, içilmeyen kentsel ve rekreasyonel yeniden kullanım, yerinde gri su yeniden kullanımı, endüstriyel yeniden kullanım, yağmur suyu veya yağmur suyu toplama ve yeniden kullanımı, yüzey sularını arttırma ve yeraltı sularını yeniden doldurma ve hatta içilebilir yeniden kullanım da bulunmaktadır. Geri kazanılan su için en yaygın uygulamalardan biri tarımsal amaçla kullanılan sulama suyudur. Arıtılmış atıksu ile tarımsal sulama, özellikle Orta Doğu ve Akdeniz’de, özellikle de su kıtlığı çeken bölgelerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Literatürde özellikle yoğun su tüketimi olan tekstil ve kağıt endüstrileri gibi sektörlerde proses suyunun geri kazanımı ile ilgili oldukça fazla çalışma bulunmaktadır.

Kömür, öncelikle elektrik enerjisi üretmek için yakıt olarak kullanılır. Bununla birlikte çelik, dövme, metal eritme gibi metalurjik işlemler için belirli kömür türleri de kullanılabilir. Günümüzde kömürün ekonomik etkileri çok yüksektir ve kömür madenciliği endüstrisi önemli bir iş koludur. Diğer taraftan kömür endüstrisi (maden, işleme ve depolama gibi) sektör bazında değişmekle beraber yüksek su tüketimine sahip bir endüstridir.

Dünya çapında bakıldığında verimli kömür madenlerinin çoğunun su kaynaklarına yakın bölgelerde buldukları görülmektedir. Kömür gibi madencilik faaliyetleri

nedeniyle birçok içme suyu kaynağı atıksularla kirlenmektedir. Çevresel açıdan kirliliğin önlenmesi amacıyla madencilik şirketleri, suyun yeniden kullanımını sağlayacak atıksu arıtma sistemlerine yönelmektedir. Literatürde bu sektörle ilgili olarak su yönetimi/geri kazanımı çalışmaları, özellikle kömür madeni drenaj sularının ve kömür gazlaştırma atıksularının arıtımına yoğunlaşmış durumdadır.

Bu çalışmada, ithal kömür depolama tesislerinde kömürlerin yıkanması ile yağmur sularının kömür yığınlarından sızması sonucunda oluşan atıksuların Nanofiltrasyon Prosesi ile arıtılarak geri kazanılabilirliği laboratuvar şartlarında araştırılmıştır. Böylece kömür deponi alanlarında oluşan atıksuların arıtılarak kömür depolama sahalarında yeniden kullanımı ile şebeke suyu kullanımını minimize ederek ekonomik ve çevresel bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1. LİTERATÜR BİLGİSİ

1.1. Kömür Oluşumu

Kömür, bataklıkta bulunan bitkilerin ve ağaçların kalıntılarının üst üste yığılarak çökmesi ve milyonlarca yıllık bir süreçte fiziksel ve kimyasal birtakım reaksiyonlara uğramaları sonucunda, bitkisel kökenli organik ve inorganik bileşiklerden oluşan tortul bir kayadır (Aksan, 2010). Aerobik bakteriler, bilindiği üzere sudaki oksijeni kullanmaktadır. Bakterilerin yaşamsal faaliyetleri sonucunda oluşan metabolizma ürünleri, parçalanma sürecinin anaerobik bakteriler ile devam ettirilmesini engellemektedir. Bitki ve ağaç kalıntılarının, bataklıkların dibinde birikme süreci, parçalanma sürecinden daha hızlı gerçekleşmekte ve bu nedenle bataklıkların dibinde birikmekte olan bu bitkisel kalıntılar turbaları ve sonrasında ise kömürleşme prosesleri ile günümüzdeki kömürleri oluşturmaktadırlar (Bend, 1992).

Kısaca, bataklıklarda tarih öncesi çağlardan beri biriken bitki örtüsü fosilleşmiş ve kömür meydana gelmiştir. Kömür, dünyadaki kalorisi en zengin enerji kaynaklarından bir tanesidir. Günümüzde kömürden aldığımız enerji, bitkilerin fosilleşmeden önce güneşten edindikleri enerjiden gelmektedir. Kömür, ana bileşeni Karbon (C) olmak üzere, Hidrojen (H), Oksijen (O) ve az miktarda Kükürt (S) ve Azot (N) elementlerinden oluşmaktadır. Organik ve inorganik maddelerden oluşmakta olan kömürün organik madde miktarı %50 oranından fazladır. Organik madde içeriği %50'den az ise; bu kayalara, en yüksek oranda olan mineralin türüne göre kömürlü silt, kömürlü kil gibi isimler verilmektedir (Ünal, 2010).

Kömürleşme evresinde;

-Turbalaşma (biyokimyasal evre)

-Kömürleşme (başkalaşma evresi)

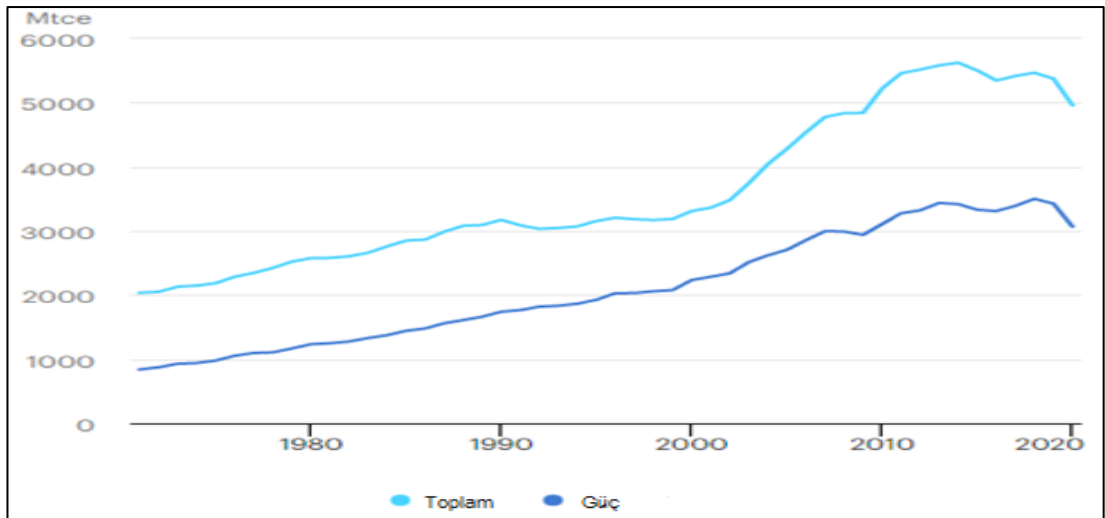
olmak üzere iki evre görülmektedir (Seçer, 2019).

Turbalaşma evresi, biyokimyasal bir süreçtir. Bu evrede, bitki bataklıklarında bulunan aerobik bakteriler, bitkileri bozundurarak, metan, karbondioksit, amonyak ve su gibi bileşenlere ayrıştırır. Hümik asit ve hümik asitin çözünmüş katyonlarla (Na, Mg, Ca, Al, Fe) birleşmesiyle hümatlar oluşur (Seçer, 2019). Kömürleşme evresinde ise, hüminitler vitrinite dönüşmektedir. Kömürleşme derecesi arttıkça, uçucu madde oranı ve vitrinit bileşimindeki oksijen oranı azalmakta ve karbon oranı artmaktadır (Orem ve Finkelman 2013; Seçer, 2019).

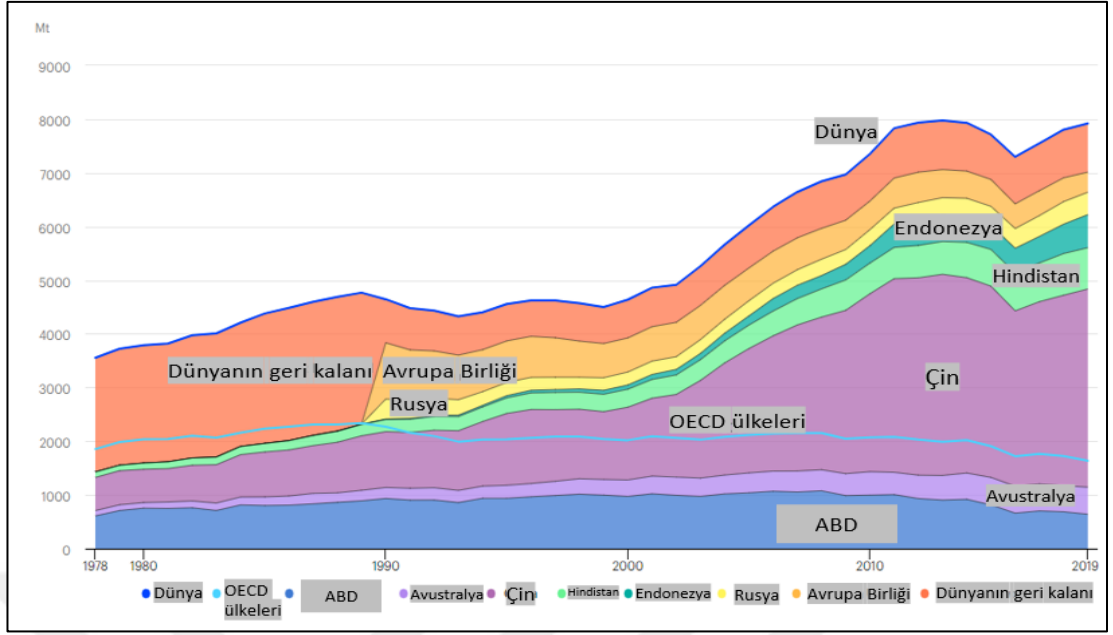
1.2. Kömür Endüstrisi

1.2.1. Kömür endüstrisinin Türkiye ve Dünya'daki genel durumu

Kömür madenciliği, yeryüzünden kömür çıkartma işlemidir. Sahip olduğu yüksek kalori neticesinde değerli olan kömür madeni 1880'li yıllardan bu yana elektrik üretmek için kullanılmaktadır. 2019 yılında dünyadaki kömür üretimi %1,5 artmıştır. 1880'li yıllardan 2019'a kadar katlanarak artan kömür üretimi, 2020 yılında bir miktar gerilemiştir. Dünyadaki en büyük kömür üreticisi olan Çin'de başlayan ve bütün dünyayı etkisi altına alan Covid19 salgını yaşanan bu daralmanın en büyük sebebidir. 1971 yılından 2020 yılına kadar olan süreçte üretilmiş olan küresel ölçekte ihtiyaç duyulan kömür talebi Şekil 1.1'de gösterilmiştir (URL-1). 1971 yılından 2019 yılına kadar küresel ölçekte üretilen kömür miktarı ise Şekil 1.2'de gösterilmiştir (URL-2).

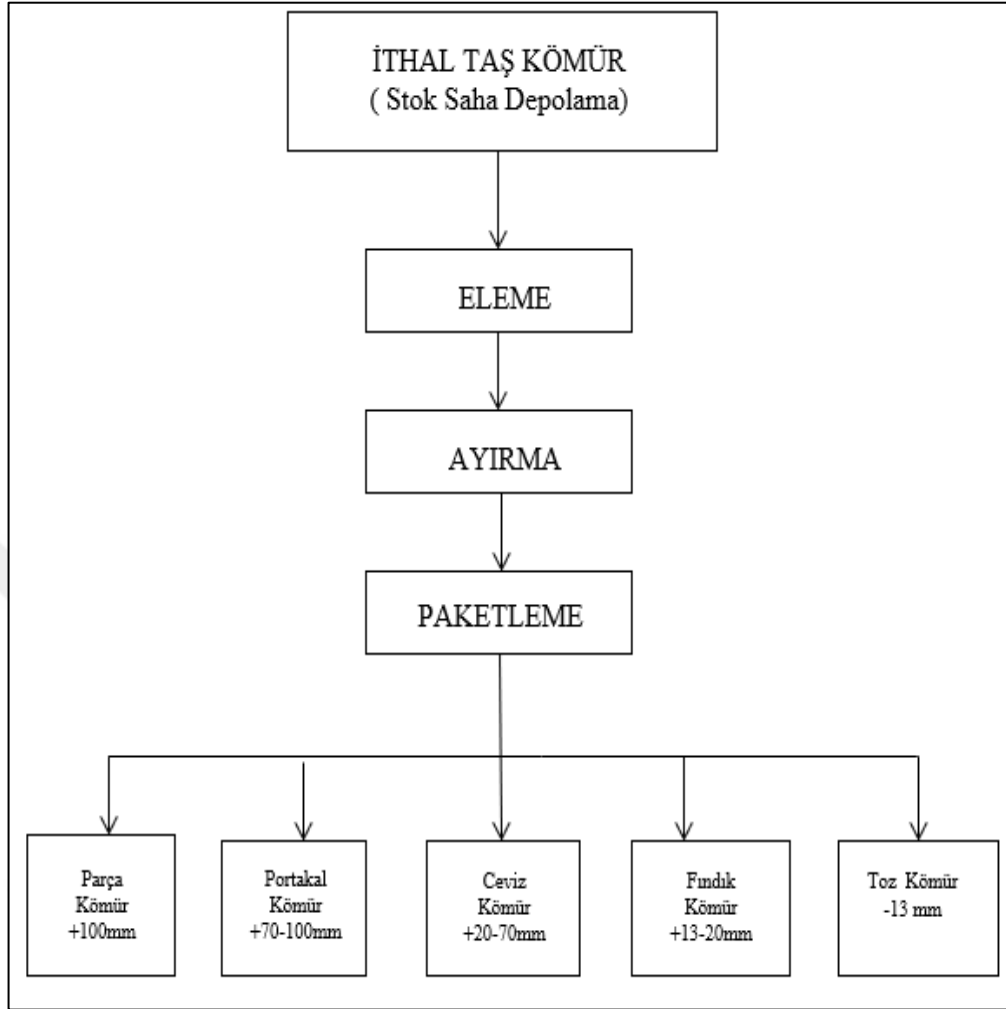


Şekil 1.1. 1971-2020 arasında küresel toplam kömür ihtiyacı, kömür eşdeğeri megaton (Mtce) (URL-1)



Şekil 1.2. 1971-2019 arasında küresel toplam kömür üretimi, milyon ton (URL-2)

Genel olarak bir kömür depolama sahası prosesinin akım şeması Şekil 1.3'te verilmiştir. Kömürlerin kullanım amaçlarına uygun sınıflandırılmasında, Uluslararası Kömür Kurulu'na çok fazla ülkeden alınmış numuneler ile yapılan çalışmalar, "Uluslararası Standartlar Örgütü" tarafından da desteklenerek genel bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırmada; kömürün kalorifik değeri, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma özellikleri temel alınmıştır. Kömür, birçok şekil ve nitelikte bulunabilmektedir ancak genel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Tablo 1.1'de görüldüğü üzere kömürler, sert ve kahverengi kömürler olarak iki sınıfa ayrılmıştır (Aksan, 2010). 1829 yılında Türkiye'nin Zonguldak kentinde kömür madeni yatakları keşfedilmiş fakat maden çıkarma operasyonları ancak 1848 yılında başlamıştır. Zonguldak'ta keşfedilen kömür yatakları Orta Doğu'daki en zengin maden bölgesiydi. Ancak günümüz koşullarına baktığımızda yaklaşık 50 ülkede kömür üretiminin yapıldığı görülmektedir. Dünyadaki en büyük kömür üreticileri Çin, ABD, Hindistan ve Avustralya'dır. Dünya üzerinde ihtiyaç duyulan enerjinin %26'sı kömürle karşılanmaktadır. Tablo 1.2'de de gösterildiği üzere dünyadaki taşkömürü rezervlerinin %0,0308'i ve linyit rezervlerinin %2'si Türkiye'de bulunmaktadır (Atalay, 2015).



Şekil 1.3. Kömür depolama sahalarındaki proses akım şeması

Tablo 1.1. Uluslararası kömür sınıflandırması (URL-3)

Sert Kömürler	Kahverengi Kömürler
Koklaşabilir kömürler (yüksek fırınlarda kullanılması uygun, kok üretimine izin veren nitelikte)	Alt bitümlü kömürler (4165-5700 kcal/kg kalorifik değerinde olup, topaklaşma göstermez)
Koklaşmayan kömürler (Bitümlü kömürler ve antrasit)	Linyit (4165 kcal/kg'ın altında kalorifik değerinde olup, topaklaşma göstermez)

Tablo 1. 2. Dünya ve Türkiye kömür rezervlerinin karşılaştırılması (Atalay, 2015)

Rezervler	Sert kömür	Linyit	Birim
Dünya	430,9	416,6	Milyar ton
Türkiye	1,330	8,695	Milyar ton

Kömür endüstrisi Türkiye'de önemli bir sektördür. 2019 Kömür Sektör Raporu'na göre, birincil enerji tüketimi konusunda ilk sırayı 41,91 mtep (milyon ton eşdeğer petrol) ile ham petrol ve petrol ürünleri alırken; 41,17 mtep ile doğalgaz ikinci sırada; 40,97 (Taşkömürü, Linyit, Asfaltit, Kok) mtep ile de kömür üçüncü sırada yer almıştır. 2018 yılında, 15,12 mtep linyit, 0,65 mtep taşkömürü ve 0,77 mtep asfaltit olmak üzere, Türkiye toplam 16,55 mtep kömür üretilmiştir. Aynı yılda toplam 24,48 mtep kömür ithal etmiştir (Kömür (Linyit) Sektör Raporu, 2019). Yani ithal kömür %17, yerli kömür %11,5 olmak üzere, toplam %28,5 kömür yerli enerji tüketimde yer almaktadır. Yerli kömür üretim oranı 2008'de %16 iken, on yıl sonra, yani 2018'de %11,5'e düşmüştür. 1980 yılından bu yana, linyit kömürünün yerel üretimi artmaya devam ederken, taş kömürü üretimi azalmıştır. Türkiye'de kömür ithalatı 1980'lerden önce son derece düşükken, 1990'lardan 2000'lere kadar olan süreçte ithalatta ciddi bir artış ivmesi kaydedildi. Kömür ithalatı bugün büyümeye devam etmektedir (Tamzok, 2019).

1.2.2. Kömür endüstrisinde atıksuların oluşumu

Enerji ihtiyacının artmasıyla beraber artan kömür kullanımı ve neticesinde kömür maden sahaları, yıkama yerleri ve kok fabrikalarından çıkan atıksular ile termik santrallerden kaynaklanan atıksuların birleşmesiyle, kömürden kaynaklanan toksik atıksuların doğaya salınımı meydana gelmiştir (Maiti, 2019). Kömürden enerji sağlayan endüstriler temel olarak dört çeşit atıksu açığa çıkarmaktadırlar;

Birinci tür atıksu; kömür madenciliği esnasında bol miktarda üretilen maden suyudur. Çoğunlukla askıda katı maddelerden ve bakteriyel kirleticilerden oluşan sert sulardır.

İkinci tür atıksu; kömür yıkama sırasında ortaya çıkan atıksulardır. Bu işlem sırasında oldukça fazla miktarda katı madde suya karışmaktadır. Ayrıca kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve metal içerikli büyük kömür bulamacı içeren atıksulardır.

Üçüncü ve dördüncü tür atıksular ise; çelik üretimi ve yıkanmış kömürden elektrik üretimi esnasında çıkan atıksulardır. Çelik fabrikalarından ve termik santrallerden kaynaklanan bu tür atıksular, oldukça toksik olmakla birlikte azot, fenolik ve birçok organik kirleticiyi bünyesinde barındırmaktadır. Ayrıca, kömür yakma yoluyla elektrik üretimi sağlayan termik santraller birçok ağır metal içeren uçucu kül üretmektedir (Maiti, 2019).

Kömür kaynaklı atıksuların kalitesi, kömürün kalitesine, özelliklerine ve kömür işleme sürelerine bağlıdır. Kömür kaynaklı atıksular kirleticiler açısından oldukça zengindir. Bu tür atıksuların deşarjı, yeraltı suyu ile birlikte, yakınlarında bulunan su kütlelerinde de su yaşamını ve besin zincirini ciddi bir şekilde etkilemektedir. Kömür endüstrileri, kömürü işlerken oldukça fazla miktarlarda su kullanmaktadırlar.

Şekil 1.4'te verilmiş olan pülverize sistem ile kömür yığınlarının sulanması işlemi ve Şekil 1.5'te verilmiş olan pülverize sistem ile eleme-paketleme ünitelerinin sulanması işlemleri esnasında oldukça yüksek miktarlarda su kullanılmaktadır. Kömür madenciliği faaliyetlerinden meydana gelen kirli maden suları alıcı ortama direkt deşarj edildiklerinde büyük çevre sorunlarına sebep olmaktadır. Bu atıksular içeriğinde yüksek konsantrasyonlarda askıda katı maddeler, demir, alüminyum ve çözülmüş organik maddeler barındırmaktadır. Fenoller, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve heterosiklik bileşikler (nitrojen ve kükürt içeren) gibi organik kirletici maddelerin varlığından dolayı kömür atıksuyu, ayrıştırılması zor olan tipik endüstriyel atıksudur. Kömür atıksuyundaki KOİ ve amonyak azotu konsantrasyonu genellikle sırasıyla 300-5000 mg/L ve 150-400 mg/L arasındadır (Zhao ve diğ., 2017). Kirleticilerden bazıları siyanür, tiyosiyanat, amonyak, fenol, ağır metaller ve askıda katı maddeler olmasına rağmen, atıksu özellikleri çoğunlukla ana kömürün özelliklerine bağlıdır (Maiti, 2019).

Kömür maden suları oldukça fazla derişimlerde Tablo 1.3'te de gösterildiği üzere çözülmüş katılar, sertlik, kalsiyum, magnezyum, demir ve manganez içermektedir. Benzer karakteristiklerde olan kömür maden suları, asit maden suyu, kömür yıkama

atıksuları, kok tesisi atıksuları ve uçucu kül sızıntı sularının içerdikleri parametreler standart sınırların üzerinde değerlere sahiptir. Koklaştırma tesislerinin atıksuları diğer kömür içeren sektörlere göre yüksek miktarda amonyak, fenol, siyanür, tiyosiyanat, toplam azot, askıda madde ve KOİ içerir (Tablo 1.3).



Şekil 1. 4. Pülverize sistem ile kömür yığınlarının sulanması



Şekil 1. 5. Pülverize sistem ile eleme-paketleme ünitelerinin sulanması

Tablo 1.3. Maden suyu, asit maden suyu, kömür yıkama atıksuları, kok tesisi atıksuları ve uçucu kül sızıntı sularının karakteristikleri (Maiti ve diğ. 2019)

Parametreler	Kömür Maden Suyu	Asit Maden Suyu	Kömür Yıkama Atıksuyu	Kok Tesisi Atıksuyu	Uçucu Kül Sızıntı Suları
pH	5,02 - 8,7	2,9 - 5,8	2,5 - 8,2	6,5 - 11,5	4,4 - 12,9
İletkenlik	-	-	-	-	-
TÇK	174 - 1510	-	291 - 729	1920	142 - 1743
KOİ	-	-	192 - 6468	81 - 16000	-
Renk	<2,0	-	-	-	-
Bulanıklık	-	-	5387 - 23360	84-528	-
UV 254	-	-	-	-	-
Sülfür	5 - 749	489 - 14920	66 - 564	-	49 - 916
Florür	0,03 - 2,05	-	-	-	-
Kalsiyum	30 - 484	136 - 309	118 - 133	-	32 - 17250
Magnezyum	24 - 400	67 - 115	16	-	0,4 - 352
Demir	0,061 - 0,371	50 - 4537	0,13 - 212	-	0,02 - 6,7
Mangan	0,018 - 12,93	15 - 155	0,07	-	0,01 - 36,4
Alüminyum	-	7 - 800	-	-	1,4 - 373
Nikel	-	-	0,06	-	0,03 - 2,1
Kurşun	0,018 - 0,021	-	-	-	0,01 - 2,8
Kadmiyum	-	-	0,01	-	0,001 - 0,8
Çinko	0,012 - 1,533	0,01 - 4	-	-	0,01 - 37
Bakır	0,008 - 0,023	73	-	-	0,01 - 1,7
Arsenik	<0,01	-	-	-	0,28
Krom	<0,01	-	-	-	0,004 - 3,3
Sodyum	-	-	30	-	17 - 601
Sertlik	390 - 712	-	358 - 720	-	105 - 985

*pH, renk ve bulanıklık hariç bütün birimler mg/L'dir.

1.2.3. Kömür endüstrisinde oluşan atıksuların arıtımı

Kömür madenciliği sürecinde, tozların arındırılması için büyük miktarda su gerekir. Bu esnada kömür tozu, suya karışabilir ve bu şekilde yeraltına sızabilir. Kömür madeni atıksuları, toprak ve su kirliliği gibi ciddi çevresel etkileri nedeniyle uzun süredir endişe kaynağı oluşturmaktadır. Madencilik endüstrisinde, maden işleme veya kazı işlemleri için çok miktarda su tüketilir. Deşarj öncesinde oluşan atıksuların kontrol altına alınarak arıtılması gerekmektedir. Kömür madencilik tesislerinden çıkan atıksular genellikle pıhtılaşma/yumaklaşma yöntemleri kullanılarak arıtılır. Esas olarak daha büyük partiküler maddeler, çöktürme ile uzaklaştırılabilir. Fenolik bileşikler, aerobik veya anaerobik koşullar altında bozunabilir. Fenol atıksuyun

aerobik arıtımı çoğunlukla geleneksel aktif çamur işlemlerine dayanmaktadır. Bununla birlikte, kömür atıksuyunun biyolojik olarak arıtılması, mikrobiyal büyüme hızının yavaş olmasına ve kömür atıksuyu kalitesine bağlı olarak arıtma potansiyelinin sınırlandırılmasına neden olur (Yun ve diğ., 2019). Bu durum genellikle bazı kömür atıksularının bakteriler için toksik olmasından kaynaklanır.

Asit maden drenajı atıksuları, kömür yıkama atıksuları ve koklaştırma tesislerinin atıksularının Tablo 1.4'te gösterildiği üzere kömür endüstrisi atıksularının kullanılan arıtım yöntemleri ve giderim verimleri aşağıdaki gibidir.

Kömür maden sektörlerinden çıkan atıksu genellikle pıhtılaşma/yumaklaşma işlemi ile ya da biyolojik prosesler ile arıtılır. Bu süreçler bazen pahalıdır ve arıtım verimi açısından etkili değildir. Suyun yeniden kullanımı için, bu işlemler genellikle gerekli olan çıkış suyu kalitesine ulaşmada başarısız olur. Bu nedenle yüksek arıtım verimine ulaşmak için birçok arıtma süreci gerekebilir. Nanofiltrasyon (NF) veya Ters Osmoz (TO) gibi membran prosesleri günümüzde kömür endüstrisi atıksuyunun arıtımı ve yeniden kullanımı için araştırılmaktadır. Aslında kömür endüstrisi atıksuları, biyolojik işlemlerle giderilemeyen organik olmayan kirleticiler, partiküller, ağır metaller ve mineraller açısından zengindir.

Yeraltı taş kömürü madenciliği atıksuyunda NF ve TO ile yapılan deneylerde %80 Al, Fe, Cu, Mn, Mg, Na, Ca, bulanıklık, amonyum, sülfat giderimi gerçekleştirilmiştir (Yıldırım ve ark., 2019). Kömür gazlaştırma atıksularının çapraz akış filtrasyonunda üç nanofiltrasyon membranı (OWNF1, NF270 ve Desal-5 DK) kullanılarak sülfat ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) giderimi sırasıyla %92-%79'dur. Sodyum klorürün %85'inden fazlası geri kazanılabilir olduğu görülmüştür ve bu teknolojinin kaynak geri kazanımı ve kömür gazlaştırma endüstrisinin sifra yakın atıksu deşarjı için uygun olduğu belirtilmiştir (Li ve diğ., 2018).

Kömür gazlaştırma atıksuyunun (KGA) sifra yakın sıvı deşarjı (SSD), çevremizin korunması ve kömür gazlaştırma endüstrisinin sürdürülebilir gelişimi için çok önemlidir (Jia ve diğerleri, 2015). Kömür gazlaştırma atıksuyu (KGA), hem yüksek konsantrasyonda toplam çözünmüş katılar (TÇK) (yaklaşık 35.000 mg/L) hem de 1000 mg/L'den fazla KOİ içerir (Fang ve Han, 2018). Li ve ark., tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, çapraz akış filtrasyonunda üç nanofiltrasyon membranı

(OWNF1, NF270 ve Desal-5 DK), basınç (1.0 Mpa- 2.5 Mpa yükselmesi), konsantrasyon (10.000 mg/L'den 25.000 mg/L'ye yükselmesi) ve pH değerlerinin (3.0'dan 10.0'a yükselmesi) karşılaştırılması ile analiz edilmiştir. Çalışmada, anyonların ve katyonların konsantrasyonları, sırasıyla bir iyon kromatografik analiz cihazı ve bir endüktif olarak birleştirilmiş plazma emisyon spektrometresi kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar, sülfat gideriminin ve kimyasal oksijen ihtiyacının sırasıyla %92,12 ve %78,84'ten daha yüksek olduğunu gösterirken, organik bileşiklerin azalan giderim nedeninin, yüksek konsantrasyonlu çözeltilerde membran gözeneginin şişmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, organik bileşikler, membran aktif tabakasının negatif yükünü zayıflatmış ve sonuç olarak iyon giderimini azaltmıştır. Sodyum klorürün %85'inden fazlası geri kazanılabilir olduğu görülmüştür ve bu teknolojinin KGA'dan kaynak geri kazanımı ve kömür gazlaştırma endüstrisinin sıfıra yakın sıvı deşarjı için uygun olduğu belirtilmiştir.

Singh ve ark., tarafından 2012 yılında yapılmış çalışmada, koklaşmamış kömürden kok oluşturma işleminin ekonomisini iyileştirmek için membrana dayalı bir teknik uygulanmıştır. Araştırmada, koklaşmamış kömür, n-metil-2-pirolidon (NMP) ve etilendiaminin (EDA) organik çözücü karışımı kullanılarak ekstrakte edilmiştir. Çalışma, ortalama gözenek çapı yaklaşık 0.80 µm olan seramik mikrofiltrasyon membranının imalatını özetlemiştir. Membran karakterizasyonu yapılmış ve gözeneklilik 900-1000 °C sinterleme sıcaklığı aralığında 0.31 ile 0.28 olarak ölçülmüştür. Hazırlanmış olan seramik membranın, NMP, pH=4 ve pH=11 çözeltilerinde iyi kimyasal stabiliteye sahip olduğu belirtilmiştir. Kömür farklı kömür / NMP oranında ekstrakte edilmiş ve daha iyi ekstraksiyon için optimum oran 1:9 ve 1:10 olarak belirlenmiştir. Mikrofiltrasyon permeatı tekrar ekstraksiyon için kullanılmış ve işlem üç ardışık aşamada tekrarlanmıştır. 1. aşamada, ekstraksiyon işleminden sonra filtrat mikrofiltrasyona tabi tutulmuş ve saf NMP'nin %71' i permeat olarak geri kazanılmıştır. 1. aşamadan elde edilen permeat ayrıca 2. aşamada ve daha sonra 3. aşamada ekstraksiyon işlemi için kullanılmıştır. Geri kazanılan çözücünün, 2. ve 3. aşamada sırasıyla %68 ve %6 olduğu görülmüştür. Üç aşamada geri kazanılan kokun verimliliğinin, 1: 9 (ağırlık / hacim) kömür / çözücü oranı için sırasıyla %98,2, % 72,2 ve % 70 olduğu belirtilmiştir. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) analiz sonucu, her üç aşamadaki permeatın kömür içermediğini ve daha ileri ekstraksiyon işlemi için tekrar kullanılabilceğini göstermiştir. Bu nedenle, bu

membran bazlı teknolojinin, mevcut damıtma tekniği kullanılarak çözücü geri kazanım maliyetini kesinlikle azaltacağı vurgulanmıştır.

Tablo 1.4. Kömür endüstrisi atıksularının arıtım yöntemleri

Kömür Atıksuyu Türü	Materyal-Metot	Sonuçlar	Kaynak
Asit Maden Drenajı (AMD)	Nanofiltrasyon-2540 membran	Orta basınçta As, Sb, Pb, Hg giderimi	Sierra ve ark. (2013)
Asit Maden Drenajı (AMD)	Midye kabuğu + sülfat azaltıcı biyoreaktör	%86-90 Al, Fe, Cu, Zn giderildi; pH ve alkalinite 6'ya çıkarıldı	Uster ve ark. (2015)
Asit Maden Drenajı (AMD)	Metanol + sülfat azaltıcı biyoreaktör	%88 SO ₄ , %98 Fe giderimi, pH arttırıldı	Tsukamoto ve Miller. (1999)
Kömür Yıkama Suları	Uçucu kül pıhtılaştırıcı	%90 KOİ, AKM giderimi, pH=9	Yan ve ark. (2012)
Kömür Yıkama Suları	Nişasta + Alum + FeCl ₃	%90 NTU, AKM giderimi, pH=4	Nnaji ve ark. (2014)
Kömür Yıkama Suları	Kitin Koagülant	%90 NTU, AKM giderimi, pH=8	Menkiti ve Onukwuli. (2011)
Kok Fabrikası Atıksuyu	Elektrokimyasal Oksidasyon	%90 KOİ ve Amonyak giderimi	Chiang ve ark. (1995)
Kok Fabrikası Atıksuyu	A1-A2-O + <i>Burkholderia pickettii</i>	%16-59 KOİ giderimi	Jianlong ve ark. (2002)
Kok Fabrikası Atıksuyu	A1-A2-O-MBR	%71-99 KOİ, fenol, amonyak, TN giderimi	Zhao ve ark. (2009)
Kok Fabrikası Atıksuyu	A1-A2-O + MBR + nanofiltrasyon + ters osmoz	%45-99 KOİ, BOİ, amonyak, fenol, TCN, tiyosiyanat ve florür giderimi	Jin ve ark. (2013)
Kok Fabrikası Atıksuyu	Ardışık Kesikli Reaktör	%85-99 Amonyak, KOİ, Tiyosiyanat ve Fenol giderimi	Maranon ve ark. (2008)
Kok Fabrikası Atıksuyu	Nitrifikasyon-Denitrifikasyon Biyofilm	%94 Amonyak ve KOİ giderimi	Rong ve ark. (2007)
Kok Fabrikası Atıksuyu	Vakum Damıtma + NaOH	%99 KOİ giderimi	Mao ve ark. (2010)
Kok Fabrikası Atıksuyu	Membran Damıtma + Ön koagülasyon	Uçucu olmayan organik kirleticilerin %90 giderimi	Li ve ark. (2016)

1.3.Endüstriyel Atıksuların Geri Kazanımı

1.3.1. Atıksuların geri kazanımı

Günümüzde, nüfusun ve sanayileşmenin artması ülkemizde ve dünya çapında kullanılabilir su kaynaklarının azalmasına neden olmuştur. Bu durumun başlıca sebepleri aşağıda belirtilmiştir (Topacık, 2016):

- Nüfusun giderek artması ile birlikte kişi başına düşen kullanılan su miktarının artması,
- Artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için artan endüstriyel faaliyetler ile beraber gerekli su ihtiyaçlarının da artması,
- Hızlı kentleşme ile beraber su kaynaklarının yok edilmesi,
- Tarımda gereksiz su kullanılan eski yöntemlerin kullanılması

Türkiye’de bölgesel su problemleri yaşanmakta olup, su bulunmayan bölgelerde alternatif su kaynaklarının bulunması ve yenilikçi su yönetimi planlarının oluşturulması giderek önem kazanmaktadır (Topacık, 2016). Gelişmekte olan ülkelerdeki atıksuyun yaklaşık %90’ı arıtılmadan doğrudan nehirlerle, göllere veya okyanuslara deşarj edilmektedir. Gelişmiş ülkelerde sanayi en büyük su tüketicisidir ve sanayilerde kullanılan su, toplam su talebinin %50-80’ini oluşturmaktadır. Endüstriyel atıksu, karmaşık organik bileşikler ve ağır metaller dahil olmak üzere oldukça toksik kirlilik nedeniyle hem insan sağlığına hem de çevresel felaketlere neden olur. Atıksuların çevresel etkilerini azaltmak ve günümüzde önemli bir problem haline gelen su taleplerini azaltmak için geri dönüştürülmesi gerekmektedir (Piadeh ve diğ., 2014).

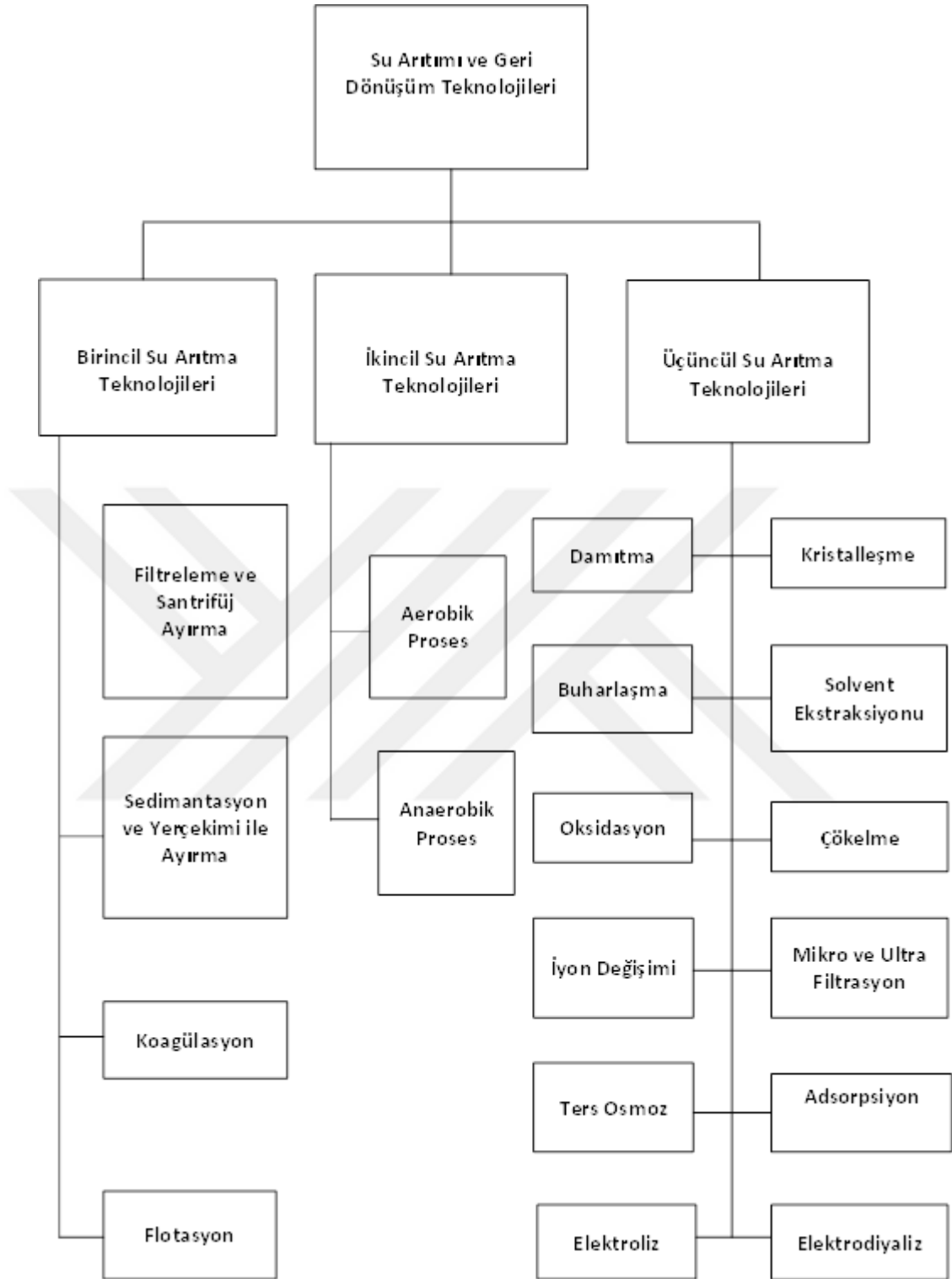
Genel olarak ele alındığında arıtım süreci birincil arıtma, ikincil arıtma ve üçüncül arıtma olarak adlandırılmaktadır (Gupta ve diğ., 2012). Evsel atıksular esas olarak Adsorpsiyon-Biyodegradasyon (AB) prosesi, Ardışık Kesikli Reaktörler (AKR), Anaerobik-Anoksik (A2/O) prosesi ve aktif çamur (AÇ) prosesleri kullanılarak arıtılmaktadır (Liu ve diğ., 2020). Ayrıca arıtılmış olan sudan temiz su üretebilmek için ultraviyole ile dezenfeksiyon ya da membran teknolojileri gibi prosesler kullanılmaktadır. Atıksu geri kazanımında, doğrudan ve dolaylı olarak kullanılan iki yöntem mevcuttur (Topacık, 2016):

-Doğrudan geri kazanım: Bu yöntemde geri kazanılmış su, direkt olarak endüstride veya tarımda belirlenen yerde kullanılmaktadır.

-Dolaylı geri kazanım: Bu yöntemde ise, arıtılan atıksu yeraltı suyu rezervuarlarında ya da yüzeysel sularda toplanmakta ve mevcut olan su kaynağına karıştırılıp kullanılmaktadır.

Arıtılmış atıksuyun beklenen kalitesine ve nihai kullanımına bağlı olarak farklı arıtma teknolojileri kullanılmaktadır. Birincil, ikincil ve üçüncül arıtma teknikleri, kimyasal, biyolojik ve fiziksel arıtma süreçleridir. Birincil arıtma, fiziksel ve kimyasal nitelikte ön arıtma süreçlerini içerirken, ikincil arıtma atıksuyun biyolojik arıtımı ile ilgilidir. Üçüncül arıtma proseslerinde, atıksu (birincil ve ikincil proseslerle arıtılmış atıksu), farklı amaç türleri için kullanılabilir kaliteli suya dönüştürülür. Komple bir su arıtma tesisinde, kaliteli ve güvenli su üretmek için tüm bu üç süreç bir araya getirilir. Atıksu arıtmanın tam şeması Şekil 1.6'da (Gupta ve diğ., 2012) gösterilmektedir. Membran teknolojileri, atıksu geri kazanımı için kullanılan olmazsa olmaz teknolojilerdir. Genelde tesiste mevcut olan arıtma sistemlerinin devamında kullanılan, Mikrofiltrasyon (MF), Ultrafiltrasyon (UF), Nanofiltrasyon (NF), Ters Osmoz (TO) teknolojilerdir (Topacı, 2016). Tablo 2.3'de Atıksu geri kazanımı için kullanılan arıtma teknolojileri ve bu teknolojilerin giderdikleri kirleticiler verilmektedir.

Her türlü kaynaktan yüksek kalitede su üretilmesine olanak tanıyan membran teknolojisi, özellikle son yıllarda gelişen teknolojik imkanlar neticesinde ciddi ilerlemeler kaydetmiştir. Membran yöntemi ile geri kazanılmış su, yapay akifer şarjı ve dolaylı içilebilir yeniden kullanım yoluyla, içme suyu tedarikinde büyük destek sağlamaktadır. Membran yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde MF, UF ve TO gibi basınçla çalışan membran prosesleri ile evsel atıksudan geri kazanılmış su elde edilebileceğini ortaya koymuştur, (Ghayeni ve diğ., 1996; Ravazzini ve diğ., 2005; Gu ve diğ., 2019). Ayrıca, atıksuların arıtılmasında membran distilasyon (MD) teknolojisi ile atıksu arıtımı ve atıksuyun geri kazanımı ilgi görmeye başlamıştır (Li ve diğ., 2016). Membran ile atıksuyun arıtımında en büyük avantaj, tek bir geçişle tüm kirleticilerin sudan uzaklaştırılarak saf su elde edilebilmesidir.



Şekil 1.6. Atıksu arıtma ve geri dönüşüm teknolojileri şeması (Gupta, 2012)

Tablo 1.5. Atıksu geri kazanımında uygulanan arıtma teknolojileri ve giderdikleri kirleticiler (Demir ve diğ.,2017)

Arıtma Birimleri	Askrda Katı Madde	Kolloidal Maddeler	Partiküller Organik Madde	Çözünmüş Organik Madde	Azot	Fosfor	Eser Maddeler	Toplam Çözünmüş Madde	Bakteri	Protozoa	Virtüs
İkincil arıtma	✓			✓							
Nütriënt giderimi				✓	✓	✓					
Filtrasyon	✓								✓	✓	
Yüzey filtrasyonu	✓		✓						✓	✓	
Mikrofiltrasyon	✓	✓	✓						✓	✓	
Ultrafiltrasyon	✓	✓	✓						✓	✓	✓
Flotasyon	✓	✓	✓							✓	✓
Nanofiltrasyon			✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
Ters osmoz				✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elektrodiyaliz		✓						✓			
Karbon adsorpsiyonu				✓			✓				
İyon değiştirme					✓		✓	✓			
İleri oksidasyon			✓	✓			✓		✓	✓	✓
Dezenfeksiyon				✓					✓	✓	✓

1.3.2. Endüstriyel atıksuların geri kazanımında kullanılan teknolojiler

İnsanların günlük faaliyetleri nedeniyle çevreye salınan atıksu miktarı günden güne artmaktadır. Bu durumda, atıksuların arıtılması hususunda ciddi tedbirlerin alınması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Aksi takdirde arıtılmadan çevreye salınan atıksular, halk sağlığını olumsuz etkileyerek ciddi problemlere sebep olacaktır. Dünya üzerinde birçok örnekte görüldüğü gibi ham ya da kısmi olarak arıtılmış atıksular birçok salgın hastalığın meydana gelmesine ortam hazırlamaktadır (Kamizoulis ve diğ., 2003). Atıksu arıtma tesislerinde çalışan yöneticiler, arıtılmış olan suların alıcı ortamdaki su florasını bozmadan ya da suyun yeniden kullanımının sağlanabilmesi açısından büyük bir sorumluluk yüklenmişlerdir (Omondi, 2016). Dünyadaki bütün ülkeler atıksularını arıtmaktadır ve doğal su sürecinin bir parçası haline getirmektedirler. Her geçen gün artan dünya nüfusu ile birlikte sanayileşmenin de neden olduğu su kirliliği, zaten kısıtlı bulunan temiz suya ihtiyacın artmasıyla

birleştğinde, arıtım ve geri dönüşüm süreçlerine ihtiyaç ortaya çıkmış, bu süreçlerin kullanımı yaygınlaşmıştır (Aani ve diğ., 2020).

Yapılan araştırmalar neticesinde elde edilen verilere göre, tahmini olarak insan nüfusunun %40' indan fazlası temiz suya ulaşmakta sorun yaşayacak (Wallace ve Johnstone, 2010). 2005 yılına kadar olan zaman diliminde Bixio ve ark. tarafından yapılan bir araştırmaya göre, çoğunluğu Japonya (1.800'den fazla) ve ABD'de (800'den fazla) olmak üzere, 3.000'den fazla atıksu geri dönüşüm tesisi tespit edilmiştir. Geçtiğimiz on yıllık döneme bakıldığında ise, AB ve Avustralya'da sırasıyla 200 ve 450'den fazla projenin hayata geçirildiği belirlenmiştir. Latin Amerika'da 50'den fazla ve Sahra Altı Afrika'da 20'den fazla olmak üzere, Akdeniz ve Ortadoğu bölgelerinde yaklaşık 100 adet projenin hazır durumda olduğu görülmektedir (Bixio ve diğ., 2005). Yapılan bu çalışmaya göre belirlenen rakamların hızla artması beklenmektedir.

Sanayi siteleri için en büyük endişelerden biri su kıtlığıdır. Bu nedenle, atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanılması sanayi sitelerindeki su kıtlığının önüne geçilebilmesi için en pratik çözümdür (Piadeh ve diğ., 2014). Atıksuların, ileri teknolojik yöntemlerle arıtılması ve bu arıtılan suların geri kazanımı ve yeniden kullanımı, ulusal ve bölgesel ölçekte sürdürülebilirlik için önem taşımaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde, endüstride geri kazanılan suların kullanımı oldukça yaygındır. Endüstriyel tesislerde, atıksuyun tesis içerisindeki geri kazanımı, genellikle prosesin bir parçası şeklinde uygulanır (Asan, 2013). Endüstride geri kazanılan su, baca gazı yıkama proseslerinde, kül sulama işlemlerinde, soğutma kulelerinde, radyoaktif atıkların seyreltilmesi işlemlerinde vs. kullanılmaktadır (Demir ve diğ., 2017). Endüstriyel atıksuların geri kazanımında yapılan bazı çalışmalar Tablo 1.6'da verilmiştir.

Mohsen, Ürdün'ün Al Hussein termik santrallerden gelen atıksuyun, ters osmoz dahil olmak üzere filtrasyonla arıtılabileceğini ve tesiste proses suyu olarak yeniden sirküle edilebileceğini keşfetmiştir (Mohsen, 2004). Tesisten geri kazanılan atıksu, termik santralin yüksek su tüketimine çözüm olabilir. Endüstri, önemli miktarlarda yeniden kullanılabilir atıksu kaynağı olarak düşünülebilir. Bu nedenle, endüstri, daha iyi su verimliliği, daha fazla geri dönüşüm ve yönetime yatırım yapmaya teşvik

edilmelidir. Piadeha ve diğ. (2014)' a göre, İran'da şu anda toplam arıtılmış atıksuyun sadece %20'si sulama için kullanılmaktadır ve neredeyse %80'i endüstriyel amaçlarla tüketilmektedir.

Tablo 1.6. Literatürde endüstriyel atıksuların geri kazanımı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar

Endüstri Atıksuyu Türü	Materyal-Metot	Sonuçlar	Kaynak
Yünlü tekstil atıksu	Membran biyoreaktör, nanofiltrasyon ve ters osmoz	%52-99 iletkenlik, bulanıklık, toplam nitrojen, renk, KOİ giderildi	Cinperi ve ark. (2019)
Metal kaplama endüstrisi atıksu	Ultrafiltrasyon / ters Osmoz	%91,3 - %99,8 metal elementler, organik ve inorganik bileşikler giderimi	Petricic ve ark. (2015)
Tekstil boya atıksuları	Elektrokoagülasyon prosesi ve ardından iyon değişim prosesi	%92,31 KOİ giderimi	Raghu ve ark. (2007)
Süt endüstrisi atıksu	Pıhtılaşma, adsorpsiyon ve Ters Osmoz	Renk ve koku dahil tüm kirleticilerin çok yüksek oranda giderimi. %98 KOİ giderimi.	Sarkar ve ark. (2006)
Soya yemeklik yağ imalat sanayi	Fizikokimyasal ve biyolojik arıtma	%94-98, %92-97 ve %97-99 KOİ, TÇK ve yağ ve gresin sırasıyla genel giderimi	Rajkumar ve ark. (2010)
Tekstil endüstrisi atıksu	Nanofiltrasyon	%99, %75-95 sırasıyla KOİ ve tuz giderimi	Gozálvez-Zafrilla ve ark. (2008)
Yarı iletken endüstrisi atıkları	-Bor seçici reçine ve aktif karbon filtre -Aktif karbon filtre + UF + TO	Yüksek bor ve TOK giderim verimi, Ultra saf su üretimi.	Eng ve ark. (2019)
Petrol, tekstil, ilaç ve evsel atıksular karışımı	Ozonlama ile askıda büyüme biyolojik süreci	%92,1, %90,6, %83,3 ve %83,8 sırasıyla COD, BOİ ₅ , TN ve PO ₄ -P giderimi	Egbuikwem ve ark. (2020)
Hurma yağı değirmeni atıksu	Ultrafiltrasyon + Ters Osmoz	%100, %98,8 ve %99,4 sırasıyla bulanıklık, KOİ ve BOİ giderimi	Ahmad ve ark. (2003)

1.3.3. Kömür Endüstrisi Atıksularının Geri Kazanımı

Çeşitli madencilik endüstrilerinden gelen atıksular, suyun farklı amaçlarla arıtılması ve yeniden kullanılması için incelenmiştir. Her 100 ton kömürün yıkanması için 2270-7570 m³ suya ihtiyaç duyduğu tahmin edilmektedir. Kömür yıkamalardan çıkan bu büyük miktardaki atıksu, kömür yıkamada yeniden kullanılmak ve temiz su tüketimini azaltmak için arıtılabilir (Maiti ve diğ., 2019). Atıksuyun geri kazanımı için birçok alternatif yöntem vardır. Membran proses yöntemleri, atıksuların arıtımı için güvenilir bir arıtım yöntemidir.

Wadekar ve Radisav, tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, güneybatı Pensilvanya'daki gerçek bir bölgeden terk edilmiş asit maden drenajının (AMD) arıtımı için seramik ve polimerik nanofiltrasyon membranlarının performans ve kirlenme özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, süzüntü geri kazanımındaki artışın, iyon reddini arttırdığı fakat her iki zar için geçirgenliği azalttığı belirtilmiştir. Arsenik, her iki zar tarafından zayıf bir şekilde giderilmiştir; polimerik membran için maksimum giderimin %33 olduğu belirtilmiştir. Kirlenmenin %75 permeat geri kazanımında meydana geldiği görülmüştür. Uygulanan kimyasal temizleme geçirgenliği arttırmış, ancak her iki zar için etkili membran gözenek boyutunda hafif bir artış gösteren iyonik reddi azaltmıştır. Besleme pH'ı 4'e ayarlandığında, iyonik giderim seramik membran için artmış ve polimerik membran için azalmıştır. Antiskalant ilavesi, her iki zar için, özellikle de reddi en az %41 oranında iyileşen arsenik için iyonik reddi geliştirmiş, ancak her iki zar için geçirgenlikte yaklaşık %40 azalma ile sonuçlanmıştır. Daha sıkı bir polimerik nanofiltrasyon membranı, nanofiltrasyon aşamasından önce çıkarılması gereken arsenik hariç tüm içme suyu standartlarını karşılamak için tüm çok değerlikli iyonların %99'unun giderilmesini sağlamıştır.

Kömür atıksuyu arıtımında ve yeniden kullanımında, arıtılmış su kalitesini iyileştirmek ve membran kirlenmesini azaltmak için ön arıtma olarak geleneksel işlemler kullanılabilir. Dang ve ark. kömür madeni atıksuyunda pıhtılaşma/sedimentasyon/filtrasyon işlemlerinden sonra mikrofiltrasyon membranları kullanmışlardır. Mikrofiltrasyon membran Fe <0.5 mg/L, Mn <0.3 mg/L, sertlik <350 mg/L CaCO₃ sonuçlarını karşılayan istikrarlı ve yüksek kaliteli

bir su arıtım sistemidir (Dang ve diğ., 2018). Şangay Baosteel Chemical Co tarafından geliştirilen pilot MBR, NF ve TO entegre sistemi ile birlikte anaerobik, anoksik ve oksik süreçleri (A1/A2/O) kullanan tam ölçekli bir tesisin kok atıksuyunun bir yıl boyunca endüstriyel yeniden kullanım için arıtılması araştırılmıştır. Xiong ve Wei 2017 yılında Çin'de kömür kimya endüstrisinde yaptıkları çalışmada, atıksu yönetimi için Sıfır Sıvı Deşarjı uygulamasının mevcut durumunu ve süreçleri incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarına dayanarak, mevcut sıfır sıvı deşarjı çözümlerinde büyük teknik zorlukların mevcut olduğunu belirtmişler ve teknoloji trendlerinin, daha iyi başarı elde etmek için gelişmiş organik giderme teknolojilerinin, hibrid membran ve oda sıcaklığı kristalizasyon teknolojilerinin, yüksek tuzluluk membran konsantrasyon teknolojilerinin ve saf tuzlara yönelik kristalizasyon teknolojilerinin daha fazla dahil edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Yıldırım ve ark. (2019), NF ve TO prosesleri ile kömür endüstrisinden kaynaklanan atıksuların arıtılarak yeniden kullanılmasına dair bir çalışma yapmışlardır (Yıldırım ve diğ., 2019). Buna göre NF ve TO membran prosesleri, kömür atıksuyundan kirletici ve iyonları uzaklaştırıp yeniden kullanılmasını sağlayacak optimum membran prosesler olarak belirlenmiştir.

1.4. Membran Prosesler

Günümüzde, su kaynaklarının git gide kirlenmesi ve azalması ile beraber, suların tekrar kullanılmasına ihtiyaç doğmuştur. Suların tekrar kullanımı, deşarj standartlarının ağırlaştırılması nedeniyle ileri arıtma proseslerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Membran prosesleri, yüksek arıtma performansına sahip olmaları nedeniyle önemli bir ileri arıtma teknolojisi olmuştur (Yarmuhammet, 2012).

Teknoloji ile birlikte kullanım alanlarında artış olan membran prosesleri ile ilgili özellikle endüstriyel atıksuların arıtımı ve geri kazanımı konusunda yapılan çalışmalar giderek artmış ve membranlar, günümüzde atıksu arıtımı ve geri kazanımında kullanılan ileri arıtım yöntemlerinden biri haline gelmiştir (Yılmaz, 2016).

1.4.1. Membranların çalışma prensibi

İki fazı birbirinden ayırt etmeyi ve maddelerin bir taraftan diğerine geçişini sağlayan, organik polimer, inorganik polimer veya metal yapılardan oluşan geçirgen veya yarı geçirgen malzemeye membran denilmektedir.

Membran sistemleri; besleme, süzüntü ve konsantre olmak üzere üç farklı fazdan oluşur. Arıtma prensibi, ilk fazdaki bileşenin membran tarafından belli oranlarda tutulması işlemine dayanır. Membran sisteminde akım, süzüntü ve konsantre olmak üzere iki kısma ayrılır. Membrandan, süzüntü tarafına doğru bir geçiş olması için sürücü kuvvet uygulanır. Membrandan kütle transferi ve seçici madde taşınımları;

-Sıcaklık farkı

-Konsantrasyon farkı

-Basınç farkı

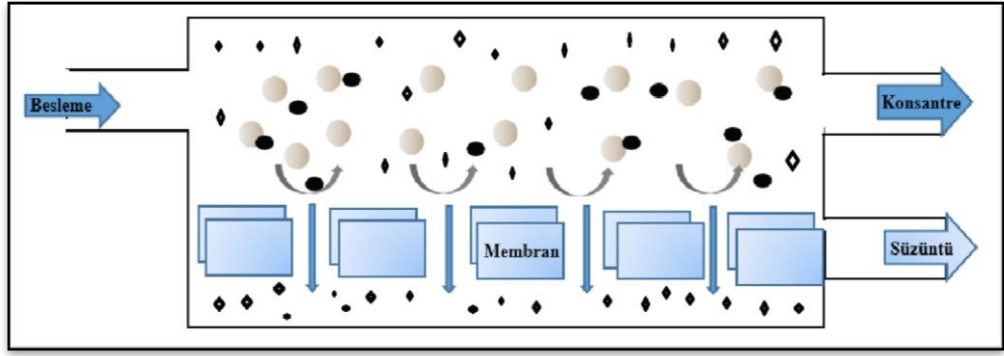
-Elektriksel potansiyel farkı

gibi sürücü kuvvetler vasıtasıyla gerçekleşir. Membranlar, sürücü kuvvetlerine göre, ayırma mekanizmalarına göre, morfolojilerine göre, geometrilerine göre ve kimyasal yapılarına göre beş şekilde sınıflandırılabilirler. Tablo 1.7’de, membranların sürücü kuvvetlerine göre sınıflandırılması verilmiştir.

Membran proseslerde en çok uygulanan sürücü kuvvet basınç farkıdır (Koyuncu, 2009). Şekil 1.7’de membranların iki farklı fazı ayırma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre membran sistemi, besleme noktasından giren ve tek faz gibi görünmekte olan sıvıları ayırarak iki farklı faz haline getirir. Sonuç olarak süzüntü ve konsantre olarak iki faz elde edilir (Demir, 2019).

Tablo 1.7. Membranların sürücü kuvvetlerine göre sınıflandırılması (Acı, 2011)

Membran prosesler	Faz 1	Faz 2	Hareket gücü*
Mikrofiltrasyon	Sıvı	Sıvı	ΔP
Ultrafiltrasyon	Sıvı	Sıvı	ΔP
Hiperfiltrasyon (HF), (TO)	Sıvı	Sıvı	ΔP
Gaz seperasyonu	Gaz	Gaz	ΔP
Dializ	Sıvı	Sıvı	ΔC
Osmoz	Sıvı	Sıvı	ΔC
Pervaporasyon	Sıvı	Gaz	ΔE
Elektrodiyaliz	Sıvı	Sıvı	ΔP
Termo-osmoz	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$
Membran distilasyonu	Sıvı	Sıvı	$\Delta T/\Delta P$



Şekil 1.7. Membranların iki farklı fazı ayırma mekanizmaları (Mulder, 1997)

1.4.2. Membran sistemlerinin avantaj ve dezavantajları

Membran ayırma işlemlerinin bazı özel avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan biri, kimyasal ilavesi ya da faz değişikliği olmaksızın, besleme akışının fiziksel bir ayırma yöntemine dayanıyor olmasıdır. Ayrıca membran ayırma yöntemleri ısıya ihtiyaç duymadan çalışabilmektedir. Bu özel avantaj neticesinde membran prosesler geleneksel ayırma yöntemlerine göre (damıtma, kristalleştirme, adsorpsiyon vb.) daha düşük enerji tüketmektedirler. Membran sistemlerinin çok fazla avantajının yanında, tıkanıklık gibi oldukça önemli dezavantajları da mevcuttur. Tablo 1.8'de membran sistemlerinin avantajları ve dezavantajları verilmektedir.

Tablo 1.3. Membran sistemlerinin avantaj ve dezavantajları (Sorbay, 2016; Demir, 2019)

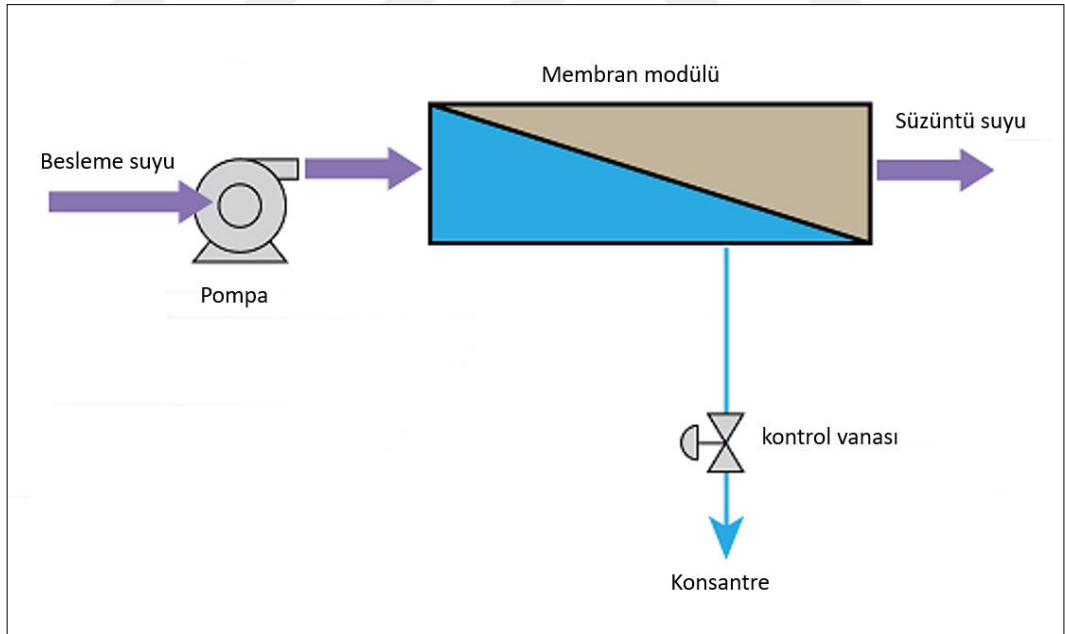
Avantajları	Dezavantajları
Az alan gereksinimi	İşletme ve bakım maliyetlerinin yüksek olması
Suyun geri kazanımı	Membran tıkanma sorunu
Çöktürme tankına gerek kalmaması	Membran sistemlerinin mekanik ve kontrollerinin kompleksliği
Yüksek çamur yaşı sebebiyle daha az çamur üretimi	Konsantrenin bertaraf edilmesi
Yüksek MLSS yüklemelerine olanak sağlaması	
Düşük enerji gereksinimi	
Sıcaklık ve faz değişimlerinden etkilenmemeleri	
İlave kimyasal ihtiyacının olmaması	
Boyut sınırlamasının olmaması	
Membran sistemlerinin gelişmesiyle maliyetlerin düşmesi	

1.4.3. Basınç sürücü membran prosesler

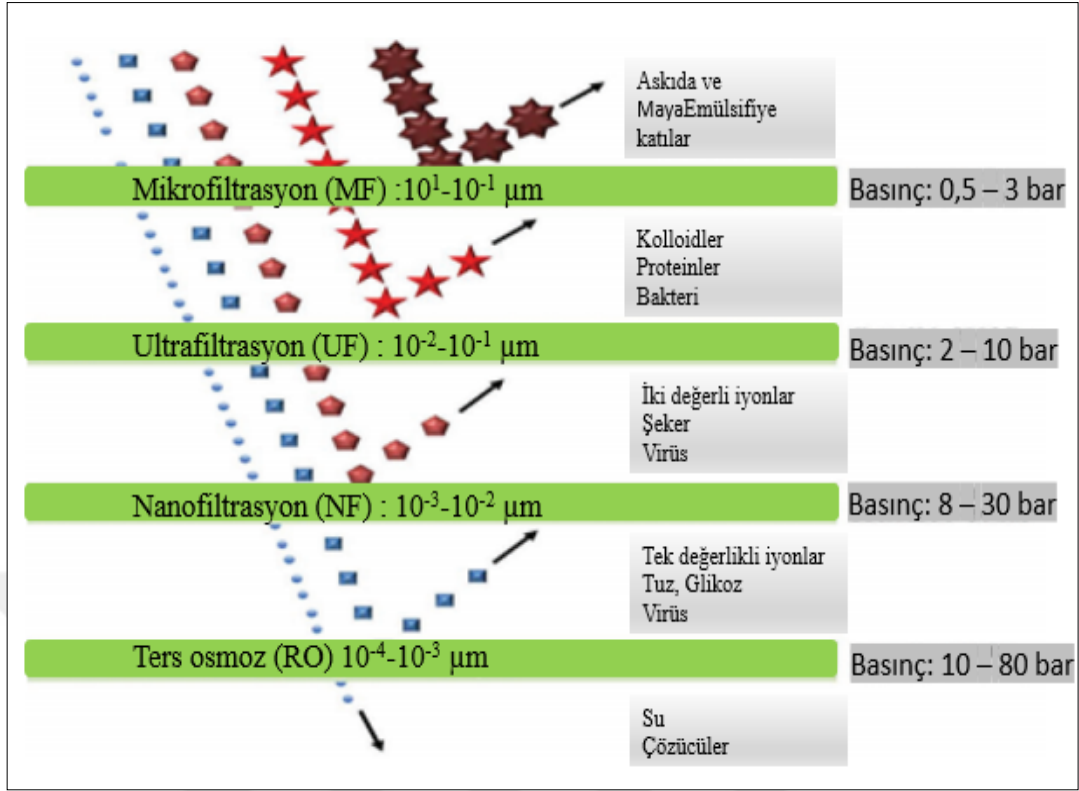
Endüstriyel olarak en çok kullanılan membran prosesleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Mikrofiltrasyon (MF),
- Ultrafiltrasyon (UF),
- Nanofiltrasyon (NF)
- Ters osmoz (TO)

Yukarıda bahsi geçen membran prosesler basınç ile çalışmaktadırlar. Çalışma prensipleri gereği organikleri, nütrientleri, bulanıklığı, mikroorganizmaları, inorganik metal iyonlarını ve diğer oksijen tüketen kirleticilerin geçişlerini engeller, adeta bir seçici bariyer görevi görerek yalnızca temiz suyun geçişine izin vermektedirler. Basınç sürücü membran prosesleri için basitleştirilmiş akış şeması Şekil 1.8’de verilmiştir (Acı, 2011). Membranın gözenek boyutuna bağlı olarak farklı kirleticiler uzaklaştırılır. En küçük gözenek boyutu (TO membranı), Şekil 1.9’da (Palit, 2014) gösterildiği gibi mümkün olan en fazla ve en küçük kirleticileri ortadan kaldırır.



Şekil 1.8. Basınç sürücü membran prosesleri için basitleştirilmiş akış şeması (Acı, 2011)



Şekil 1.9. Kirlenici maddelerin farklı basınç sürücü membran prosesleri ile giderimi (Palit, 2014)

1.4.4. Membranların çalışma prensibi

1.4.4.1. Mikrofiltrasyon (MF)

Mikrofiltrasyon membranları, basınç sürüclü membran proseslerin en eskilerindedir. MF membranları, 5 µm'den büyük çaplı partikülleri tutmak için kullanılmaktadırlar. Membran direnci düşük olduğu için, alçak basınçta (0-2 bar) çalıştırılırlar. MF membranları ile, kil, silt, büyük kolloidler ve bakteriler giderilebilmektedir (Demirkol, 2014). MF membranlar, basınçla çalışan membran sistemler arasında kirleniciyi en düşük verimle tutan membranlardır. MF membran sistemler bazı arıtma proseslerinde bir ön arıtma olarak kullanılabilirler.

MF membranları genellikle, gıda, meşrubat, alkol, ilaç endüstrisinde, saf su eldeğinde, yağlı su karışımlarını ayırmak için, metal geri kazanımında ve atıksu arıtımında kullanılmaktadır. Son zamanlarda, MF sistemleri, geri kazanım

proseslerinde UF membranlarından önce ön arıtmada kullanılmaktadır (Koyuncu, 2001; Demirkol, 2014).

1.4.4.2. Ultrafiltrasyon (UF)

Ultrafiltrasyon (UF) membranları, 0,1- 0,01 µm aralığındaki partikülleri tutmak için kullanılmaktadır. Ultrafiltrasyonda uygulanan basınç aralığı (1-7 bar), mikrofiltrasyona (0-2 bar) göre daha yüksektir ve yüksek giderim verimi elde edilebilir. Maddelerin membranda tutulma düzeyleri, moleküler ağırlık engelleme sınırıyla ifade edilmektedir. Moleküler ağırlık engelleme sınır değerinin altında olan maddeler UF membranda tutulamamaktadır. Bu membranlarda, moleküler ağırlıkları 1.000–100.000 Da (Dalton) arasında olan maddeler tutulmaktadır (Rautenbach, 1997; Dizge, 2011).

UF membranları genellikle, gıda, süt, tekstil, ilaç, kağıt, kimya ve deri endüstrilerinde kullanılmaktadır (Demirkol, 2014). Ayrıca TO ve NF prosesleri, ön arıtma amacıyla kullanılabilir. Ayrıca TO ve NF prosesleri, ön arıtma amacıyla kullanılabilir.

1.4.4.3. Nanofiltrasyon (NF)

1980'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanan NF membranlar, günümüze kadar uzanan süreçte uzun bir yol kat etmiştir. UF ve TO membranlar, özellikle de NF membranlar bir ayırma aracı olarak da kullanılabilir. Bu çok yönlü özelliği nedeniyle nanofiltrasyon membranlara ilgi giderek artmaktadır (Mohammad ve diğ., 2015). Nanofiltrasyon (NF) membranları, son yıllarda kullanılmaya başlanan membranlardan olup, moleküler ağırlık sınırı (200–2000 Da) UF ile TO arasında olan membran prosesidir. NF membranların işletme basınçları 10-20 bar arasındadır. NF membranlar, genellikle, virüslerin, bakterilerin, organik kalıntıların ve sertliğin uzaklaştırılması amacıyla kullanılmaktadır (Akdağlı ve Arslan, 2008).

NF prosesi ters osmoza göre düşük işletme basıncı, yüksek akı, çok değerlikli anyon tuzlarının giderimi, molekül ağırlığı 100 ila 1000 Da arasında değişen organik bileşiklerin yüksek verimle giderilmesi, düşük yatırım ve işletme/bakım maliyetlerine sahip olması gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar sebebiyle de NF ile yapılan çalışmalar dünya çapında artmaktadır (Dach, 2008). NF ile Mg^{+2} ve Ca^{+2} gibi +2 değerliğe sahip iyonlar ile boyutu 1 nm'den büyük olan partiküllerin

gideriminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nanofiltrasyon membranların ayırt edilmesini sağlayan en temel özellik, tek değerlikli iyonların gideriminde düşük verim olsa da iki değerlikli iyonların giderimi çok yüksek verimle giderilmektedir (Nada, 2014). Ayrıca, TO membran sistemlerine kıyasla daha yüksek akılarda kullanılabilirlerdir.

Önceleri deniz suyunu tuzsuzlaştırmak için nadiren kullanılan NF membranlar, ters osmoz ve elektrodializ gibi sistemlerin geliştirilmesiyle beraber yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. NF membranları genellikle, TO öncesinde ön arıtmada, içme suyu arıtılmasında, suların yumuşatılma işlemlerinde, süt endüstrisinde atıksu geri kazanımında, atıksuların renk gideriminde vs kullanılmaktadır (Demirkol, 2014). Bununla beraber, sudan pestisit ve herbisitlerin giderimi, ağır metallerin ayrıştırılması ve renk gideriminde de NF membranları kullanılmaktadır. NF prosesi su ve atıksuların arıtımında askıda katı maddelerin giderimi ile organik ve inorganik maddelerin içeriğini azaltmak için aşamalı olarak kullanılmaktadır. NF ve TO prosesleri üzerine yapılan birçok çalışma göstermiştir ki, TÇK, tuzluluk, sertlik, nitrat, siyanür, florür, arsenik, ağır metaller, renk ve organik bileşiklerin (TOK, BOİ vb.) giderimi büyük ölçüde sağlanabilmektedir. Ayrıca NF ve TO prosesleri yüzey sularından, yeraltı sularından ve deniz sularından bakteri, virüs, bulanıklık ve toplam askıda katı gideriminde de kullanılmaktadır (Dach, 2008). Zulaikha vd. tarafından yapılan çalışmada, UF ve NF prosesleri kullanılarak restoran atıksularından BOİ₅, KOİ, bulanıklık ve iletkenlik giderim verimi araştırılmıştır. Kullanılan tüm membranlarda %97-99 ve %99 KOİ ve bulanıklık giderim verimi elde edilmiştir (Zulaikha ve diğ., 2014).

Atıksu geri dönüşümünde, MF veya UF, ikincil çıkış suyundan partikülleri ve kolloidler uzaklaştırmak için genellikle ikili membran işleminin ilk adımı olarak uygulanır. TO ve NF genellikle ikinci aşamada, endokrin bozucu bileşikler (Guo ve diğ., 2019), dezenfeksiyon yan ürünlerinin öncülleri (Ersan ve diğ., 2016), ağır metaller (Zhang ve diğ., 2016) dahil olmak üzere çok çeşitli kirleticiler için etkili bir giderim elde etmek için kullanılır. NF, TO'dan daha düşük enerji tüketimiyle çalıştırılabilir ve su arıtma için daha iyi bir tercih tekniği haline gelmektedir (Wang ve diğ., 2020). NF'nin düşük işletme basıncı, yüksek akı, çok değerlikli anyon tuzlarının yüksek tutulması ve 300'ün üzerinde organik moleküler olması, nispeten

düşük yatırım, düşük işletme ve bakım maliyetleri gibi çeşitli avantajları vardır (Hilal ve diğ., 2004). Bu avantajları nedeniyle, su ve atıksu arıtma alanlarında NF'nin dünya çapındaki uygulamaları artmıştır. Schaep vd. yaptığı bir çalışmada sertliğin giderilmesi için birkaç farklı tipte NF membranı kullanmıştır. Multivalent iyonlar için %90'dan daha yüksek retansiyonlar bulunurken, monovalent iyonlar yaklaşık %60-70 oranında tutulmuştur (Schaep ve diğ., 1998).

Basınçla çalışan tüm membran proseslerinde olduğu gibi, membran tıkanması da NF prosesinde önemli bir sorundur. Bunun nedeni tıkanma ile akının düşmesi ya da membranın ıslanmasına yol açarak kirlenme veriminin düşmesidir. Genel ifade ile tıkanma, membranın yüzeyinde ve porlarında oluşan istenmeyen maddelerin birikimidir. Tıkanma sırasında, besleme suyundaki partiküller bir araya gelerek membran yüzeyinde birikebilir. Membran tıkanmasına, çözülmüş inorganikler ($BaSO_4$, $CaCO_3$) veya organik bileşenler (hümik asitler), kolloidler (asılı partiküller), bakteriler veya askıda katı maddeler neden olur. NF membran tıkanması, daha yüksek işletme maliyetlerine daha yüksek enerji talebine, temizliğin artmasına ve membranların kullanım ömrünün kısılmasına yol açar (Hilal ve diğ., 2004). NF membran kirlenmesini önlemenin en iyi yolu besleme suyunun ön işlemden geçirilmesidir. Periyodik ters yıkama teknikleri ve kimyasal yöntemler, membran temizliğinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

1.4.4.4. Ters Osmoz (TO)

Osmoz, H_2O 'nun düşük tuz konsantrasyonundan yarı geçirgen bir membran sayesinde daha konsantre bir çözeltiliye geçmesi durumudur. Bahsedilen bu proses Ters Osmoz (TO) prosesi olarak isimlendirilmektedir (Nada, 2014). TO, inorganik tuzlar veya organik moleküller gibi düşük moleküler ağırlığa sahip çözünebilir maddelerin ayrılmasında kullanılır. TO prosesinde membran yoğunluğu ve direnci yüksektir. Yüksek membran direnci nedeniyle solventi membrandan akmaya zorlamak için yüksek basınç uygulanır. Ters osmozdaki membran, çözünen maddeyi değil çözücüye geçirir ve osmotik basıncın üstesinden gelmek için yüksek basınç uygulanır (Hajarat, 2010). TO membranları, gözenek çapı $0.001 \mu m$ 'den küçük maddeler için kullanılmaktadır. TO proseslerinde, su içerisinde bulunmakta olan bakteri ve virüsler giderildiğinden çok fazla sektörde uygulama alanı mevcuttur

(Sorbay, 2016). TO membranlarının işletme basıncı 20-100 bar arasındadır ancak son zamanlarda teknolojinin gelişmesiyle beraber daha düşük basınçlarda da giderim yapılabilmektedir (Koyuncu, 2001).

Ters osmoz membranlar ile basınçla çalışan membranlar arasında, mümkün olan en ileri ve en yüksek giderim veriminde, iyonlar ve katyonlar, tüm çözünmüş maddeler ve metal iyonları sudan uzaklaştırılabilmektedir. Ters osmoz membranın avantajları, kontaminantları, virüsleri, bakterileri ve diğer patojenleri ortadan kaldırabilmesi, küçük bir alana ihtiyaç duyması, su kaynağının yakınında bulunabilmesi ve işletme maliyetini düşürmek için otomatikleştirilebilmesidir (Hajarat, 2010). TO membranlar, uygun bir ön arıtma yapıldıktan sonra uygulandığında, oldukça etkili ve verimli bir son arıtma tekniği olarak belirlenmiştir. TO membranları, genellikle deniz suyundan içme suyu elde edilmesinde, tuz giderimi işlemlerinde ve proses sularından atık maddelerin uzaklaştırılması işlemlerinde kullanılmaktadır (Mulder, 1996). Deniz suyunu tuzdan arındırmaya ek olarak, TO teknolojisi yarı iletkenler, gıda işleme, biyoteknoloji, ilaçlar, enerji üretimi ve belediye içme suyu gibi çok çeşitli uygulamalarda suyu arıtmak için kullanılır (Nada, 2014). Ayrıca, TO membranlarının içme suyu arıtımı, atıksu arıtımı, endüstriyel su üretimi, meyve suyu konsantresi gibi uygulamaları da bulunmaktadır. Bu teknolojinin yararlı olduğu ve kimyasal, tekstil, kağıt hamuru ve kağıt, petrol ve petrokimya, gıda, tabaklama ve metal terbiye endüstrilerinden çok çeşitli atıksuların arıtılmasında yüksek giderim verimliliği sağlayabileceği kanıtlanmıştır. TO prosesi ayrıca, yüksek verimli ve seçici ayırmalarla sonuçlanan hibrit işlemler üretmek için UF, pervaporasyon, damıtma ve diğer ayırma teknikleriyle birleştirilebilir (Mai, 2013). TO membranlarının gelişimi son birkaç yılda muazzam olsa da, performansları ve maliyetleri hala mükemmel olmaktan uzaktır. Membran ömrü ve permeat akıları, öncelikle konsantrasyon polarizasyonu ve tıkanma olgusundan etkilenir.

1.4.5. Membran proseslerde işletme parametreleri

Membran parametreleri iki ana hedefe ulaşmayı amaçlamaktadır; yüksek su kalitesi ve yüksek membran akısı. Arıtılmış atıksu kalitesi ve membran akısı; membran özelliklerinden, besleme solüsyonlarının özelliklerinden ve çalışma parametrelerinden etkilenir. Bu parametreleri anlamak ve kontrol etmek, tüm

membran proses performansını artırmaya yardımcı olabilir. Parametreler bir membran tipinden diğerine değişebilir. Membran proseslerinde dikkat edilmesi gereken işletme parametreleri aşağıda verilmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016):

- Akı
- Besleme konsantrasyonu
- Basınç/ trans membran basıncı
- Sıcaklık
- pH
- Membran tabaka yoğunluğu
- Çapraz akım hızı ve türbülans
- Hava-su resirkülasyonu
- Ön arıtma

Akı, birim zamanda birim yüzeyden geçmekte olan madde miktarı olarak tanımlanmaktadır. Akı birimi, $m^3/m^2.sn$ ya da $L/m^2.sa$ olarak ifade edilmektedir. Günümüzde, membran prosesler, 5-100 $L/m^2.saat$ akı değerlerinde işletilmektedir. İstenilen akı değerinde işletmek için, Trans Membran Basıncı (TMP) ayarlamaları yapılır (Aksu, 2019).

Besleme suyu konsantrasyonu arttıkça, membranın kirlenmesi hızlanmaktadır. Bu durumda, membran işletmelerinde oldukça önemli bir parametre olan akının düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, membranın kirlenmesiyle aynı zamanda giderim veriminde de düşüş olmaktadır (Aksu, 2019).

Membran filtrasyon proseslerinde, membranın iki yüzeyinde de oluşan basınç farkı ile belirlenmiş olan membran geçiş basıncı, trans membran basıncı (TMP) olarak adlandırılmaktadır. Membran filtrasyon prosesinin işletilmesi için sabit bir TMP sağlamak oldukça önemlidir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016).

Sıcaklık, su akımını ve osmotik basıncı etkileyen önemli bir işletme parametresidir. Besleme suyu sıcaklığı ile akı orantılıdır. Yani belli aralıklarla sıcaklık artışı ile akı artışı da sağlanır. Organik membran sistemlerinde, optimum sıcaklık aralığı 20-40 °C arasındadır. Bu sıcaklık değerleri aşıldığında, membranlarda bozulmalar ve aşınmalar meydana gelir ki bu durum organik membranlar için istenmeyen bir

durumdur. İnorganik membranlarda ise, sıcaklık 300 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Sıcaklıktaki her 1 °C'lik artışta, membranın akısında %3 artma görülür (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016; Aksu, 2019).

Membran proseslerde genellikle kullanılan pH aralığı 2-8 olmakla beraber optimum pH aralığı ise 4,5-8,5'tir. pH'a, poliamid vepolisulfan malzemeler, sentetik polimer membranlardan daha dayanıklıdır. Maliyeti fazla olan seramik membranlar ise geniş bir pH aralığında çalışabilmektedirler. Bunun yanında, selüloz asetat membranları pH'a oldukça hassastırlar (Aksu, 2019).

Membran tabaka yoğunluğu parametresi, birim hacim modül içine yerleştirilen membran alanı olarak tanımlanır. Membran tabaka yoğunluğu ne kadar büyükse, prosten çıkan toplam akı da o kadar büyük olmaktadır. Tipik membran tabaka yoğunluğu 160-1640 m²/m³ 'tür (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,2016).

Çapraz akım hızı ve türbülans parametresine bakılacak olursa, yüksek çapraz akım hızında membranın yüzeyinde daha az kirletici madde birikmesiyle daha yüksek çıkış akısı imkanı sağlanmış olur. Türbülans parametresi, membran proseslerde önemli bir parametredir. Membranın yüzeyinde oluşan türbülans, konsantrasyon polarizasyonunun azalmasına ve bu şekilde de membran performansında artışa neden olur (Aksu, 2019).

1.4.6. Endüstriyel atıksuların geri kazanımında membran proseslerin kullanımı

Geleneksel biyolojik arıtma ve fizikokimyasal arıtma işlemleri genellikle endüstriyel atıksuların arıtılmasında kullanılmaktadır. Bu işlemler, azo boyalar, tuzlar, yüzey aktif maddeler, fenol, ağır metaller ve toksik bileşikler (pestisitler) gibi biyolojik olarak parçalanamayan bileşiklerin giderilmesinde genellikle yetersizdir (Cinperi ve diğ., 2019). Yüksek kaliteli arıtılmış atıksu ve üretim süreçlerinde suyun yeniden kullanılması hedefleniyorsa, ileri arıtma teknolojilerinin kullanılması gerekmektedir. Suyun yeniden kullanımına duyulan ihtiyaç son yıllarda oldukça artmıştır.

Genellikle MF veya UF, atıksudan partikülleri ve kolloidal maddeleri sudan uzaklaştırmak için ilk adım olarak kullanır. TO veya NF, endokrin bozucu bileşikler, dezenfeksiyon yan ürünleri öncüleri ve ağır metaller dahil çok çeşitli kirletici

maddeler için etkili bir uzaklaştırma elde etmek için genellikle ikinci aşamada kullanılmaktadır (Wang ve diğ., 2020). Marcucci ve diğ., tarafından 2001 yılında yapılan çalışmada, tekstil atıksularının yeniden kullanımını araştırmak için pilot ölçekte farklı membran işlemleri denenmiştir. Çalışmada, pilot tesis için NF (9 bar) ve TO (13 bar) membran işlemlerinden önce, ön işlemler olarak kum filtrasyonu ve UF (0,4 bar) kullanılmıştır. Çalışmada, yeniden kullanım için NF membran ile arıtılmış suyun analizleri yapılmıştır, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) değeri 10 mg/l altında, toplam askıda katı madde (AKM) 5 mg/l altında çıkmıştır. Toplam sertlik 3,5 °F, Ca⁺² 16 mg/l ve Mg⁺² 1 mg/l, sırasıyla, elde etmiştir. TO'dan arıtılmış atıksu NF'ye kıyasla daha iyi bir kalite sunmuştur. Çalışma sonucunda, başarılı bir şekilde test edilen TO membranının düşük enerji gerektirdiği ve bu nedenle de diğer membranlara kıyasla daha az işletme maliyetine sahip olduğu belirtilmiştir. Fakat TO'nun kullanımının iyi kalitede permeata sahip UF ile mümkün olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, NF'nin, TO'nun tutma verimine ulaşamayacağı, ancak daha az zorlu koşullarda çalıştığından maliyetlerin daha da az olmasına sebep olacağı belirtilmiştir.

Membran prosesleri ile atıksu arıtımında dikkate alınması gereken önemli bir parametre membran kirlenmesidir. Atıksudaki organik maddeler ve inorganik partiküller membran yüzeyinde birikerek membran tıkanmasına neden olabilir. Membran tıkanması membran akışını azaltacak ve aynı zamanda arıtılmış su kalitesini düşürecektir. Aynı akıyı korumak için, membran basıncının artırılması gerekir ve bu, daha fazla enerji ve daha fazla işletme maliyeti ile sonuçlanacaktır. Uzun süreli kirlenme de membran ömrünün kısalmasına neden olur. Juang ve diğ. 2007 tarafından yılında yapılan çalışmada, hem akı ve UF membranının kirlenme mekanizması arasındaki ilişki hem de TO işleminden önce ön arıtmanın, endüstriyel atıksu arıtma tesisinin atıksularının arıtımı ve membran proseslerinin suyun yeniden kullanımını üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bulanıklık, TOK, iletkenlik, parçacık boyutu dağılımı ve organik çözünen moleküler ağırlık gibi kirleticiler etkin bir şekilde ortadan kaldırılabilmiştir. Ancak, membran kirlenmesi olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmada, UF membran işleminin başlangıç ve son aşamadaki ana engelleme mekanizmalarının sırasıyla gözeneklerin standart olarak bloke edilmesi (kolloid malzemelerden kaynaklanan) ve gözenegin kek bloke edilmesi (asılı

parçacıklardan kaynaklanan) olduğu bulunmuştur. Öte yandan, UF ve TO prosesinden geçirilen permeatın, soğutma suyunun ve düşük basınçlı kazan suyunun yeniden kullanımı için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Kok fabrikası atıksuyunun anaerobik-anoksik-oksik membran biyoreaktör sistemi ile geliştirilmiş arıtımı: ayırma ve arıtma teknolojisi çalışmasında atıksuyun toplandığı havuzdan anoksik ve ön havalandırma işlemlerinden sonra MBR geçmesi sonucu (A1-A2-O-MBR) %71-99 oranında KOİ, fenol, amonyak ve toplam azot giderimi gerçekleşmiştir (Zhao ve ark., 2009).

Dilaver, 2018 yılında yapılan çalışmada, tekstil endüstrisi proseslerinde oluşmakta olan atıksuların geri kazanım için uygun olan noktalardan alınan atıksular ile tubular ve disk tipinde seramik membranlar kullanılarak laboratuvar ölçeğinde çapraz akış membran filtrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Arıtılan atıksuyu geri kullanım seviyesine getirerek hedefe ulaşmayı başardılar. Ek olarak, yazarlar, çalışmada kostik geri kazanımı işlemi için Viskon Kasar prosesinin ana banyosunu uygun bulmuşlardır.

Çoğu atıksu arıtmada, geri kullanım hedefine ulaşmak için basit bir süreç yeterli değildir. Ön işlem süreçleri gereklidir veya birden çok ayırma prosesleri kullanılmaktadır. MF ve UF bazen NF veya TO sistemlerini uygulamadan önce ön arıtma teknikleri olarak kullanılır. Bu, membran kirlenmesini azaltır ve arıtılmış atıksu kalitesini artırır. Balcı, 2016 yılında yapılan çalışmada, farklı iki membran prosesinde, tekstil yıkama sularını arıtma ve proses suyu olarak geri kullanma işlemlerinin değerlendirilmeleri yapılmıştır. İlk sistemde; UF, NF ve TO prosesleri için en iyi performansı sağlayan membranlar belirlenmiş, UF/NF/TO bütünleşik membran sistemlerinin işletimi yapılarak endüstriyel proses suyu üretimi araştırılmıştır. Ayrıca, konsantr minimizasyonunu değerlendirmek için oluşan membran konsantrlerinin, Fenton ve foto-Fenton ileri oksidasyon prosesi (İOP)/batık UF hibrit proseslerinde arıtmaları incelenmiştir. İkinci sistemde de optimum işletme şartları bilinen İOP/batık UF hibrit prosesleriyle arıtılmış olan sulardan NF ve TO proseslerinde su kazanımını sağlamak amacıyla optimum işletme şartları belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarında, endüstriyel su kazanımının başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği belirtilmiştir. İlk sistemde, UF, NF ve TO proseslerinin konsantrleri kesikli İOP/ UF hibrit reaktörde arıtılmış ve konsantr atık

minimizasyon işlemi sağlanmıştır. İOP/UF reaktöründe kalmış olan nihai konsantrinin ise, suyu alındıktan sonra düzenli depolama, yakma ya da atıksu arıtma tesisinde nihai bertarafının sağlanabileceği belirtilmiştir. İkinci sistemde, ilk sisteme kıyasla daha iyi kalitede geri kazanım suyu elde edilmiştir. Çalışmada, İOP/UF çıkışında düşük KOİ ve TOK değerleri elde edilse de, membran prosesleri ile %80 su geri kazanımı değerlerinde yüksek çıkış KOİ ve TOK değeri görülmüştür.

Membran biyoreaktör (MBR) prosesi, atıksu arıtımında kullanılan iyi bilinen bir membran prosesidir. Biyolojik süreci membran prosesiyle birleştirebilme avantajına sahiptir. Cinperi ve ark. yünlü tekstil atıksularının MBR prosesi ile arıtılması, yeniden kullanılması ve bu proseslerin NF ve TO prosesleri ile birleştirilmesini araştırmıştır. Ortalama kimyasal oksijen ihtiyacının (KOİ), biyokimyasal oksijen ihtiyacının (BOİ₅), toplam askıda katıların, toplam azot, toplam fosfor ve renk giderimleri sırasıyla %70, 74, 86, 28, 43 ve 62'sini MBR işlemi ile elde ettiler. MBR + NF ve MBR + TO testlerinde, analiz edilen tüm parametrelerin %40-99 ve %52-99, sırasıyla giderimi sağlanmıştır (Cinperi ve diğ., 2019).

1.4.7. Kömür endüstrisi atıksularının membran prosesler ile geri kazanımı

NF ve TO gibi membran prosesleri, yüksek performansları ve yüksek arıtılmış atıksu kalitesi nedeniyle suyun geri kazanımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Madencilik endüstrilerinde suyun geri kazanımında genellikle NF, TO veya membran distilasyon işlemleri kullanılır. MF ve UF çoğunlukla ön işleme prosesleri olarak kullanılır. Daha iyi bir verimlilik elde etmek için 2 veya daha fazla işlem birleştirilebilir. Membranlar ile atıksuda bulunan yüksek organik ve inorganik birleşikler giderilebilir. KOİ, TÇK ve iyoların %99 üzerinde arıtma verimi sağlanabilir.

Bu konuda yapılan çalışmalar; Lee ve diğ., Kore'de bulunan ve kömürle çalışan bir elektrik santralinden elde edilen atıksuyun ileri osmoz ve membran distilasyon sistemleri ile arıtılması üzerine çalışmışlardır (Lee ve diğ., 2018). Wadekar ve ark. (Wadekar ve diğ., 2018) ve Kiswanto ve ark. (Kiswanto ve ark., 2020), ayrı ayrı çalışmalarda, kömür madeninden kaynaklanan atıksuyun arıtımı için NF membran kullanmışlar ve atıksuyun NF ile içme suyu standartlarına ulaşabilmesini sağlamışlardır. Jia ve diğ. kömür gazlaştırma atıksuyunun arıtılması için membran

biyoreaktör ile laboratuvar ölçekli çalışmalar yapmışlardır. %80 KOİ giderimi ve % 75 TOK giderme verimliliği elde etmişlerdir (Jia ve diğ, 2015).

Madencilik endüstrisi atıksuyu arıtımında kullanılan membran proseslerinin önemli bir problemi membranın tıkanmasıdır. Membran tıkanması, arıtılmış su kalitesini düşürme ve membran akışını azaltma eğilimindedir. Ön arıtma işlemleri, kirlenmeyi önlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kimyasal arıtma ve ters yıkama, kirlenme meydana geldiğinde membranları temizlemek için kullanılan tekniklerden bazılarıdır. Li ve ark. kömür atıksularının arıtılması sırasında TO prosesinde hem organik hem de inorganik tıkanmanın önemine işaret etmektedir. Ancak burada organik tıkanmanın daha baskın olduğunu iddia etmektedirler (Li ve diğ, 2020). Wang vd. yaptıkları çalışmanın neticesinde %98'lik bir TOK giderim verimi elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmadan elde edilen bulgular ışığında membran kirlenmesinde organik ve inorganik bileşiklerin önemine dikkat çekmişlerdir (Wang ve diğ., 2018). Mutlu vd., MF, NF prosesinden önce ön arıtım olarak kullanıldığında, membran kirlenmesinin önlendiğini ve membran performansının arttığını söylemektedir (Mutlu ve diğ., 2018). Wang ve diğ. membran distilasyon prosesi ile kömür atıksu arıtımını araştırmıştır ve kirlenme tabakasının akı azalmasına neden olduğunu, ancak membran ıslanmasına neden olarak bunun sonunda büyük oranda akı düşüşünün gerçekleştiğini bildirmiştir (Wang ve diğ., 2020).

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

2.1.1. Membranlar

Bu çalışmada kömür endüstrisi atıksularının arıtımında literatürden etkinlikleri bilinen 3 farklı (NP030, ESNA-1-LF, DESAL-5-DK) membran kullanılmıştır. NP030, DESAL-5DK ve ESNA1-LF membranları sırasıyla Microdyn-Nadir, GE-Osmonics ve Hydranautics firmalarından elde edilmiş olup, özellikleri Tablo 2.1'de gösterilmektedir.

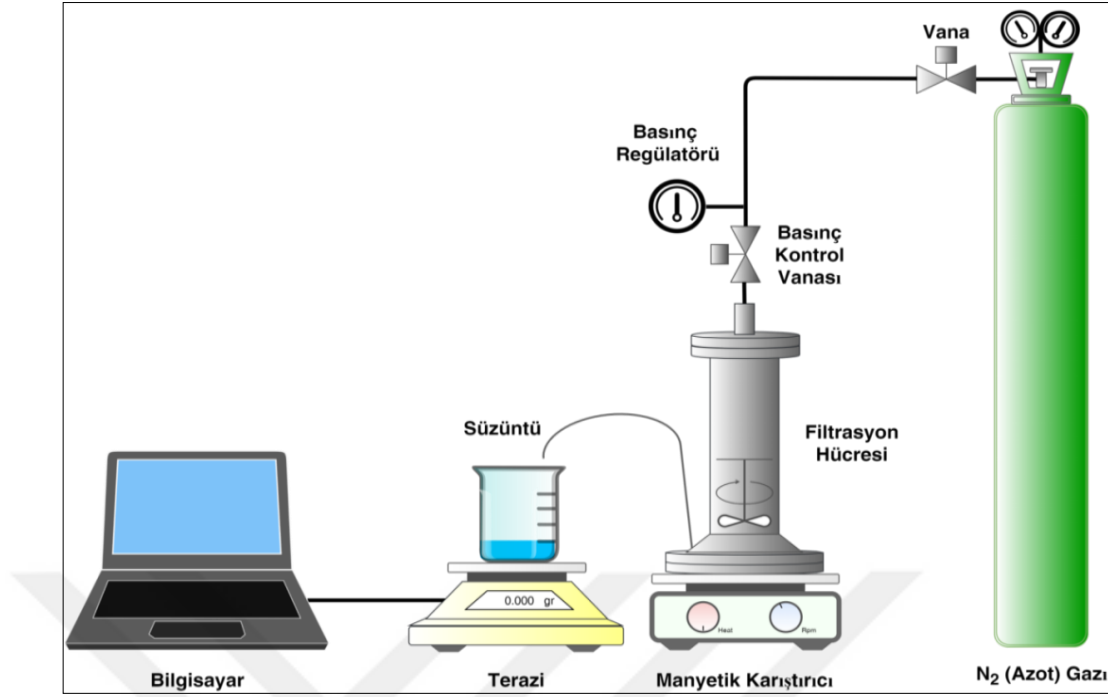
Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan membranların özellikleri

Membran Türü	Üretici Firma	Materyal	MWCO (Da)	pH	Temiz Su Akısı (L/m ² sa bar) (25 C ⁰)	Maksimum Basınç (bar)	Maksimum Sıcaklık (°C)
NP030	Microdyn ®Nadir	PES	400	0-14	>40	40	95
DESAL-5 DK	GE-Osmonics	TFC	150-300	2-11	6,1	41	50
ESNA-1-LF	Hydranautics (Nitto Denko)	PA _{MPD} TFC	250	3-10	4,38	41,6	45

PES: Polietersülfon; TFC: İnce film kompozit; PAMPD: meta-fenilen daimin (MPD)-bazlı poliamid

2.1.2. Çapraz akış membran ünitesi

Çalışmada kullanılan tezgahüstü “Sterlitech HP4750” membran filtrasyon sistemi Şekil 2.1’de verilmiştir. Paslanmaz çelikten imal edilmiş karıştırma hücreli sistem 19,6 cm² etkili membran alanına ve 300 ml’lik besleme hacmine sahiptir. Membran geçiş basıncı modüle doğrudan bağlı azot gazı ile temin edilmiştir. Elde edilen süzüntü hassas terazi üzerinde toplanarak, ağırlık verileri RsKey Ver.1.34 (A&D Comp.Ltd., Japan) programı aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve akı hesabı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.1. Nanofiltrasyon deney düzeneği

2.1.3. İthal kömür yıkama atıksuyu karakretizasyonu

İthal kömür limanlardan tesislere kamyonlarla getirilmektedir. Tesis girişinde araçlar kantarda tartılarak tesise alınmaktadır. Gemiler ve kamyonlarla taşıma esnasındaki sürtünmelerden dolayı kömür yüzeyinde aşınma meydana gelmektedir. Aşınmadan kaynaklı kömür yüzeylerinde kömür tozu oluşmaktadır. Kömür depolama alanlarında, kamyonlardan kömür boşaltılması, kepçelerle kömür taşınması, kömür yığını oluşturulması ve bunkerlere kömür yüklenmesi esnasında toz oluşumunu minimize etmek için şebekeden temin edilen 1320 m³/gün su yağmurlama sistemi ile yığın üzerine verilmektedir.

Ayrıca, kömür stok alanları açıkta olup, yağmur yağdığı zamanlarda da yağmur suları direkt kömürle temas etmektedir. Kömürle temas eden yağmur suyu kömürü yıkayacağı için bir nevi spreyleme işlemi yapmış olacaktır. Bu durumda yağmur suyu kirlenmektedir. Kömür depo alanlarında oluşan atıksuyun tamamına yakını (yağışlı günlerde, 7596 m³/gün) yağmur yağması sonucu, yağmur suyunun kömür ile temas ederek kirlenmesiyle oluşmaktadır.

Çalışmada kullanılan atıksu; ithal kömür depolama alanlarında, kömürün boşaltılması, taşınması ve yüklenmesi esnasında toz oluşumunu minimize etmek için

şebekeden temin edilen yaklaşık 1300-1400 m³/gün suyun, yağmurlama sistemi ile yığın üzerine verilmesi neticesinde oluşmaktadır. Depolama alanları açık olduğundan tesiste yağmur yağdığı zamanlarda da şebeke suyu kullanılmayıp doğal spreyleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu durumda özellikle kış aylarında kömürle temas etmiş yağmur suyu ham atıksuyu oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan atıksu karakterizasyonu Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kömür yıkama atıksuyunun karakterizasyonu

Parametre	Birim	Ham su
pH	-	7,6-7,7
Sıcaklık	°C	22
İletkenlik	µS/cm	712
TÇK	mg/L	333
KOİ	mg/L	529
Renk	Pt/Co	133
Bulanıklık	NTU	10,2
Sülfür	mg/L	0,2

2.2. Yöntem

2.2.1. Analitik yöntemler

Atıksu karakterizasyonu ve nanofiltrasyon prosesi performansı aynı parametreler üzerinden değerlendirilmiş ve analizler Standart Metodlar (APHA 2005)’a uygun olarak gerçekleştirilmiştir. pH, sıcaklık, iletkenlik ve TÇK parametreleri Multiparametre ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. KOİ parametresi 5220 D: Kapalı Refluks Kolorimetrik Yöntem ile ölçülmüştür. Renk ve bulanıklık parametreleri sırasıyla 2120C-Spektrofotometrik Yöntem ve 2130B-Nefelometri Yöntem ile ölçülmüştür. Sülfür parametresi Spektrofotometrik Yöntem ile ölçülmüştür.

2.2.2. Proses değişken ve performans parametreleri

Çalışmada NF deneyleri için esas alınan proses performans parametreleri; “süzüntü akıları” ile sulama sularında izlenmesi gereken iletkenlik, bulanıklık, TÇK, KOİ, renk parametrelerine ait süzüntüdeki “kirletici madde konsantrasyonu / kirletici madde giderim verimleri” dir. Süzüntü akısının belirlenmesi için bilgisayara bağlı hassas terazi ile süzüntü miktarı birer dakika aralıkla ağırlık cinsinden ölçülmüştür. Dakikada bir alınan tartım sonucu bilgisayarda RsKey Ver.1.34 (A&D Comp.Ltd., Japan) programı ile kaydedilmiş, daha sonra Excel programı ile “süzüntü akıları” Eşitlik (2.1)’ ye göre hesaplanmıştır;

$$J = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)’e göre; J=süzüntü akısı (L/m².sa), A=etkili membran alanı (m²), V=toplam süzüntü hacmi (m³), t=filtrasyon süresi’dir.

Besleme akımını konsantre etme şartlarında gerçekteştirilen tüm deneysel çalışmalarda kullanılan hacim azalma faktörü (VRF) Eşitlik (2.2)’ e göre hesaplanmıştır.

$$VRF = \frac{V_f}{V_r} \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)’ye göre; VRF= hacim azalma faktörünü, V_f = Başlangıçtaki besleme hacmini (L) ve V_r: Filtrasyon sırasındaki konsantre hacmi (L)’ ni ifade etmektedir. Çapraz akışlı membran sistemleri deneylerinde deney başında, membran kararlı hal aldıktan sonra deney sonunda süzüntü ve konsantre örnekleri alınarak analiz edilmiştir.

Tüm deneylerde süzüntüdeki kirletici madde konsantrasyonu (C_s) ve besleme çözeltilisindeki kirletici madde konsantrasyonu (C_b) esas alınarak Eşitlik (2.3)’ e göre de “kirletici madde giderim verimleri-R (%)”, hesaplanmıştır;

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_s}{C_b}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

2.2.3. Deneysel tasarım yöntemi

Deneilerin planlamasında “Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi” uygulanmış; deneysel sonuçların analizi, cevap yüzeyi yöntemi (response surface methodology) üzerinden “Design Expert 10.0.4” yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Proses performans değerlendirmeleri KOİ, toplam çözünmüş katı (TÇK), elektriksel iletkenlik, renk, bulanıklık, sülfür ve akı parametreleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. NF prosesinin deneysel tasarımında dikkate alınmış giriş değişkenleri ve seviyelerine ilişkin bilgiler Tablo 2.3’te belirtilmiştir.

Seçilmiş 4 farklı değişken (membran türü, TMP, VRF ve pH) ve her değişken için çalışma aralıkları olan 3 seviye seçilmiştir. 3’er seviyeye ilişkin deneysel tasarımda Taguchi L9 ortogonal dizayn tablosu ise Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.3. Taguchi deney tasarımı değişkenler ve seviyeleri

Değişkenler (Faktörler)	Sembol	Seviye		
		1	2	3
Membran türü	A	NP030	ESNA-1-LF	DESAL-5-DK
Trans membran basıncı TMP (bar)	B	10	12,5	15
VRF	C	4	2	3
pH	D	5	Orjinal pH	10

Tablo 2.4. Taguchi deney tasarımı çalışma koşulları

No	A: Membran Türü	B: Basınç (bar)	C: VRF	D: pH
1	ESNA-1-LF	10	3	10
2	NP030	15	4	10
3	DESAL-5-DK	12,5	2	10
4	NP030	12,5	3	Orjinal pH
5	ESNA-1-LF	15	2	Orjinal pH
6	ESNA-1-LF	12,5	4	5
7	DESAL-5-DK	15	3	5
8	DESAL-5-DK	10	4	Orjinal pH
9	NP030	10	2	5

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1. Kömür Atıksuyundan Kirletici Uzaklaştırma Verimliliği

Seçilmiş 4 farklı değişken ve 3 farklı seviyeye ilişkin deneysel tasarımda Taguchi L9 (3^4) ortogonal dizilim kullanılmış ve Tablo 3.1’de verilen 9 farklı deney setine ait cevap değişkenleri (çıkış ve performans parametreleri) Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Tüm deney setlerinde KOİ giderim verimleri çok yüksek olduğu için modelleme çalışmalarında çıkış KOİ konsantrasyon değerleri kullanılmıştır.

Tablo 3.1. L9 (3^4) Orthogonal dizin tasarımına karşılık gelen proses değişkenleri ve seviyeleri

No	KOİ Giderimi (%)	TÇK Giderimi (%)	İletkenlik Giderimi (%)	Renk Giderimi (%)	Bulanıklık Giderimi (%)
1	88,4	88,9	48,6	69,1	99,5
2	91,6	55,9	53,2	99,5	99,8
3	94,8	87,9	87,4	100,0	99,9
4	97,1	37,2	34,9	99,8	99,9
5	97,4	95,1	94,9	99,7	99,8
6	96,9	88,3	87,9	99,9	99,9
7	96,9	86,5	85,9	100,0	99,9
8	97,2	78,3	77,5	99,9	99,9
9	92,5	48,6	47,7	100,0	99,9

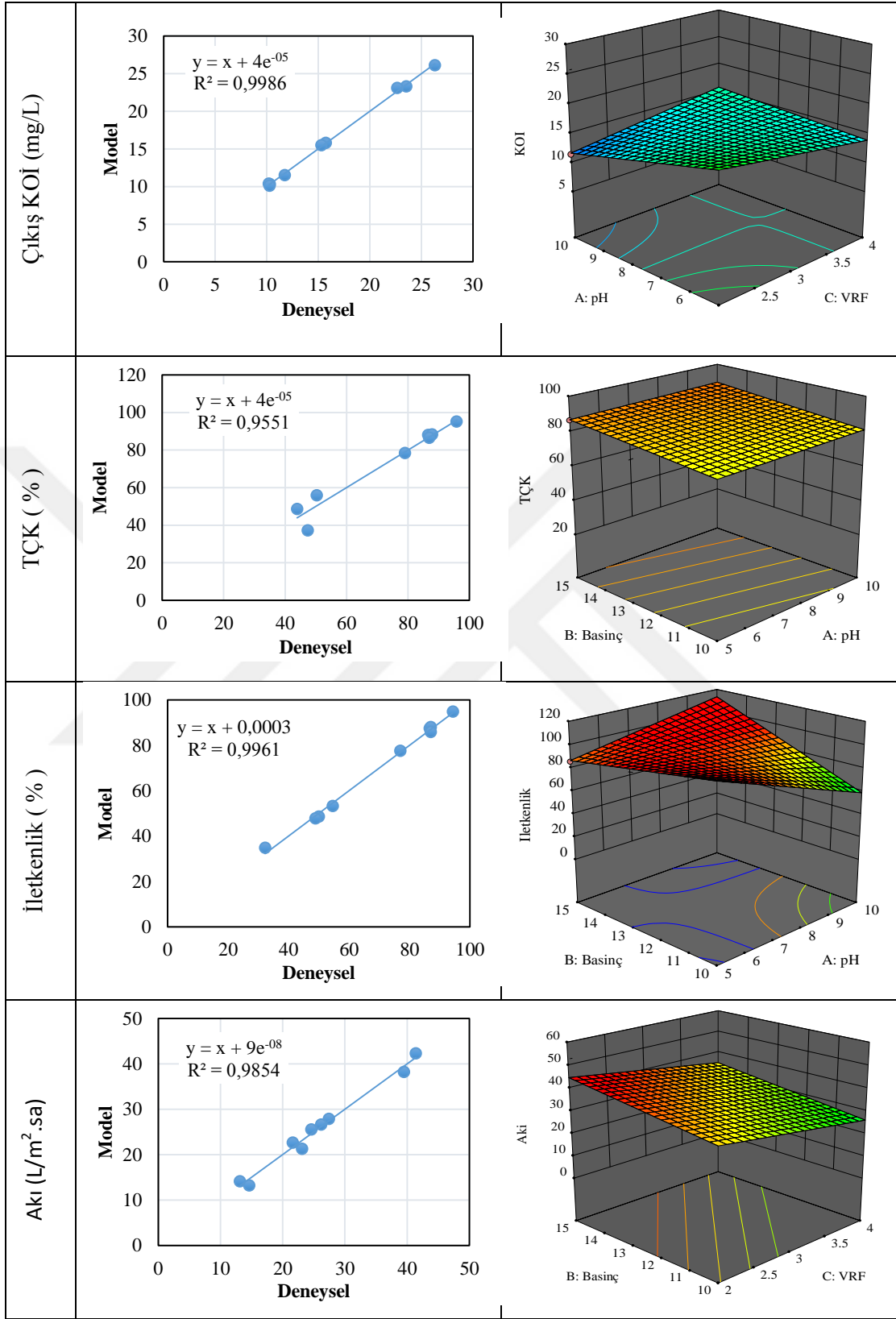
Tablo 3.1 değerlendirildiğinde, NF prosesi ile yüksek organik (KOİ) ve inorganik (TÇK) madde giderimleri sağlandığı ve ayrıca renk ve bulanıklık için %100’e varan giderim performansları elde edildiği görülmüştür. Renk ve bulanıklık performansındaki yüksek giderim verimlerinden dolayı, bu üç parametre optimizasyon sürecinde hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Membran prosesleri arasında NF membranların, atıksuda bulunan askıda katı maddelerin, bulanıklığın ve koliform bakterilerin gideriminde etkili ve güvenilir

membranlar olduğu literürden bilinmektedir (Akdağlı ve Arslan, 2008; Jin ve diğ., 2013; Demir ve diğ., 2017). NF membranlar ile yürütölen deneylerin tamamında iletkenlik gideriminde salınımlar görölmekte olup iletkenlik gideriminin diğer performans parametrelerine göre düşük değerlerde olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca literatürden, NF membranların çok değerlikli iyonların gideriminde oldukça etkili olduğu, buna karşın Na^+ ve Cl^- gibi tek değerliğe sahip iyonları tutamadığı bilinmektedir. Sonuç olarak, mevcut atıksudaki iletkenliğin çoğu tuzun varlığından kaynaklandığı için deneysel çalışmalarda iletkenlik giderimleri düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca iletkenlik giderimindeki salınımdan dolayı da değerşkenlerin ve seviyelerdeki farklılıkların iletkenlik giderim veriminde etkili olduğu da söylenebilir.

Bu verilerden hareketle, en uygun işletme şartlarının belirlenmesi için organik ve inorganik madde gideriminde süzöntü KOİ konsantrasyonu, TÇK ve iletkenlik için ise giderim verimleri değerlendirilerek çalışmalara devam edilmiştir. KOİ parametresinin cevap yüzeyi yöntemiyle değerlendirilmesinde, giderim performansındaki yüksek değerlerden dolayı model ile uyumlu sonuçlar çıkış suyu (süzöntü) KOİ değerleri kullanılarak sağlanmıştır. Ayrıca membran proses verimliliği ve işletme parametrelerinin optimizasyonu ile ilgili literatürde bulunan çalışmalarda kullanılan süzöntü akı değerleri de proses performansı olarak kabul edilmiştir. Membran proseslerin uygulamasında temel kriterlerin başında akı azalması gelmekte, buna sebep olan faktörler belirlenerek prosesin daha yüksek akı değerlerinde işletilebilmesi amaçlanmaktadır. Yüksek süzöntü akısı membran proseslerde arzulanan bir durum olmakla birlikte; akı azalması olayı, özellikle çapraz akış hızı, membran geçiş basıncı, membran türü (gözenek boyutu, kimyasal kompozisyonu, vb.) ve besleme çözeltilisinin fizikokimyasal özelliklerinden etkilenmektedir (Aydıner ve İnce, 2010).

NF prosesinde giriş değerşkenlerinin (pH, basınç, VRF ve membran türü) proses performans parametreleri (çıkış suyu KOİ, TÇK giderim verimi, iletkenlik giderim verimi ve süzöntü akı değerleri) üzerindeki etkileşimleri ve ANOVA analizi sonucunda elde edilen model verileri ile deneysel verilerin uyumunu gösteren korelasyon eğrileri her bir performans parametresi için şekil 3.1'deki gibidir. Etkileşim grafiklerinin X1 ve X2 eksenleri, ilgili sonuç parametresi üzerinden, ANOVA analizi sonucunda anlamlı etkisi olan giriş değerşkenlerini göstermektedir.



Şekil 3.1. Kömür yıkama atıksularının NF prosesi ile geri kazanımında sonuç parametrelerinin giriş değişkenlerine bağlı olarak değişimleri.

Tüm performans parametrelerinin ($R^2 > \%95$) model değerleri ile yüksek korelasyon sağladığı belirlenmiş olup KOİ gideriminde pH ve VRF; TÇK ve iletkenlik giderimlerinde basınç ile pH ve akı için basınç ve VRF parametrelerinin önemli proses değişkenleri olduğu söylenebilir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi değişkenlerin performans parametreleri üzerindeki etkileri de farklılıklar göstermektedir. Basınç, pH ve VRF değişkenlerinin çıkış performans değerlerine olan etkileri birbirlerinden çok farklıdır. pH ve VRF değişkenleri arttıkça azda olsa çıkış KOİ değerlerinde düşüş görülmektedir. Basınç ve pH’ daki artış TÇK giderim verimini etkilememekte fakat iletkenlik giderimi az da olsa düşmektedir. Basınç artışı akıyı arttırırken VRF’deki artış akıyı düşürmektedir.

Organik madde giderim performansı için KOİ parametresi değerlendirildiğinde basınç, VRF ve membran türü etkileri altında yaklaşık %88-97 arasında değişen yüksek giderim performansı elde edilmiştir. İnorganik giderim performans değerlendirilmesi için TÇK ve İletkenlik performans parametreleri değerlendirildiğinde basınç, pH ve membran türü giriş değişkenleri etkisi altında sırasıyla %37,2-95,1 ve %34,9-94,9 arasında değişen giderim performansları elde edilmiştir. Membran proseslerin işletilmesinde önemli performans parametrelerinden biri olan akı parametresi için basınç, VRF ve membran türü etkileri altında 13,7-42,3 L/m².sa değerleri arasında değişen akı değerleri elde edilmiştir. NF prosesi genel olarak membran akısı yüksek bir prostedir. Halakarni ve diğ. NF prosesi ile yaptıkları atık su arıtımı çalışmasında 40 ila 60 L/m².sa arasında bir membran akısı elde etmişlerdir (Halakarni ve diğ., 2020). Başka bir çalışmada neticesinde ise 33 L/m².sa lik bir akı belirlenmiştir (Esteves ve diğ., 2020).

3.2. Anova Analizi

Uygun bir matematiksel model seçildikten sonra, tahmin için kullanılmadan önce modelin öngörü kabiliyeti doğrulanmalıdır. Kömür yıkama atıksularının NF prosesi ile geri kazanımında yürütülen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen verilerin ANOVA analizi ile 4 performans kriterini etkileyen 4 farklı değişkenin ayrı ayrı katkı payları belirlenmiştir. Buna göre giriş değişkenlerinin KOİ, TÇK, İletkenlik ve Akı parametreleri üzerine etkileri sırasıyla Tablo 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5’te verilmiştir. ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin

anlamlılık değerleri belirlenebilir. F istatistik ve p olasılık değerleri model ve değişkenlerin önem seviyesini belirtmekte; $p > F$ değeri için 0.05'ten küçük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri "Önemli", 0.1'den büyük olan model ve terimlerinin sonuç değişkeni üzerine etkileri ise "Önemsiz" olarak değerlendirilmektedir.

Tablo 3.2. KOİ parametresi için ANOVA analizi

KOİ	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P-Değeri Prob>F	Etki
Model	324,36	6	54,06	239,44	0,0042	Önemli
A-pH	7,69	1	7,69	34,08	0,0281	Önemli
B-Basınç	0,37	1	0,37	1,65	0,3280	-
C-VRF	0,13	1	0,13	0,57	0,5285	-
D-Membran Türü	110,95	2	55,48	245,71	0,0041	Önemli
AD	8,03	1	8,03	35,55	0,0270	Önemli
Artık	0,45	2	0,23			-
Toplam	324,82	8				-

Tablo 3.3. TÇK parametresi için ANOVA analizi

TÇK	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P-Değeri Prob>F	Etki
Model	3383,83	5	676,77	12,76	0,0310	Önemli
A-pH	5,71	1	5,71	0,11	0,7644	-
B-Basınç	84,71	1	84,71	1,60	0,2956	-
C-VRF	13,98	1	13,98	0,26	0,6431	-
D-Membran Türü	3279,43	2	1639,72	30,91	0,0100	Önemli
Artık	159,16	3	53,05			-
Toplam	3542,99	8				-

Tablo 3.2'de görüldüğü gibi, KOİ parametresi için verilen ANOVA analiz sonuçlarına göre 0,05' den küçük p değerine sahip olan pH ve membran türü ayrı ayrı, pH ve VRF değişkenlerinin birlikte olmak üzere KOİ giderim performansı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip oldukları belirlenmiştir. Tablo 3.3' de gösterdiği gibi, TÇK gideriminde yalnız membran türünün anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.4. İletkenlik parametresi için Anova analizi

İletkenlik	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P-Değeri Prob>F	Etki
Model	3990,49	6	665,08	85,64	0,0116	Önemli
A-pH	168,47	1	168,47	21,69	0,0431	Önemli
B-Basınç	602,30	1	602,30	77,56	0,0126	Önemli
C-VRF	1,35	1	1,35	0,17	0,7171	-
D-Membran Türü	2894,79	2	1447,40	186,38	0,0053	Önemli
AB	671,93	1	671,93	86,53	0,0114	Önemli
Artık	15,53	2	7,77			-
Toplam	4006,02	8				-

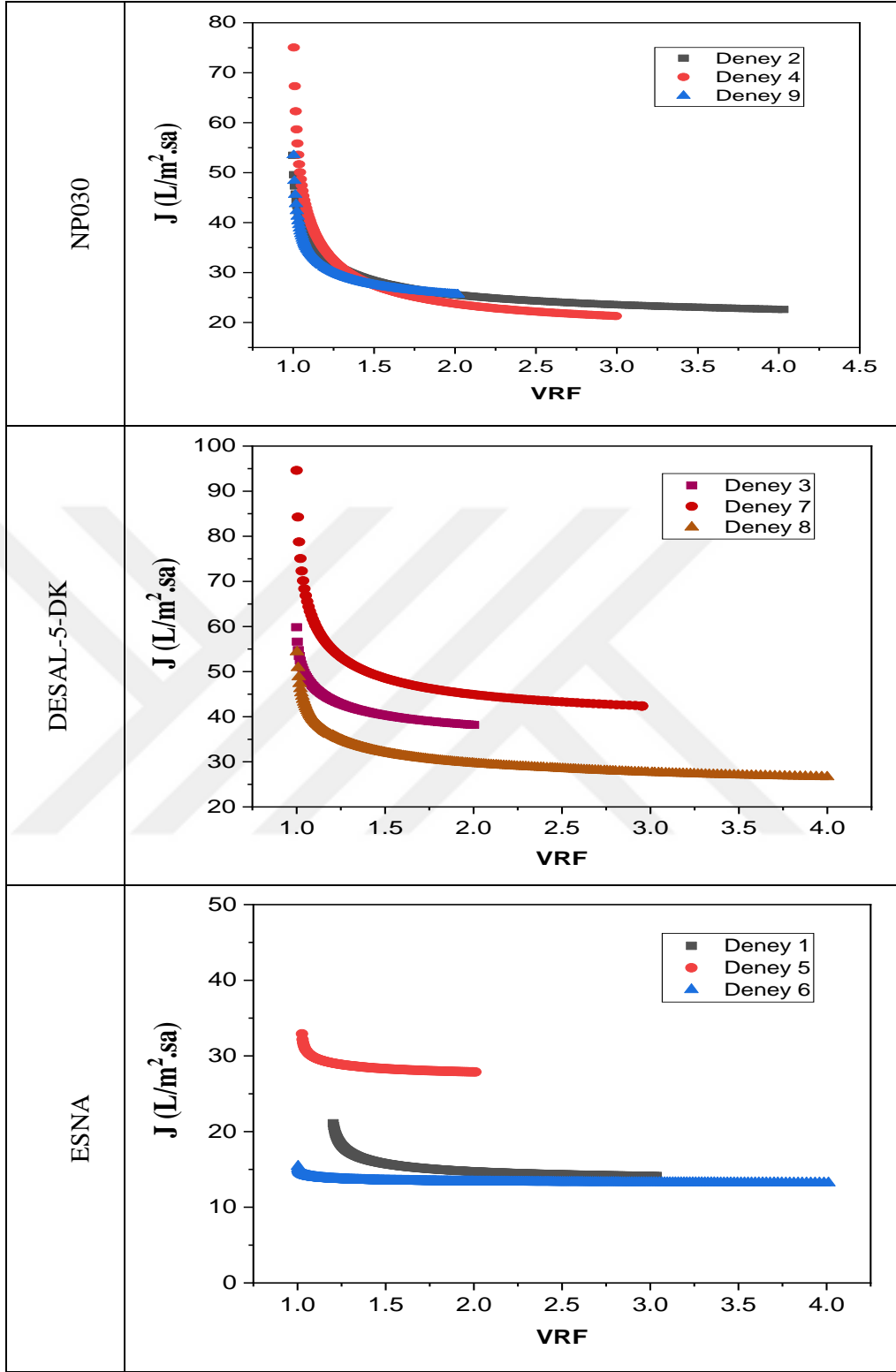
Tablo 3.5 Akı parametresi için Anova analizi

Akı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F Değeri	P-Değeri Prob>F	Etki
Model	745,54	6	124,26	22,54	0,0431	Önemli
A-pH	6,81	1	6,81	1,23	0,3822	-
B-Basınç	117,33	1	117,33	21,28	0,0439	Önemli
C-VRF	139,94	1	139,94	25,39	0,0372	Önemli
D-Membran Türü	442,93	2	221,46	40,18	0,0243	Önemli
AB	0,091	1	0,091	0,016	0,9098	-
Artık	11,02	2	5,51			-
Toplam	756,57	8				-

İletkenlik parametresi için ise pH, basınç ve membran türü için ayrı ayrı, pH ve basınç değişkenlerinin ise birlikte olmak üzere iletkenlik giderim performansı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip oldukları belirlenmiştir (Tablo 3.4). Tablo 3.5'te verilen akı parametresi ANOVA analizi sonuçları incelendiğinde basınç, VRF ve membran türü proses değişkenlerinin akı performansı üzerinde anlamlı bir etkiye sahip oldukları görülmektedir.

3.3. Süzüntü akı grafikleri

Seçilen membran türlerinde 9'lu deney setine ait süzüntü akı grafikleri Şekil 3.2'de verilmiştir. NP030 membranına kıyasla daha düşük moleküler ağırlık kesme sınır değerine (150-300 Dalton) sahip olmasına rağmen DESAL-5-DK membranı ile 26,6-42,7 L/m².sa arasında değişen yüksek akı performansları elde edilmiştir.



Şekil 3.2. 9'lu deney setinde kullanılan Nanofiltrasyon membranlara ait akı . grafikleri a) NP030 b) DESAL-5-DK c) ESNA

Literatürde yapılan bir çalışmada 16,2 ile 26,8 L/m².sa arasında kullanılan membran akısı ile elde edilen giderim verimleri yaklaşık olarak %98 Fe, %41 Si ve %50 Al dır (Mutlu ve diğ., 2018). Yapılan diğer çalışmada, bir ön arıtma uygulandıktan sonra membran distilasyon ile membran kirlenmesi ve ıslanma etkili bir şekilde hafifletilmiştir, membran akısı yaklaşık 17,9 kg/m².sa civarında çıkmıştır ve membran distilasyonunun süzütüsü yüksek kalitede kalmıştır (Wang ve diğ., 2020).

Membran akışı, membran işleminin uygulanabilirliğini kontrol eden önemli bir faktördür. Bu çalışmada elde edilen akı değerleri, literatür ile karşılaştırıldığında yüksek akı elde edilmiştir. Akı zamanla ve membran kirlenmesiyle azalmıştır ancak, genel olarak azalma eğilimi stabildir. Bu, arıtma işlemi sırasında membran kirlenmesinin en aza indirildiğini göstermektedir (Wang ve diğ.,2020).

3.4. Doğrulama deneyi ve elde edilen çıkış suyu kalitesi

Deneysel sonuçların cevap yüzeyi yöntemi ile analizi sonucu belirlenen optimum proses işletme şartları NF membran türü; DESAL-5-DK, Basınç; 15, pH; 10 VRF; 2 olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyi sonuçları Tablo 3.6'da gösterilmiştir. Bu şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyinde modelin tahmin değerleri ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kömür endüstrisi atıksularına direkt NF membran uygulanmasının organik ve inorganik madde giderimi yönünden etkili olduğu fakat süzütü suyu miktarının özellikle inorganik madde içeriğinin yüksek olmasından dolayı membran yüzeyinde meydana gelen hızlı tıkanmalardan dolayı düşük kaldığı söylenebilir.

Tablo 3.6. Tahmin ve doğrulama deneyi sonuçları

Parametre	Tahmin	Doğrulama Deneyi
KOİ (mg/L)	12	13 (%95)
TÇK (%)	91	91
İletkenlik (%)	92	91
Akı (L/m ² .sa)	44	42

Kullanılan giriş suyu kalite parametreleri ve yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen süzüntü suyu toplu sonuçları DSÖ (Dünya Sağlık Örgütü) “İçme Suyu Kalitesi Kılavuzu” (1993), TS 266 (Türk Standartları Enstitüsü) “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik” (2005) ve Avrupa Birliği (Avrupa Birliği) “İnsani Tüketim Yönelik Su Kalitesi 98/83 Sayılı Konsey Direktifi” (1998) ile birlikte Tablo 3.7’ de verilmiştir.

Tablo 3.7. TSE, Avrupa Birliği, DSÖ tarafından verilen “İnsani Tüketim Amaçlı Su Kullanımı” sınır değerleri

Parametre	Birim	Giriş Suyu	Çıkış Suyu	TS266 (2005)	AB (1998)	DSÖ (1993)
pH	-	7,71		6,5-9,5	6,5-9,5	6,5-9,5
Sıcaklık	⁰ C	22				
İletkenlik	µS/cm	712	128	2500	2500	2500
TÇK	mg/L	333	60			
KOİ	mg/L	529	11,5			
Renk	Pt/Co	133	0	20	20	15
Bulanıklık	NTU	10.2	0,1	1,0	4,0	5,0
Sülfür	mg/L	0.2	<0,02			
Florür	mg/L	5,70	1,05	1,5	1,5	1,5
Kalsiyum	mg/L	65,84	0,249	-	-	300
Magnezyum	mg/L	15,52	0,279	-	-	-
Demir	mg/L	<0,2	<0,2	0,2	0,2	0,3
Alüminyum	ug/L	<0,20	<0,20	0,2	0,2	0,2
Nikel	mg/L	<0,02	<0,02	0,02	0,02	0,02
Mangan	mg/L	<0,05	<0,05	0,05	0,05	0,10
Kurşun	mg/L	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
Kadmiyum	mg/L	<0,005	<0,005	0,005	0,005	0,003
Çinko	mg/L	<0,1	<0,1	-	3,0	-
Bakır	mg/L	<0,2	<0,2	2,0	2,0	2,0
Arsenik	mg/L	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
Krom	mg/L	<0,05	<0,05	0,05	0,05	0,05
Sodyum	mg/L	<0,1	<0,1	200	200	200
Sertlik	mg/L	228,31	1,769	-	-	500

Tablo 3.7 suyun yeniden kullanılabilirliği açısından değerlendirilmiş olup, NF membran ile uygun işletme şartlarında arıtılan kömür endüstrisi atıksularının DSÖ (1993), TS 266 (2005) ve Avrupa Birliği (1998) verilerine göre insani tüketim amacıyla kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar, arıtılan atıksuyun kömür madenciliği endüstrisinde kömür yıkama için etkin bir şekilde yeniden kullanılabilereğini göstermektedir.

Wadekar ve diğ., tarafından terk edilmiş bir kömür madenine ait olan maden drenaj atıksularının arıtılması için seramik ve polimerik membranların performansını değerlendirilmiştir (Wadekar ve diğ., 2018), Düşük bir arsenik arıtma verimliği (%33) belirlenmesine karşın, NF membranı ile içme suyu standartlarında sznt suyu elde edilebildiği grlmştr. Wadekar vd, tüm çok değerlikli iyonları %99'un üzerinde gidermeyi başarmıştır, Kiswanto ve diğ., ise Endonezya'da bulunan kömür madeninden kaynaklanan asit suyunun arıtılması için NF membranları kullanmış ve KOİ, AKM, TK ve Fe için sırasıyla %56-%93; %79-100; %43-69; %67-100 giderim verimleri elde etmiştir. Ayrıca NF membran teknolojisi kullanılarak arıtılmış kömür madeni asit sularının, Endonezya Sağlık Bakanlığı Yönetmeliği standartlarına uygun içme suyu kaynağı olarak kullanılabilereğini belirtmişlerdir (Kiswanto ve diğ., 2020).

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıksuların karakterizasyonuna bakıldığında, bu atıksuların oldukça asidik ve yüksek konsantrasyonlarda askıda katı madde içerdiği görülmektedir. Ayrıca organik bileşikler, metaller, ağır metaller, arsenik, demir ve manganez gibi metaloidlerle kirlenme de yaygın olarak görülmektedir. Bazı madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıksular, özellikle kömür endüstrisi atıksuları kabul edilemeyecek tuzluluk değerlerine sahiptir ve oluşan atıksuların deşarj öncesinde arıtılması gerekmektedir.

Global düzeydeki su sıkıntısı problemlerine karşılık, özellikle yoğun su tüketen endüstrilerin ve tarımsal faaliyetlerin çok olduğu bölgelerin, yeterli olmayan su kaynaklarının daha fazla tüketilmemesi için bazı önlemler alması şarttır. Önerilen önlemler arasında endüstriyel atıksuların arıtılıp geri kazanımı ve yeniden kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Özellikle yüksek miktarda su tüketen endüstrilerin artması, bu endüstrilerin su ihtiyaçlarını karşılayacak kaynakların bulunmasında yaşanan zorluklar, su kıtlığı problemleri ve su maliyetlerindeki artışlar, atıksuların uygun teknolojiler ile arıtılarak geri kazanımını gerekli kılmaktadır. Su geri kazanımı ve yeniden kullanımı hem bölgesel hem de ulusal ölçekte suyun sürdürülebilirliğinin önemli bileşeni haline gelmiştir ve sadece sanayide değil aynı zamanda tarım, içme suyu, içilmeyen evsel su kullanımı, peyzaj sulaması, rekreasyon ve yeraltı suyu beslemesi gibi alternatif su kaynakları oluşturması açısından da giderek önem kazanmıştır. Atıksuların arıtılarak yeniden kullanımının hız kazandığı bu dönemde atıksuların arıtılmasında membran prosesler de atıksuyun gerekli standartlarda arıtılmasında önemli bir araç haline gelmiştir.

Bu çalışmada, ithal kömür depolama tesislerinde kömürlerin yıkanması ve yağmur sularının kömür yığınlarından sızması sonucunda oluşan atıksuların NF Prosesi ile arıtılarak geri kazanılabilirliği laboratuvar şartlarında incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, DESAL-5-DK membranı ile 41,78 L/m².sa süzüntü akısında yüksek organik madde giderimi (%95 KOİ giderimi) sağlanmış

olup %95'in üzerinde sülfür ve %91 seviyesinde TÇK giderimi ile yüksek inorganik madde giderimi elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen süzüntü suyunda %100'e yakın renk ve bulanıklık ile yüksek iletkenlik giderimi gözlenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen süzüntü suyu kalite değerleri; DSÖ "İçme Suyu Kalitesi Kılavuzu" (1993), TS 266 "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik" (2005) ve Avrupa Birliği "İnsani Tüketim Yönelik Su Kalitesi 98/83 Sayılı Konsey Direktifi" (1998)'e göre insani tüketim amacıyla kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar, arıtılan atıksuyun kömür madenciliği endüstrisinde kömür yıkama için etkin bir şekilde yeniden kullanılabilceğini göstermektedir. Benzer atıksu üreten endüstriler için de NF prosesi yüksek kalitede su geri kazanımında etkin olarak kullanılabilir bir alternatif olabilir.

Membran prosesler geniş kullanım alanları ve özellikle etkin giderim verimleri nedeniyle son yıllarda en çok kullanılan arıtım yöntemleri arasındadır. Önemli avantajlarına rağmen oluşturdukları konsantre akım bu proseslerin en önemli dezavantajıdır. Membran proseslerin oluşturduğu konsantre akımın arıtımının yanısıra minimizasyonu ve yönetimi ile ilgili son zamanlarda yapılan çalışmalar giderek önem kazanmıştır. Özellikle endüstrilerde membran proseslerin kullanımı arttıkça etkin çevre korumaya odaklanmış yenilikçi konsantre yönetim yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekli olmaktadır.

Bu çalışmada, ithal kömür depolama tesislerinde kömürlerin yıkanması ve yağmur sonrasında oluşan atıksuların geri kazanılabilirliği için Nanofiltrasyon (NF) prosesi kullanılmış olup deneysel sonuçların cevap yüzeyi yöntemi ile analizi sonucu belirlenen optimum proses işletme şartlarından VRF 2 olarak belirlenmiştir. %50 su geri kazanımı anlamına gelen bu orandan yola çıkılarak; çalışılan atıksuda kömür kaynaklı inorganik maddeler ve ağır metaller nedeniyle yüksek miktarda TÇK membran yüzeyinde tıkanmaların çok kısa sürelerde gerçekleştiğini göstermektedir. Düşük su geri kazanım oranıyla işletimin olması, oluşacak konsantre hacminin fazla olması anlamına gelir. Yüksek kalitede su geri kazanımı gerçekleşirken bertaraf zorunluluğu olan inorganik madde içeriği yüksek konsantre oluşumu ilave bir çevresel problem anlamına gelmektedir. Bu nedenle, bahsedilen bu sonuçlardan, bu tür atıksularda NF prosesi öncesinde bir ön arıtımın yapılması ve su geri kazanımının

maksimum seviyelere çıkarılması gerekmektedir. Bunun için NF öncesinde çöktürme, adsorbsiyon, MF veya UF membranlar kullanılarak ön arıtımın yapılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

Aani S.A., Mustafa T.N., Hilal N., Ultrafiltration Membranes for Wastewater and Process Engineering: A Comprehensive Statistical Review over the past decade, *Journal of Water Process Engineering*, 2020, **35**, 101241.

Acı G., Sızıntı Sularının Membran Proseslerle Arıtılabilirliği: Odayeri Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 297025.

Adham S., Gagliardo P., Boulos L., Oppenheimer J., Trussel R., Feasibility of the Membrane Bioreactor Process for Water Reclamation, *Water Sci. Technol.*, 2001, **43** (10), 203–209.

Ahmad A.L., Ismail S., Bhatia S., Water recycling from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology, *Desalination*, 2003, **157**, 87-95.

Akdağlı M., Arslan S., Ters osmoz ileri arıtma sistemleri ile çok amaçlı su arıtımında proses tasarımı, Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2008.

Aksan A., Türkiye'nin Kömür Politikaları ve Temiz Kömür Teknolojilerinin Kullanılması Durumunda Ülke Ekonomisine Katkılarının ve Çevresel Etkilerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269143.

Aksu H., Türkiye'de İçmesuyu Arıtımında Membran Uygulamaları ve Uygulama Aşamasında Karşılaşılan İşletme Problemleri, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Uzmanlık Tezi, 2019.

APHA, AWWA, Standart Methods for the Examination of Water and Wastewaters, 21th ed., *American Public Health Association Publication*, Washington, USA, 2005.

Asan C., Gri Suların Yeniden Kullanımında Membran Biyoreaktör (MBR) Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013, 341463.

Avrupa Birliği, İnsani Tüketime Yönelik Su Kalitesi, 98/83 Sayılı Konsey Direktifi, (1998).

Balcı E., Tekstil Atıksularının Membran Proseslerle Arıtımı ve Endüstriyel Su Geri Kazanımı, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 2016, 439440.

Bend S.L., The Origin Formation and Petrographic Composition of Coal, *Fuel*, 1992, **71**, 851-870.

Bixio D., Heyder B.D., Cikurel H., Muston M., Miska V., Joksimovic D., Schäfer A.I., Ravazzini A., Aharoni A., Savic D., Thoeve C., Municipal Wastewater Reclamation: where do we stand? An Overview of Treatment Technology and Management Practice, *Water Science and Technology: Water Supply*, 2005, **(5)** 1 77-85.

Boylu F., Karaağaçlıoğlu İ.E., Kömür Bileşenlerinin Kalorifik Değer Üzerindeki Etkisi Üzerine Değerlendirme, *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 2018, **39** (3), 221-236.

Cinperi N.C., Ozturk E., Yigit N.O, Kitis M., Treatment of Woolen Textile Wastewater Using Membrane Bioreactor, Nanofiltration and Reverse Osmosis for Reuse in Production Processes, *Journal of Cleaner Production*, 2019, **223**, 837-848.

Dach H., Comparaison des Opérations de Nanofiltration et d'Osmose Inverse pour le Dessalement Sélectif des Eaux Saumâtres: de l'échelle Laboratoire au Pilote Industriel, Doktora Tezi, Université d'Angers, 2008.

Dang H.T.T., Tran H.D., Tran S.H., Sasakawa M., Narbaitz R.M., Treatment and Reuse of Coalmine Wastewater in Vietnam: Application of Microfiltration, *Water Quality Research Journal*, inpress, 2018, 1-10.

Demir Ö., Yıldız M., Sercan Ü., Arzum C.Ş., Atıksuların Geri Kazanılması ve Yeniden Kullanılması, *Harran üniversitesi Muhendislik Dergisi*, 2017, **02**, 1-14.

Demir S.A., İçme Sularından Demir ve Mangan Gideriminde Farklı Membranların Kullanılması ve Membranların Kirlenme Karakterizasyonları, Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2019, 578761.

Demirkol G.T., Plazma Tekniği ile Membran Yüzeyğnğn Modifikasyonu ve Membran Biyoreaktörlerde Uygulanması, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

Dilaver M., Seramik Membran Filtrasyonu ile Tekstil Sektöründe Kostik Ve Sıcak Su Geri Kazanımı, Doktora tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2018, 518676.

Dizge N., Mikrofiltrasyon Membranların Kirlenme Özelliklerinin Membran Tipine ve Gözenek Boyutuna Bağlı Olarak Klasik Aktif Çamur Sisteminde İncelenmesi, Doktora tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2011, 290137.

Dünya Sağlık Örgütü, İçme Suyu Kalitesi Kılavuzu, (3. baskı), Cenevre (2008).

Egbuikwem P.N., Mierzwa J.C., Saroj D.P., Evaluation of Aerobic Biological Process with Post-Ozonation for Treatment of Mixed Industrial and Domestic

Wastewater for Potential Reuse in Agriculture, *Bioresource Technology* ,2020, **318**, 124200.

Eng C.Y., Yan D., Withanage N., Liang Q., Zhou Y., Wastewater Treatment and Recycle from a Semiconductor Industry: A Demo-Plant Study, *Water Practice & Technology*, 2019, **14**, 2.

EPA, 2012 Guidelines for Water Reuse, EPA/600/R-12/618, September 2012.

Ersan M.S., Ladner D.A., Karanfil T., The Control of N-nitrosodimethylamine, Halonitromethane, and Trihalomethane Precursors by Nanofiltration. *Water Res.*, 2016 **105**, 274–281.

Esteves T., Mota A.T., Barbeitos C., Andrade K., Afonso C.A.M., Ferreira F.C., A Study on Lupin Beans Process Wastewater Nanofiltration Treatment and Lupanine Recovery, *Journal of Cleaner Production*, 2020, **277**, 123349.

Fang F., Han H., Effect of Catalytic Ozonation Coupling with Activated Carbon Adsorption on Organic Compounds Removal Treating RO Concentrate from Coal Gasification Wastewater, *Ozone Sci. Eng.* 2018, 1–9.

İlhan F., Elektrodializ Proseslerinden (KED/BMED) Kaynaklanan Konsantre Aakımın Minimizasyonu ve Yönetimi, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 2018, **24** (3), 500-505.

Atalay F., The History of the Coal Mining Industry and Mining Accidents in the World and Turkey. *Turk Thorac J* , 2015, **16** (1), 5-8.

Ghayeni S.B.S., Madaeni S.S., Fane A.G., Schneider R.P., Aspects of Microfiltration and Reverse Osmosis in Municipal Wastewater Reuse, *Desalination*,1996, **106**, 25-29.

Gozálvez-Zafrilla J.M., Sanz-Escribano D., Lora-García J., León Hidalgo M.C., Nanofiltration of Secondary Effluent for Wastewater Reuse in the Textile Industry, *Desalination*, 2008, **222**, 272–279.

Gu, J., Liu, H., Wang, S., Zhang, M., Liu, Y., An innovative anaerobic MBRreverse osmosis-ion exchange process for energy-efficient reclamation of municipal wastewater to Newater-like product water. *J. Clean. Prod.*, 2019, **230**, 1287-1293.

Guo H., Peng L.E., Yao Z., Yang Z., Ma X., Tang C.Y., Non-polyamide Based Nanofiltration Membranes Using Green Metal-Organic Coordination Complexes: Implications for the Removal of Trace Organic Contaminants, *Environ. Sci. Technol.* , 2019, **53**, 2688–2694.

Gupta V.K., Ali I, Saleh T.A., Nayak A., Agarwal S., Chemical Treatment Technologies for Waste-Water Recycling-An Overview. *RSC Adv.*, 2012, **2**, 6380-6388.

Hajarat R.A., The Use Of Nanofiltration Membrane in Desalinating Brackish Water, *Doktora Tezi*, University of Manchester, 2010.

Halakarni M., Mahto A., Aruchamy K., Mondal D., Nataraj S.K., Developing Helical Carbon Functionalized Chitosan-Based Loose Nanofiltration Membranes for Selective Separation and Wastewater Treatment, *Chemical Engineering Journal*, 2020, 127911.

Hilala N., Al-Zoubi H., Darwish N.A., Mohammad A.W., Arabi M.A., A Comprehensive Review of Nanofiltration Membranes: Treatment, Pretreatment, Modelling, and Atomic Force Microscopy, *Desalination*, 2004, **170**, 281–308.

Schaep J., Van der Bruggen B., Uytterhoeven S., Croux R., Vandecasteele C., Wilms D., Van Houtte E., Vanlerberghe F., Removal of Hardness from Groundwater by Nanofiltration, *Desalination*, 1998, **119**, 295–302.

Jia S., Han H., Zhuang H., Xu P., Hou B., Advanced Treatment of Biologically Pretreated Coal Gasification Wastewater by a Novel Integration of Catalytic Ultrasound Oxidation and Membrane Bioreactor, *Bioresour. Technol.*, 2015, **189**, 426–429.

Jia S., Han H., Hou B., Zhuang H., Advanced Treatment of Biologically Pretreated Coal Gasification Wastewater by a Novel Integration of Three-Dimensional Catalytic Electro-Fenton and Membrane Bioreactor, *Bioresource Technology*, 2015, **198**, 918-921.

Jin X., Li E., Lu S., Qiu Z., Sui Q., Coking Wastewater Treatment for Industrial Reuse Purpose: Combining Biological Processes with Ultrafiltration, Nanofiltration and Reverse Osmosis, *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25** (8), 1565–1574.

Juanga C.L., Tseng D.H., Linb H.Y., Membrane Processes for Water Reuse from the Effluent of Industrial Park Wastewater Treatment Plant: A Study on Flux and Fouling of Membrane, *Desalination*, 2007, **202**, 302–309.

Mert B.K., Doğan E.C., Balcı E., Tilki Y.M., Aksu Ş., Gören A.Y., Aydın C., Tekstil Endüstrisinde Bütünleşik Membran Sistemi ile Su Geri Kazanımı ve Hibrit İleri Oksidasyon/Membran Filtrasyonu ile Konsantrelerin Arıtımı ve Yönetimi, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 2018, **24** (3), 468-475.

Kiswanto K., Susanto H., Sudarno S., Treatment of Coal Mine Acid Water Using Nf270 Membrane as Environmentally Friendly Technology, *Journal Pendidikan IPA Indonesia*, 2020, **9** (3), 439-450.

Koyuncu İ., Nanofiltrasyon Membranları ile Tuz Gideriminde Organik İyon Etkisi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 112233.

Kömür Sektör Raporu (Linyit) 2019, Ankara, 2020.

Kural O., *Kömür Özellikleri Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, İtü Maden Fakültesi, İstanbul, 1998.

Kurt Ç., *Adana Tufanbeyli Linyit Kömürünün Tanecik Boyutunun Yanma Özelliklerine Etkisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

Lee S., Kim Y., Hong S., Treatment of Industrial Wastewater Produced by Desulfurization Process in a Coal-Fired Power Plant via FO-MD Hybrid Process, *Chemosphere*, 2018, **210**, 44-51.

Li K., Maa W., Hana H., Xua C., Hanb Y., Wanga D., Maa W., Zhua H., Selective Recovery of Salt from Coal Gasification Brine by Nanofiltration Membranes, *Journal of Environmental Management*, 2018, **223**, 306–313.

Li J., Wu J., Sun H., Cheng F., Liu Y., Advanced Treatment of Biologically Treated Coking Wastewater by Membrane Distillation Coupled with Pre-Coagulation, *Desalination*, 2016, **380**, 43-51.

Li Y., Li M., Xiao K., Huang X., Reverse Osmosis Membrane Autopsy in Coal Chemical Wastewater Treatment: Evidences of Spatially Heterogeneous Fouling and Organic-Inorganic Synergistic Effect, *Journal of Cleaner Production*, 2020, **246**, 118964.

Liu X., Tian C., Sun W., Zhao Y., Shih K., Secondary Effluent Purification Towards Reclaimed Water Production Through the Hybrid Post-Coagulation and Membrane Distillation Technology: A Preliminary Test, *Journal of Cleaner Production*, 2020, **271**, 121797.

Livazovic S., Ultrafiltration and Nanofiltration Multilayer Membranes Based on Cellulose, Doktora tezi, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia, 2016.

Luo W., Phan H.V., Xie M., Hai F.I., Price W.E., Elimelech M., Nghiem L.D., Osmotic Versus Conventional Membrane Bioreactors Integrated with Reverse Osmosis for Water Reuse: Biological Stability, Membrane Fouling, and Contaminant Removal, *Water Research*, 2017, **109**, 122-134.

Mai Z., Membrane Processes for Water and Wastewater Treatment : Study and Modeling of Interactions Between Membrane and Organic Matter, Other. Ecole Centrale Paris, 2013. English. NNT : 2013ECAP0053, 2013.

Maiti D., Ansari I., Rather M., Deepa A., Comprehensive Review on Wastewater Discharged from the Coal-Related Industries – Characteristics and Treatment Strategies, *Water Science and Technology*, 2019, **7911**, 2023-2035.

Marcucc M., Nosenzo G., Capannelli G., CiabattP I., Corrieri D., Ciardelli G., Treatment and Reuse of Textile Effluents Based on New Ultrafiltration and other Membrane Technologies, *Desalination*, 2001, **138**, 75-82.

Membran Teknolojileri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2016.

Mohsen M.S., Treatment and Reuse of Industrial Effluents: Case Study of a Thermal Power Plant, *Desalination*, 2004, **167**, 75-86.

Mulder M., Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.

Mulder M., Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, ISBN 0-923-9248-8, 1996.

Mutlu B.K., Cantoni B., Turolla A., Antonelli M., Hsu-Kim H., Wiesner M.R., Application of Nanofiltration for Rare Earth Elements Recovery from Coal Fly Ash Leachate: Performance and Cost Evaluation, *Chemical Engineering Journal*, 2018, **349**, 309-317.

Nada T.N., Characterisation of Nanofiltration Membranes for Sulphate Rejection, Doktora Tezi, University of Glasgow, 2014.

Omondi D.O., Wastewater Management Techniques: A Review of Advancement on the Appropriate Wastewater Treatment Principles for Sustainability, *Environmental Management and Sustainable Development* 2017, **6**, 1.

Orem W. H., Finkelman R. B., *Coal Formation and Geochemistry*. Treatise on Geochemistry: Second Edition, USA, 2013.

Özdoğan S., Ünver Ö., Türkiye'nin Taş Kömürü ve Linyit Envanteri ile İlgili Ekonomik Değerlendirme, Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri, İstanbul, 1998.

Palit S., Frontiers of Nanofiltration, Ultrafiltration and the Future of Global Water Shortage - A Deep and Visionary Comprehension, *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 2014, **38**, 120-131.

Petricic I., Korenak J., Povodnik D., Hélix-Nielsen C., A Feasibility Study of Ultrafiltration/Reverse Osmosis (UF/RO)-Based Wastewater Treatment and Reuse in the Metal Finishing Industry, *Journal of Cleaner Production*, 2015, **110**, 292-300.

Piadeha F., Moghaddama M.R.A., Mardan S., Present Situation of Wastewater Treatment in the Iranian Industrial Estates: Recycle and Reuse as a Solution for Achieving Goals of Eco-industrial Parks. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, **92**, 172-178.

Raghu S., Ahmed Basha C., Chemical or Electrochemical Techniques, Followed by Ion Exchange, for Recycle of Textile Dye Wastewater, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**, 324–330.

Rajkumar K., Muthukumar M., Sivakumar R., Novel Approach for the Treatment and Recycle of Wastewater from Soya Edible Oil Refinery Industry—An Economic Perspective, *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54**, 752–758.

Rautenbach R., Membran verfahren Grundlagen der Modul und Anlagenauslegung, Springer, Germany, 1997, **3**, 540–615.

Ravazzini A.M., Van Nieuwenhuijzen A.F., Van der Graaf J.H.M.J., Direct Ultrafiltration of Municipal Wastewater: Comparison Between Filtration of Raw Sewage and Primary Clarifier Effluent, *Desalination*, 2005, **178** (1-3), 51-62.

Sarkar B., Chakrabarti P.P., Vijaykumar A., Kale V., Wastewater Treatment in Dairy Industries - Possibility of Reuse, *Desalination*, 2006, **195**, 141–152.

Seçer A., Kömür ve Kömür-Biyokütle Karışımlarından Hidrojen Eldesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2019, 596199 .

Sierra C., Saiz J.R.A., Gallego J.L.R., Nanofiltration of Acid Mine Drainage in an Abandoned Mercury Mining Area, *Water Air and Soil Pollution*, 2013, **224** (10), 1734.

Singh R., Introduction to Membrane Technology. Hybrid Membrane Systems for Water Purification, 2005, 1–56. doi:10.1016/b978-185617442-8/50002-6.

Singh V., Purkait M.K., Chandaliya V.K., Biswas P.P., Banerjee P.K., Das C., Development of Membrane Based Technology for the Separation of Coal from Organic Solvent, *Desalination*, 2012, **299**, 123–128.

Singh R., Hankins N.P., Introduction to Membrane Processes for Water Treatment, *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment*, 2016 15–52.

Sorbay S., Membran Biyoreaktörlerde Enerji İhtiyacının Azaltılması ve Membran Yüzey Temizleme İşlemlerine Değişik Yaklaşımlar, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 455352.

Tamzok N., Dünyada ve Türkiye’de Kömür, Türkiye’nin Enerji Görünümü, 2019.

Topacık D., Ulusal Membran Teknolojileri Uyg-Ar Merkezi, İTÜ Bülteni, 2016, yıl:1, sayı:2.

TS 266, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik, Türk Standartları Enstitüsü, (2005).

URL-1: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/coal> (Ziyaret Tarihi: 25 Kasım 2020)

URL-2: <https://www.iea.org/reports/coal-information-overview> (Ziyaret tarihi: 25 Kasım 2020).

URL-3:
<https://www.dunyaenerji.org.tr/wpcontent/uploads/2017/11/enerjirapor2012.pdf>
(Ziyaret tarihi: 25 Kasım 2020).

Ünalın G., Kömür jeolojisi, *Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi*, Ankara, 2010, 41, 556.

Ünver Ö., Kara D., *Türkiye’de Kömür Madenciliği ve Çevre, Madencilik*, 1994, **2**.

Wadekar S.S., Vidic R.D., Comparison of Ceramic and Polymeric Nanofiltration Membranes for Treatment of Abandoned Coal Mine Drainage, *Desalination*, 2018, **440**, 135-145.

Wallace D.F., Johnstone P.R. (Eds.), Dairy Effluente - Composition, Application and Release, *Plant and Food Research*, Hawkes Bay, 2010.

Wang Y., Li X., Zhen L., Zhang H., Zhang Y., Wang C., Electro-Fenton Treatment of Concentrates Generated in Nanofiltration of Biologically Pretreated Landfill Leachate, *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 115–121, 229–230.

Wang S., Xiao K., Huang X., Characterizing the Roles of Organic and Inorganic Foulants in RO Membrane Fouling Development: The Case of Coal Chemical Wastewater Treatment, *Separation and Purification Technology*, 2019, **210**(9), 1008-1016.

Wang J., Tanga X., Xu Y., Cheng X., Li G., Lianga H., Hybrid UF/NF Process Treating Secondary Effluent of Wastewater Treatment Plants for Potable Water Reuse: Adsorption Vs. Coagulation for Removal Improvements and Membrane Fouling Alleviation, *Environmental Research*, 2020, 188, 109833.

Wang Y., Wang J., Liu L., Cao Z., Wang J., Jia M., Ji X., Treatment of Coal Gasification Brine by Membrane Distillation: Effect of Mixed Fouling and Pretreatment on Process Performance, *Desalination*, 2021, 499, 114820.

WHO, Potable Reuse: Guidance for Producing Safe Drinking-Water ISBN 978-92-4-151277-0, 2017.

Xiong R., Wei C., Current Status and Technology Trends of Zero Liquid Discharge at Coal Chemical Industry in China, *Journal of Water Process Engineering* , 2017, **19**, 346–351.

Yan L., Wang Y., Ma H., Han Z., Zhang Q., Chen Y., Feasibility of Fly Ash-Based Composite Coagulant for Coal Washing Wastewater Treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **203**, 221–228.

Yarmuhammet G., Tekstil Atıksularının Membran Prosesleri ile Geri Kazanımında ön Arıtmanın Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 323694.

Yaşar A., Membran Teknolojiler Kullanılarak Arıtılmış Kentsel Atıksulardan Sulama Suyu Geri Kazanımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016, 423756.

Yılmaz H.T., Tekstil Atıksularının Nanofiltrasyon Membranı ile Arıtımı Sonucu Oluşan Konsantrenin Anaerobik Arıtılabilirliği Ve Moleküler Ağırlık Dağılımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü, İstanbul, 2016, 432158.

Zhang C., Dai, Y., Johnson J.R., Karvan O., Koros W.J., High Performance ZIF-8/6FDA-DAM Mixed Matrix Membrane for Propylene/Propane Separations, *Journal of Membrane Science*, 2012, **389**, 34–42.

Zhang Y., Zhang S., Gao J., Chung T.-S., Layer-by-layer Construction of Graphene Oxide (GO) Framework Composite Membranes for Highly Efficient Heavy Metal Removal, *Journal of Membrane Science*, 2016, **515**, 230–237.

Zulaikha S., Lau W.J., Ismail A.F., Jaafar J., Treatment of Restaurant Wastewater Using Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes, *Journal of Water Process Engineering*, 2014, **2**, 58–62.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Avcı Kaplan E., Narcı A.O., Can Doğan E., İthal Kmr Depolama Sahası Atıksularının Nanofiltrasyon Prosesi ile Geri Kazanımı, *International Marmara Sciences Congress*, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 19-20 Haziran 2020.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’ de tamamladı. 2010 yılında girdiği, Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında Çevre Mühendisi olarak mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2016 yılı Ocak ayı’ndan bu yana Kocaeli Gebze Kömürçüler İhtisas Organize Sanayi Bölgesi Atıksu Arıtma Tesisi’nde tesisin işletilmesinden sorumlu Çevre Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

