

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU ARITIMINDA UYGULANAN PROSESLERİN ÇOK KRİTERLİ
KARAR VERME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuba AĞUN

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

ŞUBAT 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU ARITIMINDA UYGULANAN PROSESLERİN ÇOK KRİTERLİ
KARAR VERME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tuba AĞUN
(501211735)**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serdar DOĞRUEL

ŞUBAT 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**EVALUATION OF DRINKING WATER TREATMENT PROCESSES USING
MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS**



M.Sc. THESIS

**Tuba AĞUN
(501211735)**

Department of Environmental Engineering

**Environmental Sciences, Engineering and Management Master of
Science Program**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serdar DOĞRUEL

FEBRUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211735 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tuba AĞUN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İÇME SUYU ARITIMINDA UYGULANAN PROSESLERİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Serdar DOĞRUEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Derya Yüksel İMER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Emel TOPUZ
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 9 Ocak 2025
Savunma Tarihi : 13 Şubat 2025





Aileme,



ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmamın hazırlanmasında desteği olan sayın hocam Doç. Dr. Serdar DOĞRUEL'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Yüksek lisans çalışmam süresince bana destek olan arkadaşlarıma, bilgi talebinde bulunduğumda gerekli desteği gösteren çalışma kurumum İSKİ bünyesindeki arkadaşlarım ve yöneticilerime çok teşekkür ederim.

Ancak en büyük teşekkürü, her zaman yanımda olan, bana inanan ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme etmek istiyorum. Onların sevgisi ve desteği ile bu süreci tamamlayabildim. Bana verdikleri güç için sonsuz teşekkürler.

Ocak 2025

Tuba AĞUN
(Çevre Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	2
2. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ	3
2.1 AHP Metodu	4
2.2 PROMETHEE Metodu	6
2.3 TOPSIS Metodu	8
3. İSTANBUL'DA SU TEMİNİ	11
3.1 İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi	12
4. UYGULAMA	15
4.1 Koagülasyon-Flokülasyon Senaryosu	15
4.1.1 Çevresel etki kriteri hakkında bilgiler	16
4.1.1.1 Alüm	16
4.1.1.2 Demir (III) Klorür	17
4.1.1.3 PACl	18
4.1.1.4 Kitosan	19
4.1.2 İşletme kolaylığı hakkında bilgiler	20
4.1.2.1 Alüm	20
4.1.2.2 Demir (III) Klorür	21
4.1.2.3 PACl	22
4.1.2.4 Kitosan	23
4.1.3 Arıtma verimi hakkında bilgiler	24
4.1.3.1 Alüm	24
4.1.3.2 Demir (III) Klorür	25
4.1.3.3 PACl	26
4.1.3.4 Kitosan	26
4.1.4 Doz-çamur ilişkisi hakkında bilgiler	27
4.1.4.1 Alüm	28
4.1.4.2 Demir (III) Klorür	29
4.1.4.3 PACl	30
4.1.4.4 Kitosan	31
4.1.5 Doz-maliyet ilişkisi hakkında bilgiler	32
4.1.5.1 Alüm	32

4.1.5.2 Demir (III) Klorür	33
4.1.5.3 PACl	35
4.1.5.4 Kitosan	36
4.1.6 pH kriteri hakkında bilgiler	38
4.1.6.1 Alüm	39
4.1.6.2 Demir (III) Klorür	39
4.1.6.3 PACl	40
4.1.6.4 Kitosan	41
4.1.7 TOPSIS yönteminin uygulanması	42
4.2 Filtrasyon Senaryosu	44
4.2.1 Maliyet kriteri hakkında bilgiler	45
4.2.1.1 Hızlı kum filtresi	46
4.2.1.2 Mikrofiltrasyon	47
4.2.1.3 Ultrafiltrasyon	48
4.2.1.4 Nanofiltrasyon	52
4.2.2 Performans kriteri hakkında bilgiler	53
4.2.2.1 Hızlı Kum Filtresi	54
4.2.2.2 Mikrofiltrasyon	55
4.2.2.3 Ultrafiltrasyon	57
4.2.2.4 Nanofiltrasyon	59
4.2.3 İşletme kolaylığı hakkında bilgiler	60
4.2.3.1 Hızlı kum filtresi	61
4.2.3.2 Mikrofiltrasyon	62
4.2.3.3 Ultrafiltrasyon	64
4.2.3.4 Nanofiltrasyon	66
4.2.4 Atık yönetimi hakkında bilgiler	67
4.2.4.1 Hızlı kum filtresi	68
4.2.4.2 Mikrofiltrasyon	69
4.2.4.3 Ultrafiltrasyon	72
4.2.4.4 Nanofiltrasyon	73
4.2.5 TOPSIS yönteminin uygulanması	76
4.3 Dezenfeksiyon Senaryosu	78
4.3.1 Maliyet kriteri hakkında bilgiler	79
4.3.1.1 UV	80
4.3.1.2 Klor	82
4.3.1.3 Kloramin	82
4.3.1.4 Ozon	84
4.3.2 Operasyonel kolaylık hakkında bilgiler	85
4.3.2.1 UV	86
4.3.2.2 Klor	87
4.3.2.3 Kloramin	87
4.3.2.4 Ozon	88
4.3.3 Patojen giderimi hakkında bilgiler	89
4.3.3.1 UV	89
4.3.3.2 Klor	90
4.3.3.3 Kloramin	91
4.3.3.4 Ozon	91
4.3.4 Güvenlik riski hakkında bilgiler	91
4.3.4.1 UV	92
4.3.4.2 Klor	92

4.3.4.3 Kloramin	93
4.3.4.4 Ozon	94
4.3.5 Proses Performansı hakkında bilgiler	95
4.3.5.1 UV	95
4.3.5.2 Klor	96
4.3.5.3 Kloramin	97
4.3.5.4 Ozon	98
4.3.6 Bakiye dezenfektan kriteri hakkında bilgiler	98
4.3.6.1 UV	99
4.3.6.2 Klor	99
4.3.6.3 Kloramin	100
4.3.6.4 Ozon	100
4.3.7 Yan ürün oluşturmama hakkında bilgiler.....	101
4.3.7.1 UV	101
4.3.7.2 Klor	102
4.3.7.3 Kloramin	102
4.3.7.4 Ozon	103
4.3.8 TOPSIS yönteminin uygulanması.....	103
4.4 Çamur Yönetim Senaryosu	107
4.4.1 Çevresel etki kriteri hakkında bilgiler.....	108
4.4.1.1 Arıtma uygulamaları	109
4.4.1.2 Yapı malzemesi üretimi	110
4.4.1.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları	112
4.4.1.4 Düzenli depolama.....	115
4.4.2 Ekonomik etki kriteri hakkında bilgiler	116
4.4.2.1 Arıtma uygulamaları	117
4.4.2.2 Yapı malzemesi üretimi	119
4.4.2.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları	122
4.4.2.4 Düzenli depolama.....	123
4.4.3 Sosyal kabul kriteri hakkında bilgiler	124
4.4.3.1 Arıtma uygulamaları	125
4.4.3.2 Yapı malzemesi üretimi	126
4.4.3.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları	127
4.4.3.4 Düzenli depolama.....	130
4.4.4 Teknik uygulanabilirlik/performans kriteri hakkında bilgiler.....	130
4.4.4.1 Arıtma uygulamaları	131
4.4.4.2 Yapı malzemesi üretimi	135
4.4.4.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları	138
4.4.4.4 Düzenli depolama.....	139
4.4.5 TOPSIS yönteminin uygulanması.....	141
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	147
KAYNAKLAR	149
ÖZGEÇMİŞ.....	157



KISALTMALAR

AHP	: Analitik Hiyerarşı Süreci
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
DBP	: Dezenfeksiyon Yan Ürünü
DOC	: Çözünmüş Organik Karbon
EUR	: Euro
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
MAUT	: Çoklu Özellik Fayda Teorisi
MF	: Mikrofiltrasyon
NF	: Nanofiltrasyon
NOM	: Doğal Organik Madde
PACl	: Polialüminyum Klorür
THM	: Trihalometan
TOPSIS	: İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği
UF	: Ultrafiltrasyon
UV	: Ultraviyole Radyasyon
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü



SEMBOLLER

A^+	: İdeal Nokta
A^-	: Negatif İdeal Nokta
a_{ij}	: Karar matrisi elemanı
i^{th}	: Karar matrisi alternatifi
j^{th}	: Karar matrisi kriteri
V_{ij}	: Ağırlıklandırılmış Normalize Matris
R_{ij}	: Normalleştirilmiş Karar Matrisi
w_j	: Kriter Ağırlığı
V_j^+	: İdeal Çözüm Değerleri
V_j^-	: Negatif İdeal Çözüm Değerleri
S_i^+	: İdeal çözüm değerine olan uzaklık
S_i^-	: Negatif ideal çözüm değerine olan uzaklık
P_i	: İdeal çözüme olan göreceli yakınlık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Koagülant Türleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.....	16
Çizelge 4.2: İşletme Kolaylığı Kriteri İçin Dikkat Edilen Puanlama.	24
Çizelge 4.3: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	27
Çizelge 4.4: Koagülantlar İçin Belirlenen Dozaj Miktarları.	38
Çizelge 4.5: Koagülantlar İçin Hesaplanan Maliyetler.....	38
Çizelge 4.6: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	38
Çizelge 4.7: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	42
Çizelge 4.8: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	42
Çizelge 4.9: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.	42
Çizelge 4.10: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.	42
Çizelge 4.11: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.	43
Çizelge 4.12: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.....	43
Çizelge 4.13: İdeal Uzaklık Değerleri.	43
Çizelge 4.14: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.	43
Çizelge 4.15: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.....	43
Çizelge 4.16: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.	43
Çizelge 4.17: Filtrasyon Yöntemleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.	45
Çizelge 4.18: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	76
Çizelge 4.19: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.	76
Çizelge 4.20: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.	76
Çizelge 4.21: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.	77
Çizelge 4.22: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.....	77
Çizelge 4.23: İdeal Uzaklık Değerleri.	77
Çizelge 4.24: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.	77
Çizelge 4.25: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.....	77
Çizelge 4.26: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.	77
Çizelge 4.27: Dezenfeksiyon Yöntemleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.	79
Çizelge 4.28: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	103
Çizelge 4.29: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.	104
Çizelge 4.30: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.	104
Çizelge 4.31: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.	104
Çizelge 4.32: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.....	105
Çizelge 4.33: İdeal Uzaklık Değerleri.	105
Çizelge 4.34: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.	105
Çizelge 4.35: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.....	106
Çizelge 4.36: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.	106
Çizelge 4.37: Çamur Yönetimi İçin Hazırlanan Karar Matrisi.....	108
Çizelge 4.38: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.	141
Çizelge 4.39: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.	142
Çizelge 4.40: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.	142

Çizelge 4.41: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.....	142
Çizelge 4.42: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.....	143
Çizelge 4.43: İdeal Uzaklık Değerleri.	143
Çizelge 4.44: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.	143
Çizelge 4.45: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.....	144
Çizelge 4.46: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.	144



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Karar Analizi Yöntemlerinin Sınıflandırılması. (P. Zhou, 2006).....	4
Şekil 2.2 : TOPSIS Yöntemi Temel İlkesi (A^+ :İdeal Nokta, A^- :Negatif İdeal Nokta). (Vasiliki Balioti, 2018)	8
Şekil 3.1 : İçme Suyu Havza Koruma Kuşakları.	12
Şekil 3.2 : İkitelli İçme Suyu Tesisleri Uydu Görüntüsü.	13
Şekil 3.3 : Tesisin Beslediği İlçeler.	14



İÇME SUYU ARITIMINDA UYGULANAN PROSESLERİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

Su, tüm canlıların varlığını sürdürebilmesi için temel bir gerekliliktir. Ancak, dünya genelinde temiz suya erişimin yetersizliği, ciddi sağlık sorunlarına yol açmakta ve bu sorunlar, kirli su kaynaklarından kaynaklanan hastalıklarla daha da derinleşmektedir. Dünya yüzeyinin büyük bir kısmı su ile kaplı olsa da kullanılabilir tatlı su miktarı oldukça sınırlıdır. Bu durum, su kaynaklarının korunmasını acil bir küresel mesele haline getirmiştir. Özellikle şehirleşme, endüstriyel gelişim, tarımın yoğunlaşması ve iklim değişikliği gibi faktörler, içme suyu temini ve kalitesini giderek daha da zorlaştırmaktadır.

Bunun yanı sıra, su arıtma süreçlerini iyileştirmek ve her su kaynağına özgü uygun çözümler geliştirmek için, ekonomik, çevresel ve teknik faktörlerin tümünü dikkate alan kapsamlı yaklaşımlar gerekmektedir. Geleneksel arıtma yöntemleri, bu karmaşık meselelerle başa çıkmakta yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, matematiksel modeller, algoritmalar ve bilgisayar simülasyonları gibi yenilikçi teknolojiler, karar alma süreçlerinde kullanılmakta ve bu araçlar, doğru çözümler bulmak için önemli bir temel oluşturmaktadır. Ancak, bu araçlar tek başına yeterli olmadığından su yönetimindeki karmaşıklığı çözmek için, farklı parametreleri bir arada ele alan daha entegre yöntemlerin kullanılması gerekmektedir.

Her su kaynağına özgü yerel koşullar ve özellikler dikkate alınarak tasarlanmış inovatif çözümler, etkili ve sürdürülebilir su arıtma süreçleri için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu bağlamda, çok kriterli karar verme yöntemleri, su arıtma seçeneklerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Ekonomik ve çevresel faktörler ile teknik gereksinimleri birleştirerek, en uygun çözümün belirlenmesinde rehberlik eder.

İstanbul'da su temini, büyük ölçüde yerüstü su kaynaklarından sağlanmaktadır. Şehirdeki su kaynaklarının büyük çoğunluğu yerüstü kaynaklarından temin edilirken

sadece küçük bir kısmı yeraltı kaynaklarından temin edilmektedir. Avrupa Yakası'nda, İstanbul'un yaklaşık %65'lik nüfusunun yaşadığı alanda, su kaynağı potansiyelinin yaklaşık %25-35'i bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, Avrupa Yakası'ndaki su temini için önemli bir rol üstlenen İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi için en etkili arıtma stratejisini belirlemektir. Bu hedef doğrultusunda, çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik Tekniği) kullanılarak, arıtma senaryoları farklı açılardan değerlendirilmiştir. Bu yöntem, ideal çözümle olan uzaklıkları belirleyerek, en uygun alternatifin seçilmesini sağlamaktadır. Çalışma, su arıtma süreçlerinde teknik, çevresel ve ekonomik kriterleri birleştirerek, sürdürülebilir ve verimli çözümler geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde uygulanan içme suyu arıtma süreçleri değerlendirilmiş ve TOPSIS yöntemiyle en uygun koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon, dezenfeksiyon ve çamur yönetimi yöntemleri belirlenmiştir. Demir (III) Klorür, düşük dozajlarda yüksek arıtma performansı, geniş pH uyumluluğu ve ekonomik sürdürülebilirliğiyle koagülasyon-flokülasyonda en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır. Filtrasyon yöntemleri arasında, küçük partikülleri etkili bir şekilde gidermesi ve gelişmiş otomasyon sistemleriyle işletme kolaylığı sağlaması nedeniyle Ultrafiltrasyon tercih edilmiştir. Dezenfeksiyon sürecinde, Ozon'un yüksek giderim verimi ve düşük yan ürün üretimi avantajlarına rağmen, maliyet ve bakiye dezenfektan eksikliği dezavantajları UV ile dengelenmiş ve her iki yöntemin de duruma göre uygun olduğu belirtilmiştir. Çamur yönetiminde ise Arıtma Uygulamaları, çevresel ve ekonomik etkiler ile sosyal kabul açısından en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Bu analizler, tesisin verimliliğini artırmak, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve ekonomik olarak uygun alternatifleri seçmek için rehber niteliğindedir.

EVALUATION OF DRINKING WATER TREATMENT PROCESSES USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODS

SUMMARY

Water is a fundamental requirement for the survival of all living organisms. However, the global challenge of limited access to clean water is resulting in serious health problems, which are exacerbated by diseases transmitted through contaminated water. Despite the fact that water covers a large part of the Earth's surface, the amount of usable fresh water is extremely scarce. This scarcity has made the conservation and management of water resources a critical issue worldwide. Factors like rapid urbanization, industrial growth, expanding agricultural practices, and the effects of climate change have all significantly impacted both the supply and the quality of drinking water. The increasing difficulty of ensuring adequate and safe water access calls for integrated strategies that incorporate economic, environmental, and technical factors to enhance water treatment processes and provide solutions tailored to the specific characteristics of each water source.

Traditional water treatment techniques are often inadequate to cope with the complexity of contemporary water-related issues. As a result, advanced technologies such as mathematical modeling, algorithms, and computer simulations are now being employed to assist in decision-making processes related to water management. These technological tools provide valuable insights and predictive capabilities, but on their own, they are insufficient to fully address the multifaceted nature of water resource management. Therefore, more integrated and holistic approaches are necessary—ones that consider multiple parameters simultaneously to ensure effective solutions to the challenges posed by water scarcity and pollution.

The development of innovative, context-specific solutions is crucial for improving water treatment methods. These solutions should be designed with local conditions in mind, allowing for efficient and sustainable water management. Multi-criteria decision-making (MCDM) methods, which evaluate multiple factors at once, play an important role in this process. By combining technical, economic, and environmental

criteria, these methods provide a comprehensive framework for assessing various treatment options. This enables decision-makers to identify the most appropriate and feasible solutions for different water treatment scenarios.

An example of such an application can be found in Istanbul, where the majority of the city's water demand is met through surface water resources, with only a small fraction sourced from underground aquifers. The European side of Istanbul, home to around 65% of the city's population, holds about 25-35% of the total water resources. The İkitelli Drinking Water Treatment Plant, which is located on the European side, is one of the most important facilities for water supply in the city. This plant processes water from several sources, including the Terkos Dam, the Istranca System, and the Sazlıdere Dam. The Terkos Dam, the oldest and most significant water source for the European side, regulates water flow in its own basin and manages additional supplies from the Istranca System, which are also provided to Istanbul.

The Terkos Dam water is pumped to the İkitelli treatment plant through a pump station. The Sazlıdere Dam, another crucial water source, began operations in 1996, and its water is also sent to the İkitelli plant via a pump station located about 5 kilometers from Küçükçekmece Lake. The Sazlıdere Dam continues to serve as a reliable water supply source for the city. The treatment plant has a significant capacity, processing around 800,000 cubic meters of water per day to meet the drinking water needs of Istanbul's population.

This study aims to identify the most effective water treatment strategies for the İkitelli facility by evaluating various treatment scenarios from multiple perspectives using the TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) method, a multi-criteria decision-making approach. TOPSIS allows for the selection of the best alternative by determining the distances between each treatment option and the ideal solution. By considering technical, environmental, and economic factors together, this study seeks to develop sustainable, efficient solutions for water treatment that are tailored to Istanbul's unique water supply conditions. Ultimately, the goal is to create an integrated framework that helps optimize water treatment processes, ensuring both the quality and sustainability of the water supply for the city's residents.

This study evaluated the drinking water treatment processes implemented at the Istanbul İkitelli Drinking Water Treatment Plant, employing the TOPSIS method to

identify the most effective methods for coagulation-flocculation, filtration, disinfection, and sludge management. By utilizing a structured decision-making approach, the study objectively assessed the performance of various techniques across multiple evaluation criteria, contributing valuable insights into process optimization.

For the coagulation-flocculation process, Iron (III) Chloride emerged as the most advantageous coagulant, outperforming alternatives in terms of treatment efficiency, cost-effectiveness, and pH adaptability. Its ability to deliver high treatment performance at lower dosages, operate effectively over a wide pH range, and provide an economically sustainable solution made it a superior choice. While other coagulants offered certain benefits, such as operational simplicity and lower environmental impact, they were limited in comparison to the comprehensive advantages of Iron (III) Chloride.

In the filtration process, Ultrafiltration stood out due to its exceptional performance and operational ease. Its ability to remove fine particles and microorganisms efficiently, produce high-quality water, and simplify operational workflows with advanced automation systems gave it an edge over other methods. However, the high energy requirements and capital costs associated with Ultrafiltration posed economic challenges that needed to be carefully considered. Nevertheless, based on a comprehensive evaluation of all criteria, Ultrafiltration was identified as the most suitable filtration method for drinking water treatment.

For disinfection, the results of the TOPSIS analysis highlighted the advantages of Ozone, such as its superior removal efficiency, minimal by-product generation, and strong process performance. However, Ozone's drawbacks, including high operational costs and the lack of residual disinfectant, were also acknowledged. When examining the relative closeness to the ideal solution, the performances of Ozone (0.54914) and UV (0.54656) methods were found to be very similar. This indicates that both Ozone and UV are viable disinfection options, with their selection depending on specific conditions. UV offers lower costs and operational simplicity, while Ozone excels in removal efficiency and reduced by-product formation. Therefore, both methods can be considered suitable depending on the facility's needs, budget constraints, and environmental priorities. This balanced interpretation provides a more nuanced understanding of the TOPSIS results.

In the sludge management process, Treatment Applications were identified as the optimal choice, achieving the highest scores across environmental impact, economic viability, social acceptance, and technical performance criteria. This method offers distinct advantages, such as the ability to generate valuable by-products, reduce environmental harm, and maintain cost-effective operations, while also garnering community support. Other options, such as regular storage, were found to have significant environmental and social drawbacks, whereas methods like construction or agricultural applications provided some benefits but fell short compared to Treatment Applications.

In conclusion, the TOPSIS analyses conducted for the disinfection, coagulation-flocculation, filtration, and sludge management processes at the İkitelli Drinking Water Treatment Plant proved to be an effective decision-making tool. These findings not only support the optimization of treatment processes but also promote environmental sustainability and economic feasibility. The results provide a strategic roadmap for enhancing the efficiency and sustainability of drinking water treatment operations at the plant.

1. GİRİŞ

İçilebilir su, tüm canlılar için vazgeçilmez bir kaynaktır ve dünyadaki pek çok hastalığın temel nedenleri arasında kalitesiz su bulunmaktadır. Dünya yüzeyinin büyük bir bölümü suyla kaplı olmasına rağmen, insanların doğrudan tüketebileceği temiz su miktarı oldukça sınırlıdır. Bu durum, mevcut tatlı su kaynaklarının korunmasını hem çevresel hem de insani bir zorunluluk haline getirmektedir. Ancak, sanayileşme, hızlı kentleşme, yoğun tarım faaliyetleri ve iklim değişikliği gibi etmenler, temiz içme suyu teminini ciddi şekilde tehdit ederek su arıtma tesislerinin üzerinde büyük bir yük oluşturmaktadır.

Temiz su temini konusundaki bu zorluklar, yalnızca istatistiksel verilerle çözülmesi mümkün olmayan, daha kapsamlı ve yaratıcı yaklaşımların devreye alınmasını gerekli kılmaktadır. Her bir su kaynağına özgü çözümler geliştirilmesi için, yalnızca teknik analizler değil, aynı zamanda toplumun katılımını teşvik eden yöntemlerin de kullanılması gereklidir. Bu doğrultuda, karmaşık süreçlerde alınan kararların kalitesini artırmak için yenilikçi tekniklerin ve araçların tercih edilmesi kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle son yıllarda, su yönetimi ve arıtma süreçlerinde bilgisayar simülasyonları, matematiksel modelleme yöntemleri ve gelişmiş algoritmalar önemli ölçüde kullanılmıştır. Bununla birlikte, su arıtma sistemlerinin dinamik yapısı, geleneksel modelleme tekniklerinin yeterli olmadığını ve daha kapsamlı çözümler geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu nedenle, en uygun su arıtma stratejisini belirleyebilmek için hem ekonomik hem çevresel hem de teknik unsurları dikkate alan çok boyutlu bir yaklaşım benimsenmelidir. Çok kriterli karar verme yöntemleri, içme suyu arıtma süreçlerinde farklı teknolojik ve çevresel parametrelerin yanı sıra maliyet faktörlerini bir araya getirerek en etkili ve sürdürülebilir çözümün bulunmasına olanak tanır. Bu yöntemler, modern su yönetimi ve arıtma politikalarının şekillendirilmesinde vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır.

1.1 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Yaygın kullanılan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri içerisinde yer alan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği) yöntemi, ideal alternatifin pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak olması gerektiği ilkesine göre çalışmaktadır.

Bu çalışmanın bir parçası olarak, İstanbul'un İçme Suyu Arıtma Tesislerinden biri olan İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi için en uygun arıtma stratejisini belirlemek üzere bir karar destek aracı geliştirilmiştir. Çalışma, dört kategoride çeşitli arıtma senaryolarını incelemiştir;

1. "Koagülasyon-Flokülasyon" (Geleneksel inorganik pıhtılaştırıcıları, kompozit pıhtılaştırıcıları ve doğal pıhtılaştırıcıları)
2. "Filtrasyon" (Hızlı kum filtrasyonu, mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon)
3. "Dezenfeksiyon" (UV radyasyonu, klorlama, kloraminasyon ve ozonlama)
4. "Çamur Yönetimi" (Atık su arıtma tesislerinde içme suyu arıtma çamurunun bir koagülant olarak kullanılması, çimento, tuğla ve seramik üretimine dahil edilmesi, beton ve harçta hammadde olarak kullanılması, tarımda uygulanması ve düzenli depolama)

Önerilen arıtma senaryoları üç temel kritere göre değerlendirilmiştir; maliyet (örn. sermaye yatırımı, işletme giderleri), çevresel etki (örn. arazi kullanımı, enerji tüketimi, küresel ısınmaya katkılar) ve teknik performans (örn. toplam organik karbon seviyeleri). TOPSIS yöntemi senaryoları değerlendirmek ve sıralamak için uygulanmış ve nihayetinde İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi için en etkili ve sürdürülebilir arıtma çözümü belirlenmiştir.

2. ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME YÖNTEMLERİ

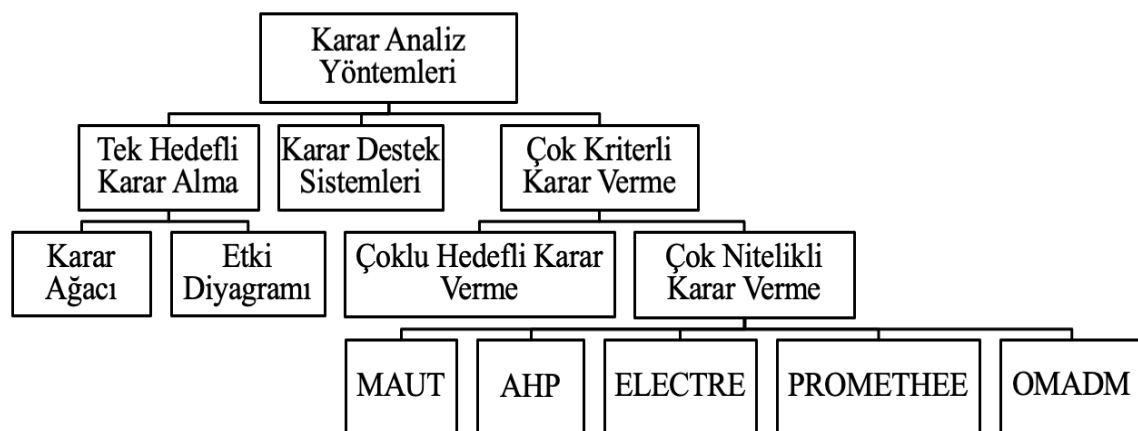
Karar alma, birden fazla olası eylem arasında seçim yapmayı içerir, ancak mükemmel bir seçeneğin her zaman var olmayabileceğini anlamak önemlidir. Bazı alternatifler keşfedilmemiş olabilir veya karar verici en iyi seçeneği belirlemek için eksiksiz bilgiye sahip olmayabilir. Çok kriterli değerlendirme problemleri, sürecin başından itibaren bilinen önceden tanımlanmış, sonlu bir seçenek kümesiyle karakterize edilir. Buna karşılık, çok kriterli tasarım problemleri, genellikle matematiksel modelleme yoluyla dinamik olarak çözümler üretmeyi içerir. Burada, olası alternatiflerin sayısı ya sonsuzdur, sayılamaz veya o kadar büyüktür ki bunları açıkça listelemek pratik olmaz. Bu ayrımlara rağmen, her iki tür de Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) şemsiyesi altına girer. ÇKKV süreci genellikle dört temel aşamayı içerir: ilgili kriterleri seçme, alternatifleri tanımlama veya üretme, bu seçenekleri bir araya getirmek ve karşılaştırmak için yöntemler kullanma ve nihayetinde atanan önceliklere veya üstünlük sıralamalarına göre en uygun alternatifi belirleme. (Mrinmoy Majumder, 2015)

Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin tam olarak anlaşılabilmesi için Karar Analizi Yöntemlerine bakılmalıdır. Karar Analizi Yöntemleri, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi genel olarak üç ana gruba ayrılır: Tek Hedefli Karar Verme Yöntemleri, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Karar Destek Sistemleri.

Tek Hedefli Karar Verme, ulaşılması gereken tek bir hedef olduğunda belirsiz sonuçları olan seçenekleri değerlendirmeye odaklanır. Buna karşın, Çok Kriterli Karar Verme birden fazla, genellikle birbiriyle çelişen kritere dayalı olarak seçeneklerin değerlendirilmesini ve sıralanmasını içerir. ÇKKV ayrıca iki ana yaklaşıma ayrılır: Çok Hedefli Karar Verme ve Çok Nitelikli Karar Verme.

Çok Hedefli Karar Verme, tanımlanmış bir dizi kısıtlama dahilinde çelişen hedefleri optimize etmek için matematiksel programlama modellerini kullanır. Amaç, mevcut seçenekler arasından en uygun çözümü belirlemektir. Öte yandan, Çok Nitelikli Karar Verme, alternatifleri birden fazla çelişkili özneliğe göre analiz ederek ve önceliklendirerek alternatifler arasında seçim yapmakla ilgilenir. Çok Nitelikli Karar

Verme kapsamında çeşitli teknikler bulunmaktadır. Çoklu Özellik Fayda Teorisi (MAUT), fayda fonksiyonlarını kullanarak tercihleri ölçmeye yardımcı olur ve yapılandırılmış değerlendirmelere olanak tanır. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karmaşık sorunları önceliklendirme için daha basit bileşenlere ayırarak karar verme sürecine sistematik bir yaklaşım sağlar. Öne çıkan diğer yöntemler arasında bir sıralama çerçevesi kullanan ELECTRE ailesi (I, II, III, IV) ve sıralama/karşılaştırma tekniklerini kullanan PROMETHEE yer almaktadır. Ayrıca, TOPSIS gibi yöntemler ve diğer gelişmiş çok kriterli teknikler, pratik karar verme senaryoları için yaygın olarak kullanılmaktadır. (P. Zhou, 2006)



Şekil 2.1 : Karar Analizi Yöntemlerinin Sınıflandırılması. (P. Zhou, 2006)

2.1 AHP Metodu

Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP), kamu yönetimi, ticaret, sanayi, sağlık ve eğitim gibi birçok alanda, özellikle de ortak karar alma süreçlerinde yaygın olarak tercih edilen bir tekniktir. AHP, belirli bir sonucu zorunlu kılmak yerine, karar vericilerin amaçlarına ve konuya dair kavrayışlarına en uygun seçeneği belirlemelerine yardımcı olur. Bu yöntem, karmaşık problemlerin daha küçük ve yönetilebilir unsurlara ayrılmasını sağlayan sistematik ve mantıklı bir yapı sunar. Bu unsurlar, ayrıntılı bileşenleri genel hedeflerle ilişkilendiren katmanlı bir düzen içinde organize edilir. Karar alma süreci, ana meselenin bağımsız olarak değerlendirilebilecek alt bileşenlere bölünmesiyle başlar. Bu yapı, karar süreciyle ilgili her türlü unsuru kapsayabilir, somut ya da soyut, kesin olarak tanımlanmış ya da belirsiz şekilde ifade edilmiş olabilir.

Hiyerarşi tamamlandıktan sonra, karar vericiler iki ögeyi karşılaştırarak, bunların üst basamaklardaki bileşenler üzerindeki etkilerini değerlendirir. Karşılaştırmalar, mevcut verilere dayanabileceği gibi, bireylerin kendi yorum ve algılarını da içerebilir. AHP'nin temel prensibi hem nesnel bilgiyi hem de öznel değerlendirmeleri kullanarak karar sürecini desteklemektir.

Bu yöntemde yapılan karşılaştırmalar, matematiksel dönüşümler aracılığıyla sayısal ifadelerle çevrilir. Böylece tutarlılık sağlanır ve farklı faktörlerin mantıklı şekilde kıyaslanabilmesi mümkün olur. Her unsur belirli bir ağırlık veya öncelik derecesi alır ve bu da genellikle karşılaştırılması zor olan alternatiflerin değerlendirilmesini kolaylaştırır. Bu yönüyle AHP, diğer karar verme yaklaşımlarından ayrılır.

Son aşamada, her alternatif için belirlenen sayısal öncelikler hesaplanarak, seçeneklerin hedefe ulaşma olasılıkları karşılaştırılır ve en uygun tercihin belirlenmesini sağlayan net bir sıralama elde edilir.

Psikoloji ve matematik disiplinlerinden beslenen Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHP), karmaşık karar süreçlerini incelemek ve değerlendirmek için geliştirilmiş sistematik bir metottur. 1970'lerde Thomas L. Saaty tarafından ortaya konan bu yöntem, zaman içinde kapsamlı araştırmalarla geliştirilmiş ve optimize edilmiştir.

AHP uygulaması, bir sorunun bileşenlerini belirli bir düzen içinde sıralayarak hiyerarşik bir model oluşturmakla başlar. Bu yapı sayesinde karar vericiler, konuyu genel çerçeveden ayrıntılı unsurlara doğru adım adım analiz eder. Böylece, yalnızca ana problem değil, onun arka planı ve karar sürecine katılan bireylerin farklı bakış açıları da daha iyi anlaşılır. Hiyerarşilerde, en üst sıradaki unsur hariç tüm bileşenler, bir veya birden fazla üst düzey ögeye bağlıdır. Kavramsal olarak anlaşılması kolay olan hiyerarşi yapısı, aynı zamanda matematiksel olarak da tanımlanabilir. Genellikle piramit şeklinde temsil edilse de hiyerarşik yapılar yalnızca en tepede tek bir unsur barındırmak zorundadır; bunun dışında belirli bir geometrik forma bağlı kalmaz.

İnsan topluluklarında hiyerarşik düzenler, yönetim, iletişim ve sorumluluk paylaşımında sıkça kullanılır. Soyut kavramları analiz ederken de hiyerarşik modeller devreye girer. Karmaşık konular, daha küçük ve anlamlı bileşenlere ayrılarak ele alınır. Her aşamada belirli bir unsur incelenirken diğer detaylar geçici olarak geri planda bırakılır. Bu yöntem, karar vericilerin tüm süreç boyunca kademeli olarak daha geniş bir perspektif kazanmalarını sağlar.

Bu yapısal yöntem uygulandıkça, karar süreci giderek daha netleşir ve analiz edilen mesele kapsamlı bir biçimde anlaşılır. Sonuç olarak, bilinçli ve sağlam temellere dayanan kararlar almak mümkün hale gelir (Majumder, 2015).

2.2 PROMETHEE Metodu

Karar verme sürecinin zorluk seviyesi, değerlendirilen kriterlerin ve alternatiflerin sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bununla birlikte, bazı sistematik yaklaşımlar, karar alıcılara en uygun seçenekleri belirleme konusunda rehberlik eder. Çok Kriterli Karar Destek (MCDA) yöntemleri, farklı analiz teknikleriyle karmaşık problemleri çözme yetenekleri sayesinde pek çok sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Alternatiflerin, karar vericilerin önceliklerine göre sıralanmasına yardımcı olan en bilinen MCDA yöntemleri arasında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), İdeal Çözüme Yakınlık Tabanlı Tercih Sıralama Yöntemi (TOPSIS) ve Tercih Sıralama Organizasyonu ve Zenginleştirme Değerlendirme Metodu (PROMETHEE) bulunmaktadır.

1982 yılında J.P. Brans tarafından geliştirilen PROMETHEE yöntemi, ilk kez R. Nadeau ve M. Landry tarafından Kanada'nın Québec kentindeki Université Laval'da düzenlenen bir konferansta tanıtılmıştır. Bu süreçte, PROMETHEE I (kısmi sıralama) ve PROMETHEE II (tam sıralama) olmak üzere iki farklı model sunulmuştur. Aynı dönemde, G. Davignon bu yöntemin sağlık alanındaki potansiyel kullanımını incelemiştir. İlerleyen yıllarda, J.P. Brans ve B. Mareschal, karar sürecini daha kapsamlı hale getirmek adına PROMETHEE III'ü (aralık temelli sıralama) ve PROMETHEE IV'ü (sürekli değişkenlerle sıralama) geliştirmiştir.

1990'ların başında Brans ve Mareschal, karar alma süreçlerini insan zihninin çalışma prensiplerine dayandıran PROMETHEE VI modelini ve belirli kısıtlarla çok kriterli karar analizine (MCDA) uyarlanan PROMETHEE V yaklaşımını ortaya koymuştur. PROMETHEE, zaman içinde finans, sanayi alanında bölgesel planlama, iş gücü yönetimi, yatırım planlaması, su kaynakları yönetimi, sağlık, kimya, turizm, etik karar alma süreçleri ve dinamik yönetim gibi geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmuştur. Bu yöntemin başarısı hem sağlam matematiksel altyapısından hem de kolay uygulanabilir olmasından kaynaklanmaktadır.

Çok kriterli karar verme (MCDM) süreçlerine yönelik pek çok yöntem geliştirilmiş olup, her biri karar matrisine ek olarak farklı türde veriler talep etmektedir. PROMETHEE'nin en büyük avantajlarından biri, karar vericilere ve analistlere süreç boyunca anlaşılır ve yorumlanabilir ek bilgiler sunarak değerlendirme sürecini kolaylaştırmasıdır. Bu tür karar yöntemlerinin temel amacı, seçenekler arasındaki ilişkileri netleştirmek ve karşılaştırılması zor alternatifleri en aza indirerek daha tutarlı bir sıralama elde etmektir. Bir fayda fonksiyonu oluşturarak, çok kriterli bir değerlendirme süreci, tek kriterli bir optimizasyon problemine indirgenebilir. PROMETHEE, alternatiflerin önceliklendirilmesini sağlayan üstünlük bazlı analiz yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu yöntemin uygulanması için gereken ek veriler, şu iki temel başlık altında toplanabilir:

- Her bir kriterle ilgili spesifik bilgiler
- Kriterler arasındaki etkileşimler ve öncelik ilişkileri (Greco, 2016).

MCDA yöntemlerinin her biri farklı avantajlar sunduğundan, herhangi birinin diğerinden üstün olduğunu söylemek mümkün değildir. Kullanılacak yöntemin seçimi, tamamen çözülecek problemin doğasına bağlıdır. Karşılaştırmalı sıralama teknikleri arasında yer alan PROMETHEE yöntemi, üç temel prensibe dayanır: farklı tercih fonksiyonlarıyla önceliklendirme yapısını geliştirmek, alternatifler arasındaki üstünlük ilişkilerini güçlendirmek ve hem kısmi hem de tam sıralama sistemleriyle karar sürecine destek sağlamak.

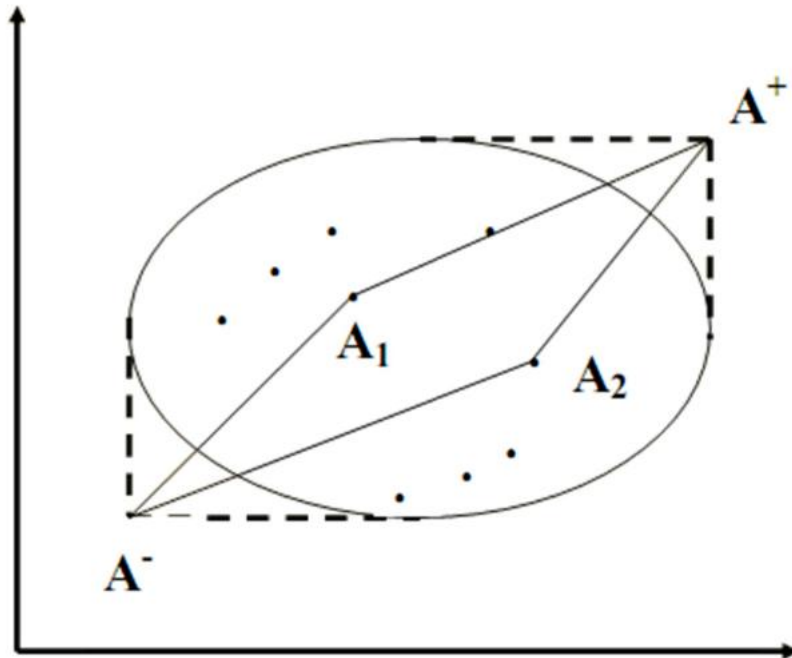
PROMETHEE'nin en büyük avantajlarından biri, ölçek farklarını ortadan kaldırarak kriterlerin etkisini daha dengeli hale getiren altı farklı tercih fonksiyonunun kullanılabilmesidir. Sürecin son aşaması olan kapsamlı net akış hesaplamasında alternatifler genel olarak değerlendirilir. Karar vericiler, kriterler için hangi tercih fonksiyonlarının kullanılacağını belirleyebilir ve eşik değerleri kendi bakış açılarına göre özelleştirebilir. Karar verme, az sayıda unsurla işlem yapıldığında hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilen bir süreçtir. Ancak, seçeneklerin ve ölçütlerin artan karmaşıklığıyla birlikte, doğru çözümü bulmak için belirli bir sistemin oluşturulması gereklidir. PROMETHEE, karmaşık problemlere etkin bir şekilde yaklaşabilmesi, belirgin metodolojik avantajları ve anlaşılması kolay temel verilere dayanan basit yapısı sayesinde birçok sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntemin öne çıkan avantajlarından biri, kriterler arasındaki ölçek farklılıklarından kaynaklanan

uyumsuzlukları ortadan kaldırabilmesi ve alternatiflerin sıralanmasını sağlayan matematiksel işlemler için pratik bir araç sunmasıdır (Oubahman, 2021).

2.3 TOPSIS Metodu

TOPSIS, İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sıra Tercihi Tekniği'nin kısaltması olup, Hwang ve Yoon tarafından 1981'de tanıtılan bir karar alma yöntemidir. Bu yaklaşım, birden fazla yanıtı tek bir performans metriğine dönüştürerek çok kriterli değerlendirmeyi basitleştirir. TOPSIS'in ardındaki temel kavram, ideal alternatifin pozitif ideal çözüme mümkün olduğunca yakın, negatif ideal çözümden ise mümkün olduğunca uzak olacak şekilde konumlandırılarak belirlenmesidir.

Pozitif ideal çözüm tüm niteliklerin en üst düzeye çıkarıldığı optimum bir çözümü temsil ederken, negatif ideal çözüm tüm niteliklerin en aza indirildiği en kötü durum senaryosunu yansıtır. TOPSIS, bu mesafeleri dengeleyerek hem ideal sonuca en yakın hem de istenmeyen sonuca en uzak çözümü belirler. Yöntemin bu temel ilkesini sembolize eden görsel Şekil 2.2'de de gösterilmektedir. Bu çerçevede, kriterler genelindeki uzlaşmaları kabul eden ve bir alandaki zayıflıkların başka bir alandaki güçlü yönlerle telafi edilmesine olanak tanıyan karar alma sürecini mümkün kılar.



Şekil 2.2 : TOPSIS Yöntemi Temel İlkesi (A^+ :İdeal Nokta, A^- :Negatif İdeal Nokta). (Balioti, 2018)

TOPSIS algoritması ve mevcut alternatifler içerisinde en uygun seçeneği belirleme süreci aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır. (Shukla, 2017)

- İlk adım, hedefi açıkça tanımlamayı ve ilgili değerlendirme kriterlerini belirlemeyi içerir. Bu aşama, kriterlerle ilgili tüm mevcut bilgileri derleyen bir matrisin oluşturulmasıyla sonuçlanır. Karar tablosu olarak adlandırılan bu matris, her satırı belirli bir alternatife ve her sütunu karşılık gelen bir kritere atar. Sonuç olarak, karar tablosundaki her bir a_{ij} elemanı, i^{th} alternatifi için j^{th} kriteri bakımından orijinal birimlerinde ifade edilen ham (normalleştirilmemiş) değerini temsil eder.
- Bir sonraki adım, şu şekilde ifade edilebilen normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulmasını içerir:

$$R_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2.1)$$

Bu adımda $i=1,2,\dots,m$ alternatiflerine karşılık gelirken $j=1,2,\dots,n$ kriterlerini temsil eder. a_{ij} değeri, j kriteri altında i alternatifinin ölçülen performansını gösterirken, R_{ij} bu değer normalleştirilmiş versiyonunu ifade eder.

- Bu adımdan sonra her kriterin amaca göre önemi belirlenmelidir. Bu her kriter için ağırlık; w_j ($j=1,2,\dots,n$) atamayı içerir. Toplam ağırlığın $\sum w_j = 1$ olmasını sağlayacak şekilde dağılım yapılarak göreceli öncelik belirlenmeye çalışılır.
- Öncelik dağılımı yapıldıktan sonra normalleştirilmiş karar matrisi R_{ij} içerisindeki öğeler onlara karşılık gelen w_j ağırlığı ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matrisin (V_{ij}) eldesi sağlanır. Bu işlemin matematiksel gösterimi şu şekilde ifade edilebilir; $V_{ij} = R_{ij} \times w_j$
- Ağırlıklandırılmış normalize matrisin eldesinden sonra İdeal (V_j^+) ve Negatif İdeal (V_j^-) Çözüm Değerleri elde edilir. İdeal çözüm değeri farklı alternatifler arasında ele alınan kriterler için en iyi değeri ifade eder. Öte yandan negatif ideal çözüm değeri ise tüm alternatifler içerisinde en kötü durumunun değerini göstermektedir.

- İdeal ve negatif ideal çözüm değerlerinin elde edilmesi ile her alternatifin ideal çözüm ve negatif ideal çözüm arasındaki mesafesi hesaplanır.

İdeal çözüm değerine olan uzaklık için S_i^+ değeri şu şekilde hesaplanır;

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (2.2)$$

Negatif ideal çözüm değerine olan uzaklık için S_i^- değeri şu şekilde hesaplanır;

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (2.3)$$

- Son adım olarak bir alternatifin ideal çözüme olan göreceli yakınlığı (P_i) hesaplanmalıdır.

$$P_i = \frac{S_i^-}{(S_i^- + S_i^+)} \quad (2.4)$$

Bu adımda alternatifler P_i değerine göre azalan sırada sıralanır. Bu sıralama, ideal çözüme yakınlıklarına göre hangi alternatifin en çok tercih edildiğini ve hangisinin en az tercih edildiğini gösterir.

3. İSTANBUL'DA SU TEMİNİ

Türkiye'nin en kalabalık şehri olan İstanbul'da, su temini hem yerüstü hem de yeraltı su kaynaklarından sağlanmaktadır. Nüfus artışı ve iklim değişikliği gibi faktörlerin etkisiyle, bu kaynakların önemi giderek artmaktadır. İstanbul'un su ihtiyacının büyük bir kısmı (%98) yerüstü kaynaklarından karşılanırken, bu kaynakların sadece %25-35'lik kısmı Avrupa yakasında yer almaktadır. İstanbul'a su sağlayan tesisler, Marmara ve Batı Karadeniz Havzası'nda konumlanmıştır ve bu durum Şekil 1.1'de detaylı şekilde gösterilmektedir.

Marmara Havzası, Avrupa ve Anadolu Alt Havza'larına ayrılmıştır. Bu havzalarda yer alan başlıca su kaynak tesisleri şunlardır:

- Marmara (Anadolu) Alt Havzası: Ömerli, Darlık, Yeşilçay, Yeşilvadi, Elmalı
- Marmara (Avrupa) Alt Havzası: Alibeyköy, Sazlıdere, Büyükçekmece, Terkos, Istranca

Istranca Sistemi kapsamında ise Kazandere, Pabuçdere, Sultanbahçedere, Düzdere, Elmalıdere, Büyükdere ve Kuzuludere tesisleri bulunmaktadır. Batı Karadeniz Havzası'nda ise Melen Alt Havzası, İstanbul'a su sağlayan diğer önemli bir kaynaktır (İSKİ, 2021).

İstanbul'da su temini, bütünsel bir sistem ile yürütülmekte olup bu sistemde barajlar, regülatörler, pompalar, iletim hatları ve arıtma tesisleri bir arada çalışmaktadır. Barajlar ve regülatörler arasında su transferi yapılabilmekte, ayrıca Asya Yakası'nda arıtılan su, Avrupa Yakası'nda da kullanılabilir. Arıtma tesisleri, su ihtiyacını bir veya birden fazla baraj ve regülatörden hem doğrudan hem de dolaylı yollarla karşılayabilmektedir. Su kaynaklardan alındıktan sonra, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne bağlı içme suyu arıtma tesislerinde işlenmekte ve arıtılan su, hizmet verilen yerleşim alanlarına güvenli bir şekilde ulaştırılmaktadır.



Şekil 3.1 : İçme Suyu Havza Koruma Kuşakları.

İstanbul’da içme suyu arıtma işlemleri, 20 Ekim 2016 tarihli ve 29863 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik” ile 6 Temmuz 2019 tarihli ve 30823 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan “İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Arıtılması Hakkında Yönetmelik” hükümlerine uygun olarak gerçekleştirilmekte ve belirlenen kalite standartlarını sağlamaktadır.

Şehirde toplam 24 adet içme suyu arıtma tesisi bulunmaktadır ve bu tesislerin yıllık toplam arıtma kapasitesi yaklaşık 4.929.720 milyon m³ olarak hesaplanmıştır (İSKİ, 2023).

3.1 İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi

İstanbul’un Avrupa Yakası’nda yer alan İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi, bölgenin önemli bir kısmına içme suyu temin eden kritik tesislerden biridir. Başakşehir ilçesi sınırları içinde yer alan ve Şekil 1.2’de gösterilen bu tesiste, Fatih Sultan Mehmet Han ve II. Bayezid Han İçme Suyu Arıtma Tesisleri bulunmaktadır. Her iki tesis de aynı tasarıma sahip olup, arıtma işlemleri için simetrik olarak inşa edilmiştir ve günlük 400.000 m³ su arıtma kapasitesine sahiptir.

Tesise su sağlayan başlıca kaynaklar arasında Terkos Barajı, Istranca Sistemi ve Sazlıdere Barajı bulunmaktadır. Istranca Sistemi’ne bağlı olan Pabuçdere Barajı, Terkos Gölü’ne su taşımakta ve bu sistem aracılığıyla Terkos Gölü’nden İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi’ne dolaylı olarak su iletilmektedir.



Şekil 3.2 : İkitelli İçme Suyu Tesisleri Uydu Görüntüsü.

Avrupa Yakası'nın en eski ve stratejik su kaynaklarından biri olan Terkos Barajı hem kendi havzasındaki suyu hem de Istranca Sistemi üzerinden gelen suyu düzenleyerek tesisin ihtiyaçlarını karşılamaktadır. Diğer bir kaynak olan, Küçükçekmece Gölü yakınlarında bulunan Sazlıdere Barajı da kendi havzasından topladığı suyu regüle ederek tesise iletmektedir. Bu üç kaynaktan alınan su, arıtma tesisinde gerekli işlemlerden geçirildikten sonra şehirdeki kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Şekil 1.3'te görüldüğü üzere, tesis Avcılar, Bağcılar, Gaziosmanpaşa, Güngören, Küçükçekmece, Başakşehir ve Esenyurt ilçelerine su temin etmekte, gerek duyulduğunda diğer ilçelere de su sağlayabilmektedir (İSKİ, 2021).

Toplamda 14 ana ünitelerden oluşan İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi, suyun ham giriş yapısından itibaren şu işlemlerden geçmesini sağlamaktadır:

- Havalandırma Ünitesi
- İnce Izgara
- Ön Ozonlama
- Hidrolik Karışımı Sağlayan Koagülasyon ve Flokülasyon Ünitesi
- Yukarı Akışlı Çamur Battaniyeli Durultucu
- Ara Dezenfeksiyon

- Hızlı Kum Filtresi
- Son Dezenfeksiyon
- Temiz Su Deposu
- Çamur Arıtma Üniteleri



Şekil 3.3 : Tesisin Beslediği İlçeler.

Yoğun nüfuslu bir havzaya su sağlayan bu tesisin, suyun daha verimli ve entegre bir şekilde arıtılabilmesi amacıyla mevcut durumuna yönelik bazı senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryolar, TOPSIS yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve dört ana başlık altında ele alınmıştır:

1. Koagülasyon ve Flokülasyon
2. Filtrasyon
3. Dezenfeksiyon
4. Çamur Yönetimi

Her bir kategori için farklı senaryolar değerlendirilmiş, sıralanmış ve etkili bir arıtma süreci için hangi seçeneklerin daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Detaylar, Uygulama bölümünde ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmalar, sürdürülebilir ve etkin bir arıtma süreci hedefiyle planlanmıştır.

4. UYGULAMA

Bu çalışmada Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri içerisinde TOPSIS metodu kullanılarak Koagülasyon-Flokülasyon, Filtrasyon, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi başlıkları için farklı senaryolar değerlendirilmiş, sıralama yapılmış ve etkili bir arıtma süreci için hangi senaryonun daha uygun olacağı tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.1 Koagülasyon-Flokülasyon Senaryosu

İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleşen koagülasyon-flokülasyon sürecinde organik madde, askıda katı madde ve kolloidal parçacıkların giderimi için Alüm kullanımının gerçekleştirildiği belirtilmektedir (İSKİ, 2023). Mevcut süreç; Alüm, Demir (III) Klorür, PACl ve Kitosan kullanılarak gerçekleştirilecek koagülasyon-flokülasyon yöntemi ile karşılaştırılarak en uygun senaryo tespit edilmeye çalışılmıştır.

TOPSIS metodunun kullanılabilmesi için hedef tanımlaması yapıldıktan sonra değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Karşılaştırma yapılacak koagülant türleri için 6 farklı kriter başlığı belirlenmiş olup bu kriterler ışığında 4 farklı koagülant türü için karşılaştırma yapılmıştır.

Karşılaştırma yapılacak kriterler “Çevresel Etki, İşletme Kolaylığı, Arıtma Verimi, Doz-Çamur İlişkisi, Doz-Maliyet İlişkisi, pH” olacak şekilde belirlenerek karşılaştırma yapılacak koagülant türleri için gerekli literatür araştırması yapılarak Çizelge 4.1’de de görüleceği üzere karar matrisi oluşturulmuştur.

Bu karar matrisi oluşturulurken, kriterler fayda ve maliyet yönlü olarak değerlendirilmiş ve 1 ile 10 arasında bir puanlama yapılmıştır. Fayda yönlü kriterlerde daha yüksek puanlar tercih edilirken, maliyet yönlü kriterlerde daha düşük puanlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, işletme kolaylığı ve arıtma verimi, pH gibi kriterler fayda yönlü olup, daha yüksek puanlar bu özelliklerin daha avantajlı olduğunu

göstermektedir. Öte yandan, çevresel etki, doz-çamur ilişkisi ve doz-maliyet ilişkisi kriterleri maliyet yönlü olup, düşük puanlar daha avantajlı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.1: Koagülant Türleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.

Koagülant Türü	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Aritma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
Alüm	4	7	6	6	10	6
Demir (III) Klorür	8	7	8	6	8	8
PACl	6	7	6	8	6	8
Kitosan	10	9	8	10	2	8

4.1.1 Çevresel etki kriteri hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken çevresel etkiler kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların doğrudan çevresel etkileri, kimyasal maddenin üretimi ve taşınması sırasında oluşan karbon ayak izi, doğaya salınan yan ürünler, arıtma sürecinden sonra kalan çamur miktarı ve bu çamurun bertaraf edilmesi sırasında oluşan potansiyel çevresel zararlar değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, sucul ekosistemlerde oluşturabilecekleri toksik etkiler, suya karışan metal iyonları veya diğer kalıntıların çevreye salınım riski, koagülant kullanımının suya bırakabileceği artık kimyasallar ve bu kimyasalların insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri kritik bir değerlendirme konusudur. Ayrıca, koagülantların doğada biyolojik olarak parçalanabilirliği, yan ürünlerinin toksikliği ve uygulama sırasında çevresel sürdürülebilirliğe uygunluk düzeyleri gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tümü hem kısa vadeli hem de uzun vadeli çevresel etkilerin en aza indirilmesi açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir koagülantın çevresel etkilerine yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.1.1 Alüm

İnsan faaliyetleri ve artan nüfus, büyük miktarlarda doğal suyun tarımsal, endüstriyel ve diğer alanlarda kullanımına yol açarak çevre kirliliğini artırmaktadır. Bu da büyük hacimlerde kirli atık suyun oluşmasına neden olmaktadır. Zaman içinde, su arıtımı için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler gibi çeşitli teknikler başarıyla uygulanmış, ancak kimyasal işlemlerin yüksek maliyetleri, aşırı kimyasal kullanımı nedeniyle ortaya çıkan ikinci dereceden kirlilik ve sanayi ile evsel atık su miktarlarının artması,

araştırmacıları alternatif arıtma yöntemleri geliştirmeye teşvik etmiştir. Bu süreç, alüminyum sülfat ve ferrik klorür gibi koagülantların yirminci yüzyılda atık su arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla önemli bir evrim geçirmiştir (Al-Sahari, 2020).

Alüminyum içeren bileşikler, örneğin alüminyum sülfat ve polialüminyum klorür (PACl), pıhtılaşma ve flokülasyon süreçlerinde askıda bulunan parçacıkların yüzey yükünü değiştirebilir. Bu değişim, parçacıkların daha büyük floklar halinde birleşmesini sağlayarak, suyun çökmesine yardımcı olur. Alüminyum bazlı koagülantlar, pıhtılaşmayı geliştirebilse de Alzheimer hastalığı gibi sağlık problemleriyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, içme suyundaki alüminyum seviyelerinin zararlı etkilerini önlemek için yasal düzenlemeler bulunmaktadır (Mohammadreza, 2019).

4.1.1.2 Demir (III) Klorür

Geleneksel su arıtma süreçlerinde yaygın olarak tercih edilen kimyasal pıhtılaştırıcılar, çevre ve halk sağlığı üzerinde uzun vadeli olumsuz etkiler yaratabilecek çeşitli dezavantajlar taşımaktadır. Kimyasal pıhtılaştırıcıların çevresel etkileri daha belirgin ve kalıcıdır. Bu pıhtılaştırıcılar, toksik çamur ve kimyasal kalıntıların oluşumuna yol açarak çevreye zarar verir ve uzun süre kimyasal kalıntılar içeren suyun tüketilmesi, sağlık sorunlarına, özellikle nörodejeneratif hastalıklara yol açabilir. Son yıllarda, araştırmacılar, bu kimyasal pıhtılaştırıcılara alternatif olarak doğal pıhtılaştırıcıların daha güvenli ve çevre dostu seçenekler olarak kullanımına artan bir ilgi göstermektedir (Bahrodin, 2021).

Demir (III) klorür gibi demir bazlı koagülantlar, safsızlıklar içerdiği için, yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında içme ve atık su boru hatlarında korozyona yol açarak sağlık ve çevreye zarar verebilir. Ancak, bu safsızlıklar uygun şekilde kontrol edilirse, olumsuz etkiler azaltılabilir, fakat bu da maliyetlerin artmasına yol açabilir (Mohammadreza, 2019).

Koagülasyon ve flokülasyon aşamalarının ardından, oluşan çamur (toplanan floklar), hacmini küçültmek için susuzlaştırılır ve kurutulur, ardından yeniden kullanım veya bertaraf için hazır hale getirilir. Çamur, organik ve inorganik olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Organik çamur genellikle metan üretmek amacıyla kompostlanır, sindirilir ya

da yeniden kullanılır. İnorganik çamur ise koagülasyon sırasında oluşan ve kimyasal özelliklerine göre atılan veya yeniden kullanılan floklardan meydana gelir.

Kimyasal koagülantlar, geleneksel yöntemlere kıyasla ekonomik olması ve farklı türde kirleticileri etkili bir şekilde uzaklaştırması gibi birçok avantaja sahiptir. Kullanımı kolaydır ve çeşitli arıtma sistemleriyle uyumludur. Ancak çevresel etkileri önemli bir endişe kaynağıdır. Yanlış yönetildiğinde, bu maddeler zararlı kimyasalların çevreye salınmasına yol açabilir. Ayrıca, kimyasal koagülantların başarısı, kullanılan miktar, tür ve suyun fiziksel-kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu durumlara rağmen, kimyasal koagülantlar hâlâ yaygın bir tercihtir, ancak çevreye zararlarını azaltmak için dikkatli bir denetim gerektirir (Devanathan, 2024).

4.1.1.3 PACI

Pıhtılaştırma-flokülasyon süreci iki ana aşamadan oluşmaktadır: (1) kolloid parçacıklarının kararsızlaştırılarak daha büyük topluluklar veya floklar oluşturması ve (2) bu büyük flokların çökme yoluyla ayrışması. Uzun yıllardır, alüminyum sülfat ve polialüminyum klorür gibi kimyasal koagülantların kullanımı oldukça yaygındır; ancak bu kimyasalların kullanımı, çevreye zarar veren ve son derece toksik olan çamur oluşumuna sebep olmuştur. Ayrıca, arıtılmış suda kalan kimyasal koagülantların, insan sağlığını etkileyebilecek, özellikle nörolojik rahatsızlıklarla bağlantılı riskler taşıdığı bilinmektedir (Alazaiza, 2022).

Koagülasyon işleminde kullanılan kimyasal koagülantlar tercih açısından ön planda olsa da kullanımları söz konusu olduğunda çevresel etkilerinin azaltılması için iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Örneğin, Alüm dar bir pH aralığında (5,5-6,5) maksimum etkililik gösterirken arıtılmış suda alüminyum kalıntısı bırakabilir. Ferrik klorür düşük maliyetli ve etkili olsa da aşındırıcı ve tehlikeli yapısı nedeniyle sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Polialüminyum klorür ise hidrofobik organik bileşikleri uzaklaştırmakta yetersiz kalabilir. Doğal koagülantlar arasında öne çıkan kitosan ve tohum tozu gibi maddeler, su arıtımında umut vaat eden sonuçlar sunmakta olup yüksek giderim performansları ile çevre dostu çözümler arasında yer almaktadır (Devanathan, 2024).

4.1.1.4 Kitosan

Uzun süre alüminyum kalıntılarına maruz kalmak, bu maddelerin vücutta, özellikle karaciğer, beyin ve kemiklerde birikmesine sebep olabilir. Alüminyumun düşük molekül ağırlıklı türleri, yüksek çözünürlük özellikleri nedeniyle biyolojik zarları geçerek canlı organizmalar üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Ferrik tuzlar ve sentetik polimer bazlı pıhtılaştırıcılar, şap yerine kullanılmak üzere araştırılmıştır. Ancak, bunların yüksek maliyetleri, sınırlı bulunabilirlikleri geniş çapta uygulanmalarını engellemiştir. Kimyasal pıhtılaştırıcıların potansiyel tehlikeleri karşısında, doğal pıhtılaştırıcılara olan ilgi yeniden artmıştır. Bu doğal pıhtılaştırıcılar, bitkiler, mikroorganizmalar, hayvanlar ve tohumlar gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilir. Bunlar arasında kitosan, özellikle su arıtımı için çok umut verici bir madde olarak öne çıkmaktadır. Doğal pıhtılaştırıcılar, organik kirlilik, renk ve diğer kirleticilerin sudan giderilmesindeki etkinlikleri ile birlikte daha düşük maliyetli, çevre dostu ve geniş çapta kullanım için uygun olmaları sebebiyle giderek daha fazla tercih edilmektedir (Al-Sahari, 2020).

Su arıtımında kullanılan kitosan gibi polisakkaritler ve hayvansal kaynaklı pıhtılaştırıcılar ile flokülantlar, en ekonomik ve çevre dostu seçeneklerden bazılarıdır. Hayvansal kaynaklı pıhtılaştırıcılardan biri olan kitosan, kitinin deasetilasyonu ile elde edilen, amin grubu içeren bir polimerdir. Kitin, doğada selülozdan sonra en fazla bulunan ikinci polisakkarit olup, kitosan çeşitli uygulamalarda, özellikle kil süspansiyonlarını çözme, sudan renk ve bulanıklık giderme ve suyun arıtılmasında kullanılır. Sonuç olarak, bitkiler, hayvanlar ve mikroorganizmalardan elde edilen doğal pıhtılaştırıcılar, kimyasal pıhtılaştırıcılara kıyasla daha güvenli ve verimli bir şekilde sudaki kirleticileri ortadan kaldırmakta, aynı zamanda kanser gibi zararlı sağlık etkilerine yol açma riski taşımamaktadır.

Doğal pıhtılaştırıcıların kimyasal alternatiflere göre az zararlıdır ve çevre ile insan sağlığı üzerinde daha düşük risk taşırlar. Ancak, doğal pıhtılaştırıcıların yaygın kullanımını engelleyen bazı dezavantajlar da mevcuttur. Biyolojik temelli malzemeler oldukları için, zamanla bozulmaya ve biyolojik olarak ayrışmaya eğilimlidirler. Ayrıca, hızlı karıştırma sırasında hücrelerin parçalanması organik madde miktarını artırabilir ve bu organik bileşikler, arıtma sürecinin ileri aşamalarında dezenfektanlarla reaksiyona girerek zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna yol açabilir (Alazaiza, 2022).

4.1.2 İşletme kolaylığı hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken işletme kolaylığı kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların uygulama sırasında gerektirdiği operasyonel süreçler, dozlama kolaylığı, ekipman gereksinimleri ve sistemin genel çalışma koşullarına uygunluğu değerlendirilmektedir. Koagülantın saklama koşulları, stabilite durumu, taşınma ve hazırlanma süreçlerinin zorluğu gibi unsurlar işletme kolaylığı açısından önemli faktörlerdir. Buna ek olarak, koagülantın dozaj kontrolünün sağlanabilirliği, uygulama sırasında operatörlerin karşılaşılabileceği zorluklar, kullanılan ekipmanların bakım ve onarım ihtiyacı ile sistemin kesintisiz bir şekilde çalıştırılabilmesi için gereken teknik destek ve eğitim gereksinimleri gibi başlıklar göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, koagülantın sistemin diğer bileşenleriyle uyumlu çalışabilmesi ve dozajlama sonrası oluşan çamur miktarı ile bu çamurun kolay bertaraf edilebilmesi gibi işletme süreçlerini etkileyen faktörler de önem taşır. Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tamamı, arıtma tesisinin verimli ve sorunsuz bir şekilde işletilebilmesi açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir koagülantın işletme kolaylığına yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.2.1 Alüm

Koagülasyon ve flokülasyon sistemlerine sahip arıtma tesislerinin tasarımında, verimliliği etkileyen pek çok faktör dikkate alınmalıdır. Bu faktörler arasında suyun başlangıçtaki bulanıklığı, suyun içeriğindeki kolloidlerin ve askıda katıların miktarları ve özellikleri, pH seviyesi, seçilen işlem türü, karıştırma süreleri, alkalinite, suda bulunan iyonların yoğunluğu, kullanılan kimyasalların türü ve dozajı, sıcaklık gibi etmenler yer alır. Yüzey sularının içme suyu ve diğer kullanım amaçları için arıtılmasında, bu kimyasalların doğru bir şekilde kontrol edilmesi büyük önem taşır. Hem etkinliği artırmak hem de suyun güvenliğini sağlamak için bu parametrelerin dikkatlice ayarlanması gerekir (Berktaş, 1997).

Koagülantlar, kimyasal ve doğal olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Koagülasyon, organik maddelerin, renklerin, kimyasal oksijen ihtiyacının ve askıda katıların giderilmesinde en etkili yöntemlerden biridir. Bu işlemin etkinliği, kullanılan koagülantın türüne bağlı olarak değişir. Koagülasyonun temel prensibi, parçacıkların

dengeleştirilerek büyük kümeler halinde bir araya gelmesi ve ardından askıdaki maddelerin negatif yüklerinin nötralize edilmesiyle sudan ayrılmalarıdır. Alüminyum tuzları ve polialüminyum klorür, yüksek verimlilikleri ve kolay temin edilebilmeleri sayesinde dünya genelinde yaygın olarak tercih edilen kimyasal koagülantlardır. Bununla birlikte, alüminyum bazlı koagülantlar, özellikle düşük pH ya da soğuk koşullarda, arıtılmış suyun içinde yüksek miktarda alüminyum kalıntısı bırakabilir. Son dönemde yapılan araştırmalar, bu kalıntıların çevreye salınmasının güvenliği konusunda endişeleri gündeme getirmiştir (Al-Sahari, 2020).

4.1.2.2 Demir (III) Klorür

Karıştırma hızı, çökme süresi, koagülant miktarı ve türü gibi operasyonel değişkenler, pıhtılaştırma sürecinin etkinliğini önemli ölçüde etkiler. Bu unsurlar, arıtılmış suyun kalitesini belirlemek açısından da kritik öneme sahiptir. En uygun koşulları sağlamak için, yüksek hızlı karıştırma ve doğru koagülant dozajının uyum içinde kullanılması gereklidir. Bunun yanı sıra, koagülantın uzun süreli kullanım için dayanıklılığı, raf ömrü ve kalitesi gibi depolama özellikleri de dikkate alınmalıdır. Pıhtılaşma ve flokleşme işlemleri tamamlandıktan sonra, yerçekimi etkisiyle büyük flokların ayrılması sağlanır ve parçacıkların çökme hızı, bu süreçte belirleyici bir rol oynar (Alazaiza, 2022).

Flok oluşumu, pıhtılaşma aşamasında kirleticiler ile pıhtılaştırıcılar arasındaki karşılıklı etkileşimlere bağlıdır. Bu süreçte kirleticiler, pıhtılaştırıcılarla bağlanarak parçacıkların birleşmesini ve flok adı verilen kümelerin oluşmasını sağlar. Eğer başlangıçtaki bulanıklık seviyesi yüksekse, su içinde daha fazla kirletici molekül bulunur ve bu durum pıhtılaştırıcılarla kirleticiler arasındaki temas sıklığını artırır. Bu yoğun temas, daha büyük ve dayanıklı flokların oluşumuna katkıda bulunarak çökme sürecini hızlandırır. Ancak, düşük başlangıç bulanıklığında, kirletici yoğunluğu sınırlı olduğundan, pıhtılaştırıcı ve kirleticiler arasındaki etkileşimler azalır. Bunun sonucunda flok oluşumu yetersiz kalır ve sedimentasyon hızı düşerek çökme süresi uzar.

Metal tuzu koagülanlarının yaygın kullanımının arkasında, diğer kimyasal koagülanlara kıyasla daha erişilebilir ve uygun maliyetli olmaları yatmaktadır. Metal tuzu koagülanları arasında demir ve alüminyum bazlı türler en yaygın olanlardır. Su ve atık su arıtımında en çok tercih edilen kimyasal pıhtılaştırıcılar ferrik klorür ve

alüminyum sülfattır. Bu koagülanlar suya eklendiğinde, hidroliz reaksiyonu ile kirleticilerin giderilmesini sağlayan bileşikler meydana gelir. Hem demir hem de alüminyum bazlı koagülanlar kirleticileri etkili bir şekilde ortadan kaldırırken, demir bazlı koagülanlar daha ekonomik olup, geniş bir pH aralığında çalışabilir ve aşırı doz kullanımına karşı daha dayanıklıdır. Ancak, demir bazlı koagülanlarla oluşturulan floklar, yoğunlukları ve dayanıklılıklarına rağmen daha hassas olup, mekanik strese daha yatkındır ve kolayca parçalanabilirler (Bahrodin, 2021).

4.1.2.3 PACI

Bir koagülasyon sürecinin en uygun durumunu tespit etmek oldukça önemlidir, çünkü bu durum, koagülantların en verimli şekilde kullanılarak kirleticilerin büyük bir kısmının yok edilmesini sağlar. Uygun koşullar, kullanılan koagülantın türüne bağlı olarak farklılık gösterir. Maksimum verim elde etmek yalnızca işletim maliyetlerini düşürmek ve çamur oluşumunu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda koagülantlarla kirleticiler arasındaki etkileşimleri derinlemesine anlamayı da gerektirir. Koagülasyon sürecini etkileyen başlıca faktörler arasında koagülantın tipi, miktarı, karıştırma teknikleri ve arıtılacak suyun ya da atık suyun özellikleri yer alır. Koagülant miktarının etkisi genellikle üç farklı durumda incelenir: yetersiz dozlama, ideal dozlama ve aşırı dozlama. Yetersiz dozlama, atık sudaki mevcut kirleticilerle yeterince etkileşim kurmak için koagülant miktarının yetersiz olduğu durumlarda meydana gelir ve bu durumda daha fazla koagülant eklenmesi gerekir. Eklenen koagülant miktarının artırılması, kirleticileri bağlamak için daha fazla aktif bölge sağlayarak arıtma verimliliğini artırabilir (Bahrodin, 2021).

Koagülasyon işlemi, genellikle daha sıcak ortam koşullarında daha etkili bir şekilde gerçekleşir ve yüksek sıcaklıkların bu süreçte avantaj sağladığı bilinmektedir. Süreç boyunca, koagülanlar ve kirletici maddeler birbirleriyle reaksiyona girerek kümelenir ve flok oluşumunu sağlar. Yüksek sıcaklıklar, parçacıkların hareket hızını artırarak koagülanlar ile kirleticiler arasındaki çarpışma olasılığını yükseltir ve bu da daha büyük ve dayanıklı flokların oluşumunu destekler. Ancak, düşük sıcaklıklardaki suyun özellikleri koagülasyon mekanizmasını olumsuz etkiler. Soğuk suyun daha viskoz bir yapıya sahip olması, koagülanların çözünürlüğünü azaltır ve parçacıkların birleşmesi için gereken kinetik enerjiyi kısıtlar. Bu durum, soğuk şartlarda daha fazla koagülan kullanımı ve daha uzun flokülasyon sürelerini zorunlu hale getirir. Bu tür ayarlamalar,

başlangıçta ekonomik olarak görülen bir işlem maliyetini artırarak daha pahalı bir sürece dönüşmesine neden olur (Bahrodin, 2021). Polialüminyum klorür (PACl), yaygın tercih edilen koagülanlardan biridir ve birçok avantaj sağlar. Bu avantajlar arasında düşük alkalinite tüketimi, soğuk hava koşullarında etkili çalışma, işlem sonrası suda düşük seviyede kalan alüminyum ve klorür nedeniyle daha az çamur oluşumu ve geniş bir pH aralığında etkinlik bulunur. Ayrıca, PACl'nin diğer koagülanlara kıyasla daha düşük miktarlarda kullanılabilmesi, maliyet açısından büyük bir avantaj sunar (Shirafkan, 2016).

4.1.2.4 Kitosan

Kitin, deniz ürünlerinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan düşük maliyetli bir yan ürün olarak, genellikle deniz kabuklularının dış iskeletinden elde edilir. Kitosan, kitinin kısmi deasetillenmesiyle elde edilen bir türevidir ve deasetillenme seviyesi ile molekül yapısıyla tanınır. Doğaya zarar vermeyen bir madde olan kitosan, biyolojik olarak parçalanabilen, canlı dokularla uyumlu ve zararsız bir amino-polisakkarittir. Fiziksel ve kimyasal nitelikleriyle, sağlık, ilaç, gıda, tarım, kozmetik, biyoteknoloji, ambalaj, tekstil, kâğıt, kataliz ve su arıtımı gibi pek çok alanda kullanılabilir. Asidik ortamlarda katyonik özellik göstermesi ve polielektrolit olarak çözünmesi, onu diğer doğal polimerlerden ayıran temel özelliğidir (Lichtfouse, 2020).

Doğal pıhtılaştırıcıların kullanımları kolaydır ve yüksek uzmanlık gerektirmez, çünkü ciddi sağlık veya çevre tehditleri oluşturmazlar (Alazaiza, 2022).

Geleneksel koagülanlar, yaygın olarak kullanılan ve uygulaması uzmanlık gerektiren kimyasal çözümlerdir. Buna karşın, biyo-koagülanlar halen deneysel aşamada ve genellikle laboratuvar ölçeğinde geliştirilmektedir; bu da sahada sınırlı uygulamalara ve uzman personel eksikliğine neden olmaktadır. Bununla birlikte, biyo-koagülanlar, kimyasal alternatiflere kıyasla daha az olumsuz etkiye sahiptir ve genelde daha az teknik bilgi ile kullanılabilir (Nouj, 2024).

Çalışmada, karar matrisinin oluşturulabilmesi için Çizelge 4.2’de belirtilen puanlama esas alınmış ve bu doğrultuda pH ayarı 3 üzerinden, Kalifiye Eleman 4 üzerinden, Temin ise 3 üzerinden karar verici tarafından puanlanarak karar matrisi düzenlenmiştir.

Çizelge 4.2: İşletme Kolaylığı Kriteri İçin Dikkat Edilen Puanlama.

Koagülant	pH Ayarı	Kalifiye Eleman	Temin
Alüm	2	2	3
Demir (III) Klorür	3	2	3
PACl	2	2	3
Kitosan	3	4	2

4.1.3 Arıtma verimi hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken arıtma verimi kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların suyun kalitesini iyileştirme kapasitesi, bulanıklık giderimi, askıda katı madde azaltımı ve çözünmüş organik maddelerin uzaklaştırılması üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir. Koagülantın su içerisindeki kirleticilerle etkileşimi, reaksiyon hızları ve oluşan flokların çökme verimliliği gibi unsurlar arıtma verimi açısından önemli faktörlerdir. Buna ek olarak, koagülantın farklı su karakteristiklerinde (pH, sıcaklık, sertlik gibi) etkinliği, düşük dozajlarda yüksek verim sağlama kapasitesi ve sudaki hedef kirleticilerin giderimi üzerindeki performansı göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, koagülantın kullanımının son arıtma ürününe (örneğin, içme suyu) olumsuz bir etki yapmaması, oluşan çamur miktarını ve bileşimini kontrol edebilme kapasitesi gibi faktörler de arıtma verimi açısından kritik öneme sahiptir. Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tamamı, arıtma tesisinin nihai su kalitesi hedeflerini karşılayabilmesi açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir koagülantın arıtma verimine yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.3.1 Alüm

Su arıtımındaki önemli etkenlerden biri suyun başlangıçtaki bulanıklık derecesidir. Bulanıklık, suyun içinde askıda bulunan toprak, organik materyaller, mikroorganizmalar, algler, boyalar ve diğer katı maddelerden kaynaklanır ve suyun estetik açıdan hoş olmayan bir görünüme sahip olmasına neden olur. Yüksek bulanıklık seviyeleri, su içinde daha fazla kirletici molekülün bulunduğunu ve bu moleküllerin pıhtılaştırıcı ile çarpışma olasılığının arttığını gösterir. Bu durum, daha büyük ve yoğun flokların oluşmasına ve bu flokların hızlı bir şekilde çökmesine yol açar. Buna karşın, düşük bulanıklık seviyelerinde çarpışma ihtimali azalır, bu da daha

küçük ve zayıf flokların daha yavaş çökmesine neden olur. Ayrıca, pıhtılaşma sürecinde karıştırma işleminin süresi ve hızı da büyük önem taşır. Pıhtılaştırıcının su içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve askıda kalan parçacıkların kararsız hale getirilmesi için hızlı karıştırma işlemi yapılmalıdır. Bunun ardından, daha yavaş bir karıştırma işlemi uygulanarak parçacıkların birbiriyle çarpışması sağlanır ve daha büyük floklar oluşur. Bu nedenle, karıştırma süresinin ve hızının dikkatle ayarlanması, pıhtılaşma işleminin genel verimliliğini belirleyen temel faktörlerden biridir (Alazaiza, 2022).

Alüminyum sülfat kullanılarak yapılan pıhtılaşma işlemlerinde, çözünmüş organik karbon (DOC) gideriminin %59'a kadar çıktığı, ancak bunun yalnızca yüksek dozajlar ve alüminyum kalıntılarının yüksek olduğu belirli koşullar altında gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Pivokonsky, 2024).

4.1.3.2 Demir (III) Klorür

Koagülasyon ve flokülasyon süreçleri, su ve atık su arıtımında temel ve ayrılmaz bir role sahiptir, bu nedenle birbirinden bağımsız düşünülemez. Bu yöntem, suyun içerisinde bulunan organik maddelerin, askıda duran taneciklerin, renk ve bulanıklığın giderilmesindeki yüksek başarısı sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Geleneksel yöntemlerde sıklıkla kullanılan ferrik klorür ve alüminyum sülfat gibi pozitif yüklü kimyasal maddeler, etkili sonuçlar verse de çevreye ve insan sağlığına ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Koagülasyon işlemi, küçük, kararlı veya yavaş çöken parçacıkları, daha büyük ve hızlı çöken agregalara dönüştürme sürecidir. Bu dönüşüm, parçacıkların stabilitesini bozarak birleşmelerini kolaylaştıran bir koagülant eklenmesiyle gerçekleşir. Normal koşullarda kolloidal parçacıklar dengeli bir yapıya sahiptir. Ancak iki değerlikli pozitif yüklü bileşiklerin eklenmesi, bu parçacıkları kararsız hale getirerek nötr birleşimlerin oluşumunu sağlar. Bununla birlikte, fazla miktarda koagülant kullanılması, bu parçacıkları yeniden stabilize ederek kümelenmelerini engelleyebilir. Her koagülant, kolloidal taneciklerle farklı etkileşimlere girer ve her biri kendi özgün mekanizması aracılığıyla destabilizasyon sağlar (Bahrodin, 2021).

En yüksek Demir (III) Klorür dozajları kullanıldığında, koagülasyon işlemi %70'in biraz üzerinde maksimum çözünmüş organik karbon (DOC) giderimi sağladığı tespit edilmiştir (Pivokonsky, 2024).

4.1.3.3 PACI

Koagülasyon-flokülasyon süreci, iki aşamadan oluşarak suda bulunan kararlı parçacıkları, su fazından kolayca ayrılabilen büyük agregalar haline getirerek uzaklaştırır. İlk aşama olan koagülasyon, parçacıkların çözünürlüklerinin azalması veya birbirleriyle bağlanarak itici kuvvetlerin zayıflaması nedeniyle kararsız hale gelmesini sağlar. Koagülasyonun etkinliği, kullanılan koagülantın miktarı ve çözeltinin pH değeri gibi faktörlere bağlı olarak değişen koagülantların çözünürlüğüyle doğrudan ilişkilidir. İkinci aşama olan flokülasyon, çöktürülmüş maddelerle koagüle olmuş parçacıkların birleşerek daha büyük floklar oluşturmasını içerir. (Alavijeh, 2022) Geleneksel su arıtımında ferrik klorür, alüminyum sülfat ve polialüminyum klorür (PACI) kullanımının etkinliğini incelendiğinde PACI özellikle yüksek bulanıklık seviyelerinde etkili olduğunu tespit edilmiştir (Mohammadreza, 2019).

PACI kullanılarak yapılan koagülasyon deneylerinde, pH 6 seviyesinde en yüksek dozlar, çözünmüş organik karbon (DOC) gideriminde %58'in biraz üzerinde bir başarı sağlamıştır (Pivokonsky, 2024).

4.1.3.4 Kitosan

Kitosan, doğal kökeni, düşük maliyeti ve çevre dostu yapısıyla su arıtımında flokülant olarak büyük bir ilgi görmektedir. Son yıllarda kitosanın biyolojik flokülant olarak kullanımı hızla artmış; bu da kompozit malzemeler, hibrit yapılar ve özel işlenmiş kitosan türleri gibi yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Kullanım alanları arasında çözünmüş hava flotasyonu, mikroalg toplanması, çamur kurutma ve hem su hem de atık su arıtımı bulunmaktadır. Araştırmalar, kitosanın su arıtımında etkili bir biyolojik madde olduğunu ve doğrudan flokülasyon yöntemleriyle çevresel çözümlerde rekabetçi bir seçenek sunduğunu göstermektedir. Kitosan, yük dengeleme, parçacık köprüsü oluşturma ve adsorpsiyon mekanizmaları aracılığıyla su arıtımında koagülasyon, flokülasyon ve çökeltme süreçlerini destekler. Yüksek molekül ağırlığı ve güçlü katyonik yapısı hem koloidal parçacıkları birleştirme hem de çözünmüş kirleticileri giderme kapasitesini artırır. Özellikle ultra ince parçacıkların ve düşük seviyelerdeki çözünmüş kirleticilerin uzaklaştırılmasında oldukça etkilidir. Katyonik amino grupları sayesinde bakteri, virüs ve kil gibi negatif yüklü kolloidlerle kimyasal bağlar kurar; bu etkileşim hem kirleticilerin uzaklaştırılmasını hem de çökelmeyi

kolaylaştırır. Bu süreç, alkalinite seviyesini korurken yüksek kaliteli arıtılmış su elde edilmesini sağlar (Lichtfouse, 2020).

Kitosanın asidik ortamlarda, amin grubunun protonlanması sayesinde katyonik polielektrolit gibi davrandığı bilinir. Bu protonlanma, çözünürlüğü artırır ve negatif yüklü parçacıklar, kolloidler ve organik maddelerle etkileşime girmesini sağlayarak flokülasyon verimliliğini artırır. Ayrıca, organik madde giderimi konusunda kitosan, bulanıklık giderimine kıyasla daha geniş bir optimum dozaj aralığına sahiptir (8-11 mg/L). Çözünmüş organik karbon (DOC) ile UV-254 absorbans oranı sırasıyla %70 ve %75'lik organik madde giderimi olarak ölçülmüştür (Okour, 2019).

Çalışmada, karar matrisinin oluşturulabilmesi için literatür araştırmasında belirtilen bilgiler esas alınmış ve bu doğrultuda Çizelge 4.3'e göre karar verici tarafından karar matrisi düzenlenmiştir.

Çizelge 4.3: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

Arıtma Verimi	Değer
>%70	10
%61-70	8
%51-60	6
%41-50	4
%31-40	2

4.1.4 Doz-çamur ilişkisi hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken doz-çamur ilişkisi kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların farklı dozajlarda oluşturduğu çamur miktarı, oluşan çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bu çamurun bertarafı için gereken işlem zorlukları değerlendirilmektedir. Koagülantın dozajının artırılmasıyla çamur üretimindeki artışın verimlilik üzerindeki etkisi ve çamurun su arıtma sistemlerinde ek yük oluşturup oluşturmadığı gibi unsurlar doz-çamur ilişkisi açısından önemli faktörlerdir. Buna ek olarak, koagülant kullanımının sonucunda oluşan çamurun hacmi, yoğunluğu ve bileşimi, çamur susuzlaştırma süreçlerindeki kolaylık ve bertaraf yöntemlerinin sürdürülebilirliği göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, çamur miktarının azaltılması için düşük dozajla yüksek performans sağlayan koagülantların tercih edilmesi, arıtma tesisinin işletme maliyetlerini ve çevresel etkilerini minimize etmek açısından kritik öneme sahiptir. Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tamamı,

arıtma tesisinin hem işletme verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini karşılayabilmesi açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir koagülantın doz-çamur ilişkisine yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

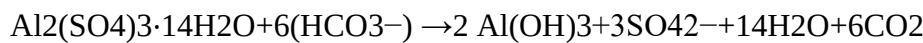
4.1.4.1 Alüm

Pıhtılaşma işleminin başarıya ulaşmasında en önemli faktörlerden biri, uygun pıhtılaştırıcı miktarının doğru bir şekilde belirlenmesidir. Uygun miktarda pıhtılaştırıcı kullanıldığında, su ve atık sudaki kolloidal parçacıklar etkin bir şekilde birleşir ve sistemden uzaklaştırılır. Ancak, gereğinden fazla pıhtılaştırıcı kullanımı ters etki yaratarak, arıtılmış suyun kirlilik oranını artırır, organik yükleri yükseltir ve oluşan çamurun hacmini büyütür. Aksi durumda, yetersiz miktar kullanıldığında parçacıkların istenilen şekilde bir araya gelmesi sağlanamaz ve bu da işlem maliyetlerini artırır (Alazaiza, 2022).

Alüminyum esaslı arıtma işlemlerinin bir yan ürünü olarak oluşan çamur, içerdiği alüminyum nedeniyle çevresel birikim ve bertaraf sorunlarına neden olur. Kesin bir ilişki kanıtlanmamış olsa da Alüm kullanımından kaynaklanan alüminyum kalıntılarının Alzheimer hastalığı ile bağlantısı hakkındaki artan endişeleri dile getirilmektedir. Bu durum, yüzey ve atık sulardaki bulanıklığı gidermek için hem çevresel açıdan dost hem de etkili çözümlere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır (Divakaran, 2001).

İçme suyu arıtımında alüminyum sülfat kullanılması halinde oluşacak çamur miktarı için kimyasal denklemler kullanılarak kütle dengesine dayalı analiz yapılmıştır. Bu analiz, alüminyum sülfatın çökeltiye dönüşen çözünmeyen hidroksit bileşiğinin kütlesi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum Sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), suda çözündüğünde Alüminyum Hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) oluşur (Yonge, 2011).



Bu reaksiyonda:

- 1 mol Alüminyum Sülfat, 2 mol Alüminyum Hidroksit oluşturur.
- Alüminyum Sülfatın mol kütlesi 564 g iken, 2 mol Alüminyum Hidroksitin toplam mol kütlesi 156 g’dır.

Hesaplamalar sonucunda, Alüminyum Sülfatın yaklaşık %27.6'sının çamura dönüştüğü bulunmuştur.

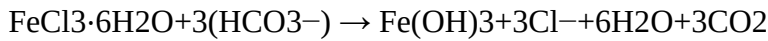
Çalışmada Alüminyum Sülfat dozajı 50,3 mg/L olarak kabul edildiğinden oluşacak çamur miktarının 13,8 mg/L olacağı öngörülmektedir.

4.1.4.2 Demir (III) Klorür

Koagülasyon sırasında, zeta potansiyelinin değişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan faktörlerden biri koagülant miktarıdır. Koagülant, parçacıklarla birleştiğinde çarpışma süreci başlar. Eğer koagülant yeterli miktarda eklenmemişse, parçacıkların çarpışması sınırlı kalır ve kirleticilerin çökmesi uzun sürebilir. Bunun tersi olarak, koagülant fazla eklenirse, bu suyun bulanıklığının artmasına ve sonuç olarak arıtılmış suyun kalitesinin düşmesine neden olabilir. Bu durum, koagülantın kirleticilerden fazla olması nedeniyle ortaya çıkar. Ayrıca, atık suyun bulanıklığı, parçacıkların serbest hareketini engelleyebilir ve çarpışmaların olasılığını azaltabilir. Bu problemlerin önüne geçebilmek için, koagülant dozajı tedavi öncesinde optimize edilmelidir. Bu amaçla, en uygun koagülant miktarını belirlemek için yaygın olarak kavanoz testi kullanılır (Devanathan, 2024).

İçme suyu arıtımında Demir (III) Klorür kullanılması halinde oluşacak çamur miktarı için kimyasal denklemler kullanılarak kütle dengesine dayalı analiz yapılmıştır. Bu analiz, Demir (III) Klorürün çökeltiye dönüşen çözünmeyen hidroksit bileşiğinin kütlesi üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Demir (III) Klorür ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), suda çözündüğünde Demir (III) Hidroksit ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) oluşur. (Yonge, 2011)



Bu reaksiyonda:

- 1 mol Demir (III) Klorür, 1 mol Demir (III) Hidroksit oluşturur.
- Demir (III) Klorürün mol kütlesi 270.2 g iken, Demir (III) Hidroksitin mol kütlesi 106.85 g'dir.

Hesaplamalar sonucunda, Demir (III) Klorür yaklaşık %39.6'sının çamura dönüştüğü bulunmuştur.

Çalışmada Demir (III) Klorür dozajı 32,6 mg/L olarak kabul edildiğinden oluşacak çamur miktarının 12,9 mg/L olacağı öngörülmektedir.

4.1.4.3 PACI

Alüminyum sülfat olarak bilinen alüm, uzun süredir su arıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, yüksek miktarda çamur oluşumu, su arıtımı sonrası alüminyum kalıntıları ve dar bir pH aralığında etkili olması gibi bazı dezavantajlar taşır. Bu sınırlamaların farkına varılması, daha gelişmiş ve etkin alüminyum bazlı polimerlerin, örneğin polialüminyum klorür (PACI), geliştirilmesine yol açmıştır. Bu koagülanlar, daha düşük dozlarla daha yüksek verim elde edilmesini sağlar ve daha geniş pH ve sıcaklık aralıklarında etkili olur. Koagülanların etkinliği ise, dozaj, karıştırma hızı, süre, suyun pH'ı gibi faktörlere bağlı olarak değişir (Nti, 2021).

PACI, diğer koagülanlarla kıyaslandığında, düşük dozajlarda bile yüksek bulanıklık giderim başarısıyla öne çıkmıştır. Yapılan laboratuvar testleri, aynı miktarda kullanıldığında PACI'nin diğer koagülanlardan daha az çamur ürettiğini göstermiştir. Ayrıca, PACI'nin oluşturduğu flokların hızlı bir şekilde çökelme eğiliminde olması, su arıtma sürecinin verimliliğini artıran bir diğer önemli özelliğidir (Shirafkan, 2016).

Son yıllarda, polialüminyum klorür (PACI) gibi polimerize metal koagülanlar yaygın olarak tercih edilmeye başlanmıştır. Araştırmalar, PACI'nin alkalinite ihtiyacını azaltma, daha az çamur üretimi sağlama ve hem kirleticiler hem de organik maddeler için yüksek giderim oranlarına ulaşma gibi avantajlara sahip olduğunu göstermiştir. Etkileyici arıtma verimi, düşük çamur üretimi ve güvenilir performansı sayesinde PACI, daha yüksek bakım maliyetine rağmen, su arıtımında öncelikli bir seçenek haline gelmiştir.

PACI, küçük kolloidal parçacıkları bir araya getirerek daha büyük floklar oluşturmak suretiyle kirleticilerin uzaklaştırılmasını sağlar. Alüminyum bazlı koagülanlar arasında en kolay hidrolize olanlardan biri olarak kabul edilen PACI, uzun moleküler zincirlerden oluşan polihidroksitler üretir. Bu yapılar, çözeltideki elektrik yükünü artırarak daha büyük ve etkili flokların oluşumuna neden olur. Böylece PACI, kirleticileri sudan yüksek bir başarı oranıyla ayırmada son derece etkili bir araç haline gelir (Yavaş, 2021).

4.1.4.4 Kitosan

Kimyasal pıhtılaştırıcıların aksine, doğal pıhtılaştırıcılar işlem sonrası suya metal katmaz ve oldukça az miktarda çamur oluşmasına sebep olur, bu da bertaraf masraflarını ciddi ölçüde düşürür. Doğal pıhtılaştırıcılar, bitki kökenli ve hayvansal kaynaklı olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Hayvansal kökenli pıhtılaştırıcılar, genellikle kitosan, hayvan kemiklerinden elde edilen özütler ve deniz canlılarının dış kabukları gibi malzemelerden üretilir. Yüksek molekül ağırlığına sahip, selüloz benzeri bir biyopolimer olan kitosan, yengeç, karides, ıstakoz gibi kabuklu canlıların kabuklarında ve mantar, böcek, sünger gibi canlıların yapısında bulunan kitinin deasetilasyon sürecinden geçirilmesiyle elde edilir.

Kitosan; kâğıt endüstrisi, deterjan üretimi, tekstil, gıda işleme ve tarım gibi pek çok sektörde su arıtımında doğal bir pıhtılaştırıcı olarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır. En büyük avantajı, asidik ortamda pozitif yükler oluşturarak kolloidlerin negatif yüklerini etkisiz hale getirmesi ve bu sayede parçacıkların kolayca uzaklaştırılmasını sağlamasıdır. Doğal pıhtılaştırıcıların kimyasal alternatiflere göre daha az çamur oluşturdukları için çevre dostudurlar ve çamur bertaraf maliyetlerini düşürürler (Alazaiza, 2022).

Geniş bir sıcaklık aralığında etkili olan kitosan, soğuk suda da iyi sonuçlar verir ve metal bazlı kimyasallara kıyasla çok daha düşük dozlarda kullanılması yeterlidir. Daha az miktarda kullanılması, üretilen çamur miktarını azaltır ve bu çamur biyolojik olarak parçalanabilir özellikte olduğu için çevreye zarar vermez.

Geleneksel koagülantların aksine, kitosan suya alüminyum ya da demir gibi metaller eklemeyi ve zararlı kalıntılar bırakmaz. Tüm bu özellikleriyle, kitosan çevreye duyarlı su arıtımı için benzersiz bir seçenek sunarak sürdürülebilir bir çözüm haline gelir (Lichtfouse, 2020).

Biyo-koagülantların önemli bir avantajı, çamur arıtma maliyetlerini düşürmesidir. Bu ürünlerin kullanımı, arıtılan çamurda bulunan demir ve alüminyum miktarını azaltarak, kimyasal alternatiflere kıyasla daha uygun maliyetli bir arıtma sağlamaktadır. Çamur yönetiminde sağlanan bu tasarruf, su arıtma süreçlerinin genel maliyet yapısını değiştirebilecek bir potansiyele sahiptir (Nouj, 2024). Ayrıca kitosan ile oluşan çamurun, çevreye zarar vermeyen ve biyolojik olarak parçalanabilen

yapısıyla güvenli bir şekilde depolama alanlarında bertaraf edilebileceği tespit edilmiştir (Divakaran, 2001).

4.1.5 Doz-maliyet ilişkisi hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken doz-maliyet ilişkisi kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların farklı dozajlarda sağladığı performans ile bu dozajların maliyeti arasındaki denge değerlendirilmektedir. Koagülantın etkinliğini düşük dozajlarda gösterebilme kapasitesi, aynı miktardaki koagülantla daha fazla suyun arıtılabilmesi ve bu durumun toplam işletme maliyetlerine olan etkisi doz-maliyet ilişkisi açısından önemli faktörlerdir. Buna ek olarak, koagülantın birim fiyatı, gerekli depolama ve taşıma maliyetleri, dozajlama sırasında kullanılan ekipmanların ekonomik sürdürülebilirliği ve arıtma tesisinin toplam bütçesi üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmaktadır. Ayrıca, koagülantın dozajı ile su kalitesindeki iyileşme arasında sağlanan faydanın maliyetle optimize edilmesi, arıtma tesislerinin hem verimli hem de ekonomik şekilde işletilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tamamı, hem maliyet etkinliği hem de arıtma hedeflerine ulaşma açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir koagülantın doz-maliyet ilişkisine yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.5.1 Alüm

Yüzey suyu kaynaklarının işlenmesi, su ihtiyacını karşılamak için çeşitli kimyasalların kullanımını gerektirir. Koagülasyon ve flokülasyon süreçlerinde kullanılacak doğru kimyasal miktarlarının belirlenmesi, hem işletmelerin verimli çalışması hem de halk sağlığı açısından büyük önem taşır. Bu iki yöntem, içme suyu arıtma işlemlerinin temel bileşenleridir. Koagülasyon ve flokülasyon, suda bulunan kolloidal ve askıda kalmış maddelerin daha büyük kümeler halinde bir araya getirilmesi sürecidir. Bu kümeler, sedimentasyonla sudan uzaklaştırılır ve böylece suyun temizlenmesi sağlanır (Berktaş, 1997).

Alüm için kilogram başına 0,14 ABD doları fiyatlandırma yapıldığı tespit edilmiştir (Demirbaş, 2017). Ayrıca DOC giderimi için geniş bir Alüm dozajı aralığında (7.9 mg

L-1 Al'nin üzerinde) %50 veya daha fazla giderim olduğu tespit edilmiştir (Pivokonsky, 2024).

Çalışmada karşılaştırma yapılabilmesi için Alüminyum Sülfat miktarının su arıtma prosesinde kullanılan Alüminyum (Al) dozu üzerinden bulunması amaçlanmıştır.

- Alüminyum Sülfat, bir molekül içerisinde iki alüminyum atomu (Al), üç sülfat grubu (SO₄) ve bu grupları oluşturan elementlerden oluşmaktadır.
- Her bir atomun atom ağırlığı kullanılarak bu bileşiğin toplam kütlesi hesaplanmıştır. Alüminyum Sülfat molekülünün toplam ağırlığı yaklaşık 342 g/mol olarak bulunmuştur.
- Bu bileşikteki toplam Alüminyum miktarı (54 g/mol), molekülün toplam ağırlığına (342 g/mol) bölünmüştür. Bu oran, Alüminyum Sülfatın yaklaşık %15.7'sinin Alüminyum olduğunu göstermektedir.
- Arıtma prosesinde hedeflenen Alüminyum dozu 7.9 mg/L olarak verilmiştir. Ancak Alüminyum Sülfatın yalnızca %15.7'si Alüminyum içerdiğinden, bu dozun sağlanabilmesi için gereken Alüminyum Sülfat miktarı daha yüksek olacaktır. Bunu hesaplamak için, Alüminyum dozu Alüminyum Sülfat içindeki Alüminyum oranından bulunarak 7.9 mg/L Alüminyum sağlamak için 50.3 mg/L Alüminyum Sülfat kullanılması gerektiği bulunmuştur.

Sonuç olarak bir arıtma prosesinde 7.9 mg/L alüminyum sağlamak için suya yaklaşık 50.3 mg/L Alüminyum Sülfat eklenmesi gerektiği öngörülmektedir.

4.1.5.2 Demir (III) Klorür

Piyasa analizleri ve fiyatlandırma, ferrik klorür, PACl ve alüminyum sülfatın sırasıyla toplam maliyetin %75, %15 ve %10'unu oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, koagülantlar aracılığıyla içme suyunun bulanıklık seviyesini istenilen düzeye getirmek, koagülant bazlı su arıtımının maliyetini etkileyen yalnızca bir unsurdur.

Koagülantların fiyatları, özellikle ferrik klorürün, saflık derecesine bağlı olarak büyük ölçüde değişir ve maliyet ile arıtılmış suda kalan koagülant kalıntıları arasındaki denge de önemlidir; çünkü bu kalıntılar altyapının zamanla bozulmasına yol açabilir. Ayrıca, gerekli bulanıklık giderimini sağlamak için ne kadar koagülant kullanılacağı da toplam maliyet hesaplamalarında göz önünde bulundurulmalıdır (Mohammadreza, 2019).

Demir (III) Klorür için kilogram başına 0,22 ABD doları fiyatlandırma yapıldığı tespit edilmiştir (Demirbaş, 2017).

Ferrik klorür, genel sıralamada en etkili pıhtılaştırıcılar arasında yer almaktadır. Yönetimdeki karar vericiler için genellikle en önemli unsurlardan biri maliyettir ve bazı durumlarda bir seçim diğer seçeneklerin etkinliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Ancak bütçe sınırlamaları, daha düşük maliyetli bir alternatifin tercih edilmesine yol açabilir. Tek bir kriteri baz alarak yapılan geleneksel pıhtılaştırıcı seçimi yerine, birden fazla önemli faktörü dikkate alan bir karar verme süreci, daha verimli ve uygun sonuçlar verebilir.

11,2 mg/L (0,2 mmol/L Fe) ve üzeri Demir (III) Klorür dozajları ile uygun pH seviyeleri kombinlendiğinde, en az %50 oranında DOC giderimi elde edildi (Pivokonsky, 2024).

Çalışmada karşılaştırma yapılabilmesi için Demir (III) Klorür miktarının su arıtma prosesinde kullanılan Demir (Fe) dozu üzerinden bulunması amaçlanmıştır.

- Öncelikle Demir (III) Klorür bileşiğinin yapısında bir demir atomu (Fe) ve üç klor atomu (Cl) bulunduğu göz önüne alınmıştır. Her bir atomun atom ağırlığı kullanılarak bu bileşiğin toplam kütlesi hesaplanmıştır. Demir (III) Klorür molekülünün toplam ağırlığı yaklaşık 162.3 g/mol olarak bulunmuştur.
- Demir (III) Klorür bileşiğinin toplam ağırlığının ne kadarının demirden oluştuğu hesaplanmıştır. Demir atomunun kütlesi toplam molekül kütlesine bölünerek, demirin FeCl₃ içindeki oranı yaklaşık %34.3 olarak bulunmuştur. Bu, Demir (III) Klorür bileşiğinin %34.3'ünün demir olduğunu ifade eder.
- Proses için verilen demir dozu 11.2 mg/L olarak belirtilmiştir. Bu dozun sağlanabilmesi için gerekli Demir (III) Klorür miktarı hesaplanmıştır. FeCl₃ içindeki demir oranı göz önüne alınarak, hedeflenen demir dozunu sağlayacak bileşik miktarı bulunmuştur. Hesaplamalar sonucunda, 32.6 mg/L FeCl₃ kullanılması gerektiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, arıtma işleminde 11.2 mg/L demir sağlamak için yaklaşık 32.6 mg/L Demir (III) Klorür kullanılması gerektiği öngörülmektedir.

4.1.5.3 PACl

Su arıtımında kirleticilerin etkili şekilde uzaklaştırılmasında koagülant miktarının önemi tartışmasızdır. Koagülant dozunun, özellikle yük nötralizasyonu ya da adsorpsiyon gibi süreçlerin ön planda olduğu durumlarda, yeterli olması gerekmektedir. Ancak aşırı koagülant kullanımı, istenmeyen şekilde kirleticilerin yeniden stabilize olmasına neden olabilir. Genel olarak, ideal koagülant dozu, sudaki kirleticilerin türü ve yoğunluğuna, ayrıca arıtılan suyun genel yapısına bağlı olarak belirlenir.

Koagülasyon optimizasyonu üzerine yapılan araştırmalara göre, koagülant dozajının artırılması genellikle daha yüksek bir çözünmüş organik karbon (DOC) giderim oranı ile sonuçlanır. Bir diğer kritik faktör, koagülantın (örneğin Al veya Fe) kalıntı konsantrasyonudur. Koagülant kalıntılarının deseni, DOC giderimi ile ters orantılı olarak değişir. Sabit pH koşullarında koagülant dozajı arttıkça, kalıntı pıhtılaştırıcı konsantrasyonu genellikle belirli bir seviyeye kadar azalırken, bu dozu daha da arttırmak kalıntıları yükseltebilir. Bu sebeple, pıhtılaşma denemeleri sırasında kalıntı seviyelerinin izlenmesi kritik öneme sahiptir.

Bunun yanı sıra, yüksek koagülant dozajlarının neden olduğu çamurun işlenmesi, ekonomik ve çevresel açıdan ciddi zorluklar yaratmaktadır. Daha yüksek dozlar, özellikle metal tuzlarının hidrolize uğradığı durumlarda, pH'ta belirgin bir düşüşe neden olur ve bu durum, ek pH dengeleme kimyasallarının kullanımını gerektirebilir.

Alüminyum sülfat ve polialüminyum klorür (PACl) arasındaki performans farkı, PACl'nin önceden polimerize olmuş ve polinükleer hidroliz ürünleri içeren bir pıhtılaştırıcı olmasından kaynaklanır. PACl suya eklenince pH'a bağlı olarak hidroliz ve çökme yaşar, ancak bunun etkisi basit metal tuzlarına göre farklıdır. Bu sebeple, alüminyum ve demir içeren pıhtılaştırıcılar yalnızca metal içerikleri üzerinden değerlendirilmemelidir; pıhtılaştırıcının tamamlayıcı kimyasal yapısı da oldukça önemlidir. Bu anlayış, diğer koagülantların nasıl çalıştığını anlamada daha fazla bilgi sunabilir.

Hedef kirleticilerin kalıntı seviyeleri koagülasyon araştırmalarının ana unsuru olsa da pıhtılaştırıcıların kalıntı seviyeleri çoğu zaman ihmal edilir. Özellikle alüminyum ve demir gibi metallerin izlenmesi gereklidir, çünkü içme suyundaki konsantrasyonları sağlık ve teknolojik sebeplerden dolayı sınırlıdır. Dahası, içme suyu arıtma tesislerinde

koagülant kalıntılarının izlenmesi, kullanılan arıtma yöntemlerinin etkinliğini gösteren değerli bilgiler sağlar (Pivokonsky, 2024).

Koagülasyon işlemi, suya eklenen koagülanlar ile koloidal ve askıda kalan parçacıkların yüklerinin nötralize edilmesi ve dengesizleştirilmesi amacıyla gerçekleştirilir. Bu işlem, söz konusu parçacıklar ve bunlara yapışmış olan mikroorganizmaların sudan uzaklaştırılmasını sağlar ve böylece suyun kalitesini artırır.

Koagülasyon verimliliği, kullanılan koagülanın türü, miktarı, karıştırma süresi, hızının yanı sıra suyun pH değeri, sıcaklık, iyonik güç, organik madde yoğunluğu, çözünmüş katı maddeler ve askıda kalan parçacıkların boyutları gibi birçok faktöre bağlıdır. Ekonomik değerlendirmede PACl koagülantının kilogram başına maliyeti 0,606 \$ olarak belirlenmiştir (Alavijeh, 2022). Ayrıca Polialüminyum klorür (PACl) ile yapılan pıhtılaşmada ise optimum koşullarda 15 mg/L dozajın en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir.

Bir araştırmada; PACl dozajı pH 6.0'da 15 mg/L'den 35 mg/L'ye çıkarıldığında, floklaşmış suyun bulanıklığında artış gözlenmiştir. Ancak, pH yükseltildiğinde etkili bir bulanıklık azaltımı için çok daha yüksek PACl dozları gerektiği, bunun nedeninin ise düşük pH seviyelerinde koloidal parçacıklar ve çözünmüş organik karbon üzerindeki negatif yüklerin azalması nedeniyle daha az koagülanın nötralizasyon için yeterli olması olduğu tespit edilmiştir. pH yükseldikçe, bu parçacıklar daha fazla negatif yük kazandığından, onları parçalamak için daha fazla PACl gerektiği gözlenmiştir (Nti, 2021).

4.1.5.4 Kitosan

İçme suyu talebinin artışı, şehirleşme, nüfus artışı ve su kullanımına dair toplumsal tutumların değişmesiyle şekillenmiştir. Bu artışa paralel olarak, su kaynaklı hastalıkların engellenmesi için temiz suya erişim büyük bir önem taşımaktadır. İçme suyu arıtma genellikle pıhtılaşma, çökeltme, filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi çeşitli aşamaları içerir. Pıhtılaşma, suda bulunan kirleticilerin ve mikroorganizmaların çökeltmesine yardımcı olması nedeniyle kritik bir adımdır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, su arıtımında kimyasal pıhtılaştırıcılara olan bağımlılığın azaltılması için doğal pıhtılaştırıcıların çevre dostu bir alternatif olarak sunduğu potansiyeli

vurgulamaktadır. Bu doğal çözümler, geleneksel kimyasal pıhtılaştırıcılara kıyasla daha ekonomik bir seçenek olarak görülmektedir (Mohammadreza, 2019).

Kitosan üretimi ekonomik bir süreçtir ve pek çok ülkede balıkçılık atıkları, zengin bir hammadde kaynağı sağlamaktadır. Genelde pul ya da toz formunda satılan kitosanın fiyatı, molekül ağırlığı, saflık oranı ve deasetillenme düzeyine (genelde %70-90 arasında) bağlı olarak kilogram başına 10 ila 50 dolar arasında değişir. Sentetik polimerlere ekolojik bir alternatif olan kitosan, güvenli kullanımı ve cildi tahriş etmeyen yapısıyla avantaj sağlar. Ayrıca, adsorpsiyon yeteneği, su çekicilik, kimyasal reaktivite ve kompleks oluşturma gibi ek özelliklere sahip olması, onu çok yönlü bir materyal yapar (Lichtfouse, 2020).

Doğal pıhtılaştırıcıların kimyasal alternatiflere göre gereken miktarları kimyasal pıhtılaştırıcılardan daha azdır; bu, daha düşük maliyet ve minimum atık oluşumu anlamına gelir (Alazaiza, 2022).

Buna rağmen, biyo-koagülanların yaygın olarak benimsenmesi önünde bazı ciddi engeller bulunmaktadır. Ekonomik ve uygulanabilir üretim tekniklerinin geliştirilmesi için, gıda dışı atık maddeler gibi bol miktarda doğal kaynağın belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Günümüzde, doğal ve kimyasal koagülanlar arasındaki maliyet farkı oldukça büyüktür. Endüstriyel sınıf kitosanın kilogram maliyeti 20-40 USD arasında değişmektedir. Bu fiyat, biyo-polimerlerin çıkarılmasındaki yüksek maliyetlerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, biyo-koagülanların uygulanması, geleneksel alüm veya ferrik klorür gibi kimyasal yöntemlere kıyasla daha pahalı kalmaktadır (Nouj, 2024).

Kitosan konsantrasyonunun etkisini belirlemek amacıyla 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,5 ve 2,0 mg/L dozlarında yapılan deneysel bir çalışmada daha düşük dozlarda etkinliği sınırlı olan kitosanın, 0,75 mg/L seviyesinin üzerinde etkili bir şekilde çalıştığı görülmüştür. En verimli konsantrasyonun 1 mg/L olduğu belirlenmiştir; bu seviyenin ötesindeki dozaj artışları ek bir avantaj sağlamadığı gözlenmiştir (Divakaran, 2001).

Çalışmada, karar matrisinin oluşturulabilmesi için Çizelge 4.4 ve 4.5'te belirtilen ölçütler esas alınmış ve bu doğrultuda Çizelge 4.6'ya göre karar verici tarafından karar matrisi düzenlenmiştir.

Çizelge 4.4: Koagülantlar İçin Belirlenen Dozaj Miktarları.

Koagülant	Dozaj (mg/L)
Alüm	50,3
Demir (III) Klorür	32,6
PACl	15
Kitosan	1

Çizelge 4.5: Koagülantlar İçin Hesaplanan Maliyetler.

Koagülant	Maliyet (\$/kg)	Net Maliyet (\$/m ³)
Alüm	0,14	0,0070
Demir (III) Klorür	0,22	0,0071
PACl	0,60	0,0090
Kitosan	10-50	0,0300

Çizelge 4.6: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

Maliyet (\$/m ³)	Değer
0,006-0,007	10
0,007-0,008	8
0,008-0,009	6
0,009-0,01	4
>0,01	2

4.1.6 pH kriteri hakkında bilgiler

Koagülasyon-flokülasyon işleminde koagülant seçimi yapılırken pH kriteri dikkate alınması gereken bir diğer unsurdur. Bu kapsamda, kullanılan koagülantların farklı pH aralıklarında sağladığı performans, optimum pH değerine ulaşma gerekliliği ve bu değerlerin korunması için gereken ek kimyasal maddelerin maliyetleri değerlendirilmektedir.

Koagülantın etkili olduğu pH aralığı, suyun mevcut pH değerine uygunluğu ve pH ayarlaması için gereken işlemlerin arıtma sürecine etkisi pH kriteri açısından önemli faktörlerdir. Koagülantın uygulandığı pH aralığında su kalitesini iyileştirme kapasitesi, pH değerinin işlem sırasında stabil tutulabilmesi ve aşırı pH değişimlerinin önlenmesi göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, pH değerinin kontrol edilmesinin oluşan flokların stabilitesi ve çökeltme performansı üzerindeki etkileri, su kalitesi hedeflerine ulaşılmasında kritik öneme sahiptir.

Koagülant seçimi sürecinde bu unsurların tamamı, hem arıtma verimliliğini artırma hem de ilave kimyasal gereksinimlerini en aza indirme açısından belirleyici rol oynar. Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.1’de yapılan puanlamanın

oluşturulmasında her bir koagülantın pH kriterine yönelik dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.1.6.1 Alüm

pH seviyesi, koagülasyon-flokülasyon süreçlerinde kritik bir faktördür, çünkü her koagülan belirli bir pH aralığında en iyi şekilde çalışır. Koagülasyon sırasında, pH, alüminyum veya demir bazlı koagülanların hidrolizinden türeyen bileşiklerin oluşumunu düzenler. Bu bileşikler, suyun pH seviyesine bağlı olarak pozitif veya negatif yüklü hale gelir. Düşük pH seviyelerinde ($\text{pH} < 6$) pozitif yüklü türler oluşurken, yüksek pH değerlerinde negatif yüklü türler baskındır. Pozitif yüklü bu bileşikler, yüzeylerine yapışarak kararlı kolloidal parçacıkları kararsız hale getirebilir; bu süreç "yük dengesi bozma" olarak bilinir. Yeterli miktarda koagülan kullanıldığında, alüminyum veya demir hidroksit çökeltileri meydana gelir ve bu çökeltiler, "süpürme-flok koagülasyonu" olarak bilinen mekanizma ile kolloidal parçacıkları fiziksel olarak uzaklaştırır (Shirafkan, 2016).

Koagülantların aşırı kullanımı, yüklerin tersine dönmesi ve kolloidlerin yeniden stabil hale gelmesi gibi istenmeyen durumları tetikleyebilir, bu nedenle dikkatlice izlenmesi gerekir. Metal tuzları, örneğin alüminyum sülfat veya ferrik klorür suya eklendiğinde önce metal iyonlarına ayrışır ve ardından hidroliz reaksiyonlarına girer.

Çözelti özellikleri, özellikle pH seviyesi, sıcaklık ve iyon bileşimi, bu süreçlerin etkinliğini ve dolayısıyla pıhtılaşma performansını etkiler. Ayrıca, koagülantların hidrolizi çözelti alkalitesi ve dozaj gibi faktörlere bağlı olarak pH seviyelerini değiştirebilir. Alüm ile DOC giderimi, pH 5.0–6.5 aralığında %50 veya daha fazla olmuştur. Ancak, pH nötr seviyelerine yaklaştığında, Alüm dozajı arttıkça alüminyum kalıntılarının artma eğiliminde olması, hem DOC gideriminin %50'yi aşmasını hem de alüminyum kalıntılarının 0,2 mg L⁻¹'den düşük kalmasını sağlayan pıhtılaşma koşullarını sınırlandırmıştır (Pivokonsky, 2024).

4.1.6.2 Demir (III) Klorür

pH değeri su arıtımında belirleyici rol oynayan kriterlerden biridir. pH, suyun asitlik ya da bazlık durumunu 1 ile 14 arasında bir ölçekte ifade eder ve kimyasal reaksiyonların etkili bir şekilde gerçekleşmesinde önemli bir yere sahiptir. Amfoterik yapıya sahip pıhtılaştırıcıların moleküler yükü, işlem boyunca pH seviyesine bağlı

olarak değişiklik gösterebilir. Ayrıca alkalinite, yani suyun asitliğe karşı direnç gösterebilme kapasitesi, pıhtılaşma işleminin performansını doğrudan etkiler. Özellikle ferrik bazlı kimyasal pıhtılaştırıcılar, alkaliniteyi büyük oranda tüketir. Bu nedenle, pıhtılaşma işlemine başlamadan önce ideal pH seviyesinin belirlenmesi ve uygun şekilde düzenlenmesi gerekmektedir (Alazaiza, 2022).

Çözelti faktörlerinden biri olan pH, metal hidrolizini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu etkileşime sıcaklık gibi faktörler de dahil olabilir. Yapılan araştırmalar, pH değeri ile çözünürlük arasında sıcaklıkla değişen bir ilişki olduğunu ve Al ve Fe'nin pıhtılaşmadaki davranışının da pH değişimine bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymuştur.

Su arıtımı sırasında, çoğu doğal su kirleticisinin negatif yüklerini dengelemek için pozitif yüklü iyonlar hayati öneme sahiptir. Al^{3+} ve Fe^{3+} gibi yüksek yüklü katyonlar, genellikle çok düşük pH seviyelerinde bulunurlar ve içme suyu arıtımı üzerinde doğrudan bir etkisi olmasa da bu elementlerin hidroliz ürünleri yüklerin nötralize edilmesinde önemli bir rol oynar. Al ve Fe'den türeyen pozitif yüklü bileşikler, elektrostatik etkileşimler veya yüzey kompleksleri oluşturarak kirleticilerdeki negatif yükleri dengeleyebilir. Bu dengesizlik sonrası kirleticiler, diğer parçacıklarla birleşip agregatlar oluşturabilirler. Demir (III) Klorür dozajı arttıkça uygun pH aralığının da genişlediği tespit edilmiştir. Optimum pH aralığı için 4.5-7.5 oluğu belirtilirken hem etkili DOC giderimi ($\geq 50\%$) hem de düşük Fe konsantrasyonları ile sonuçlanan geniş bir koagölasyon koşulları aralığının mümkün olduğu belirtilmektedir (Pivokonsky, 2024).

4.1.6.3 PACI

Koagölasyon aşamasında, özellikle laboratuvar ortamında ya da içme suyu arıtma tesislerinde pH seviyelerinin yönetilmesi önemli bir konudur. Ham suyun başlangıç pH'ı, suyun alkalitesi (bu, koagölant eklenmesiyle pH değişimlerini belirler), kullanılan koagölantın türü ve miktarı (hidrolizleri pH üzerinde de etkilidir) ve pH düzenleyici kimyasalların eklenmesi gibi birçok faktör, pH değerini etkileyen unsurlardır.

Koagölantlar suya ilave edildiğinde, kimyasal hidrolizle parçalanarak kirleticilerin giderilmesinde rol oynayan çeşitli hidroliz ürünleri oluştururlar. Bu hidroliz ürünlerinin türü pH seviyesine bağlı olarak değişiklik gösterir ve her bir ürün, farklı

mekanizmalar aracılığıyla etkili olur. Bu pH'ya bağlı farklılıklar, koagülasyon sürecinin en iyi sonuçları elde etmek için uygun koşullara göre ayarlanmasının ne denli kritik olduğunu göstermektedir (Bahrodin, 2021). Bununla birlikte, DOC giderimi %50'yi aşan seviyelere yalnızca yüksek PACl dozları (30 mg/L veya 1.11 mmol/L Al ve daha fazla) ve pH 5.75 ile 7.5 arasında bir aralıkta görüldü. Bu pH aralığı, PACl dozajına göre biraz değişiklik gösterebilir (Pivokonsky, 2024).

4.1.6.4 Kitosan

Doğal koagülantlar, geniş bir pH aralığında etkili bir şekilde çalışmakta ve sentetik koagülantların aksine, arıtılmış suyun pH seviyesini değiştirmemektedir. Bunun yanında, çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunarak doğaya uyumlu bir etki bırakmaktadırlar.

Koagülasyon işlemi; askıda kalan katı maddelerin, bulanıklığın, organik içeriklerin, yağların, kimyasal oksijen ihtiyacının ve renk gibi kirlilik unsurlarının giderilmesinde oldukça etkili olduğu için su ve atık su arıtımında sıkça tercih edilmektedir. Bu işlem, küçük ve dağınık haldeki parçacıkların, daha kolay çözünebilecek daha büyük topluluklara dönüşmesi amacıyla bir koagülant eklenmesini içerir.

Koagülasyon ve flokülasyon birbiriyle ilişkili ancak farklı süreçlerdir: koagülasyon, hızlı karıştırma ile negatif yüklü kolloid parçacıkların kimyasal olarak nötralize edilmesini ifade ederken, flokülasyon, nötralize edilen bu parçacıkların yavaş karıştırma ile daha büyük yapılar oluşturmasını sağlayan fiziksel bir süreçtir. Flokülasyon sırasında, koagülasyon aşamasında oluşan büyük floklar birleşir ve yerçekimi kuvvetiyle çöker (Alazaiza, 2022).

Kitosan kullanılarak gerçekleştirilen bir araştırmada 5, 6, 7, 8 ve 9 pH seviyelerinde flokülasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, pH 6,5, 7,25 ve 7,5 seviyelerinde yapılan deneyler, kalan bulanıklığın en düşük olduğu aralığın pH 6 ile 8 arasında olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgulara göre, kitosan en etkili sonuçları pH 6,5 ile 7,5 aralığında vermiştir ve en yüksek performans pH 7,5'te gözlemlenmiştir. Bu pH seviyesinde bulanıklığın %90'ı giderildiği ve kalan bulanıklık 5 NTU'nun altına düştüğü gözlemlenmiştir (Divakaran, 2001).

İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te, pH değeri gösterge parametresi olarak belirtilmiş ve parametrik değer aralığı $6,5 \leq \text{pH} \leq 9,5$ olarak tanımlanmıştır. Yönetmelikte ayrıca suyun aşındırıcı olmaması gerektiği ifade

edilmekte, şişelenmiş veya kaplara doldurulan sular için ise minimum pH değeri 4,5 olarak öngörülmektedir. Bu nedenle, pH değeri için puanlama yapılırken, Çizelge 4.7’de belirtilen değer aralıkları esas alınarak puanlama gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.7: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

pH Aralığı	Değer
7,5-8,5	10
6,5-7,5	8
5,5-6,5	6
4,5-5,5	4
<4,5	2

4.1.7 TOPSIS yönteminin uygulanması

Elde edilen veriler ışığında oluşturulan karar matrisi ile en uygun koagülant kullanım senaryosunun seçimi yapılmış olup TOPSIS uygulamasının anlatıldığı bölümdeki hesaplama yöntemleri kullanılarak Çizelge 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16’da gerçekleştirilen işlem basamakları aşağıda sunulmuştur;

Çizelge 4.8: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

Kriter	Önem Derecesi
Çevresel Etki	0,15
İşletme Kolaylığı	0,15
Aritma Verimi	0,20
Doz-Çamur İlişkisi	0,15
Doz-Maliyet İlişkisi	0,20
pH	0,15

Çizelge 4.9: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.

Koagülant Türü	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Aritma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
Alüm	0,27217	0,46359	0,42426	0,39057	0,70014	0,39736
Demir (III) Klorür	0,54433	0,46359	0,56569	0,39057	0,56011	0,52981
PACl	0,40825	0,46359	0,42426	0,52076	0,42008	0,52981
Kitosan	0,68041	0,59604	0,56569	0,65094	0,14003	0,52981

Çizelge 4.10: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.

Koagülant Türü	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Aritma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
Alüm	0,04082	0,06954	0,08485	0,05859	0,14003	0,05960
Demir (III) Klorür	0,08165	0,06954	0,11314	0,05859	0,11202	0,07947
PACl	0,06124	0,06954	0,08485	0,07811	0,08402	0,07947
Kitosan	0,10206	0,08941	0,11314	0,09764	0,02801	0,07947

Çizelge 4.11: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.

Çözüm Değerleri	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Arıtma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
İdeal Çözüm Değeri	0,10206	0,08941	0,11314	0,09764	0,14003	0,07947
Negatif İdeal Çözüm Değeri	0,04082	0,06954	0,08485	0,05859	0,02801	0,05960

Çizelge 4.12: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Koagülant Türü	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Arıtma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
Alüm	0,00375	0,00039	0,00080	0,00153	0,00000	0,00039
Demir (III) Klorür	0,00042	0,00039	0,00000	0,00153	0,00078	0,00000
PACI	0,00167	0,00039	0,00080	0,00038	0,00314	0,00000
Kitosan	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,01255	0,00000

Çizelge 4.13: İdeal Uzaklık Değerleri.

Koagülant Türü	S_i^+
Alüm	0,08285
Demir (III) Klorür	0,05587
PACI	0,07987
Kitosan	0,11202

Çizelge 4.14: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Koagülant Türü	Çevresel Etki	İşletme Kolaylığı	Arıtma Verimi	Doz-Çamur İlişkisi	Doz-Maliyet İlişkisi	pH
Alüm	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,01255	0,00000
Demir (III) Klorür	0,00167	0,00000	0,00080	0,00000	0,00706	0,00039
PACI	0,00042	0,00000	0,00000	0,00038	0,00314	0,00039
Kitosan	0,00375	0,00039	0,00080	0,00153	0,00000	0,00039

Çizelge 4.15: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.

Koagülant Türü	S_i^-
Alüm	0,11202
Demir (III) Klorür	0,09960
PACI	0,06580
Kitosan	0,08285

Çizelge 4.16: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.

Koagülant Türü	S_i^+	S_i^-	P_i
Alüm	0,08285	0,11202	0,57484
Demir (III) Klorür	0,05587	0,09960	0,64065
PACI	0,07987	0,06580	0,45170
Kitosan	0,11202	0,08285	0,42516

Bu çalışma, farklı değerlendirme kriterleri kullanarak içme suyu arıtımı için en uygun koagülantın seçimini belirlemek amacıyla TOPSIS yönteminin uygulanmasını göstermektedir. Çalışma, koagülantların çevresel etki, işletme kolaylığı, arıtma verimi, doz-çamur ilişkisi, doz-maliyet ilişkisi ve pH uyumu gibi kriterler açısından değerlendirilmesini içermektedir. Alüminyum Sülfat (alüm), Demir (III) Klorür, Poli Alüminyum Klorür (PACl) ve Kitosan olmak üzere dört farklı koagülant, TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Demir (III) Klorürün özellikle arıtma verimi, doz-maliyet ilişkisi ve pH uyumu konularında diğer koagülantlara kıyasla öne çıktığını göstermektedir. Bu üstün özellikler, Demir (III) Klorürün düşük dozajlarda dahi yüksek arıtma performansı sağlaması, geniş bir pH aralığında etkili olması ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunması ile ilişkilidir. Bununla birlikte, Demir (III) Klorürün çevresel etkileri ve çamur üretimi diğer koagülantlara göre daha dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken unsurlar olarak öne çıkmaktadır. PACl, çevresel etkiler ve işletme kolaylığı açısından avantaj sağlarken, kitosan doğal bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Alüm ise ekonomik açıdan uygunluğu ve kullanım kolaylığıyla bazı avantajlara sahip olmasına rağmen, diğer kriterlerde sınırlı performans sergilemiştir. TOPSIS modelinden elde edilen sonuçlara göre, Demir (III) Klorür, tüm kriterlerin değerlendirilmesi sonucunda içme suyu arıtımı için en çok tercih edilen koagülant olarak belirlenmiştir.

4.2 Filtrasyon Senaryosu

İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirilen filtrasyon sürecinde, askıda katı maddelerin, doğal organik maddelerin, mikroorganizmaların, demir-mangan gibi çözünmüş metallerin ve renk parametrelerinin giderimi amacıyla Hızlı Kum Filtresi kullanılmaktadır (İSKİ, 2023). Mevcut süreçte kullanılan Hızlı Kum Filtrelerinin yanı sıra Mikrofiltrasyon, Ultrafiltrasyon ve Nanofiltrasyon yöntemlerinin de değerlendirildiği alternatif filtrasyon senaryoları karşılaştırılarak, en uygun yöntemin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Bu karşılaştırma sürecinde, TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatiflerin sıralanması ve karar verilmesi sağlanmıştır. TOPSIS yönteminin uygulanabilmesi için, öncelikle hedef tanımlaması yapılmış ve ardından değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Bu bağlamda, karşılaştırmaya dahil edilen filtrasyon türlerinin değerlendirilmesinde dört ana kriter belirlenmiştir: Maliyet, Performans, İşletme Kolaylığı ve Atık Yönetimi.

Belirlenen kriterler doğrultusunda, dört farklı filtrasyon türü için gerekli literatür araştırmaları gerçekleştirilmiş ve bu araştırmalar sonucunda, Çizelge 4.17'de görülebileceği üzere karar matrisi oluşturulmuştur. Söz konusu karar matrisi, her filtrasyon türünün ilgili kriterler açısından sahip olduğu avantaj ve dezavantajları ortaya koyarak, alternatiflerin objektif bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Bu karar matrisi oluşturulurken, kriterler fayda ve maliyet yönlü olarak değerlendirilmiş ve 1 ile 10 arasında bir puanlama yapılmıştır. Fayda yönlü kriterlerde daha yüksek puanlar tercih edilirken, maliyet yönlü kriterlerde daha düşük puanlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, performans, işletme kolaylığı gibi kriterler fayda yönlü olup, daha yüksek puanlar bu özelliklerin daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, maliyet, atık yönetimi kriterleri maliyet yönlü olup, düşük puanlar daha avantajlı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.17: Filtrasyon Yöntemleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.

Filtrasyon Türü	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
Hızlı Kum Filtresi	9	4	5	2
Mikrofiltrasyon	7	7	7	5
Ultrafiltrasyon	6	9	7	5
Nanofiltrasyon	4	10	5	4

4.2.1 Maliyet kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında filtrasyon yöntemi seçilirken, maliyet kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan filtrasyon yönteminin doğrudan işletme maliyetleri, filtrasyon sisteminin kurulumu ve devreye alınması sırasında ortaya çıkan yatırım maliyetleri, enerji tüketimi, bakım ve onarım giderleri ile filtreleme işlemi sırasında kullanılan sarf malzemelerinin maliyetleri değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, kullanılan filtrasyon ekipmanlarının ekonomik ömrü, sistemin yenilenme gerekliliği, olası arıza durumlarında oluşabilecek ek maliyetler ve filtrasyon sürecinden sonra oluşan atıkların bertaraf edilmesi sırasında ortaya çıkan harcamalar kritik bir değerlendirme konusudur. Özellikle membran bazlı sistemler gibi teknolojilerde enerji tüketiminin yüksek olması veya sarf malzemelerinin ithal edilmesi gibi unsurlar toplam maliyeti artırabilirken, daha basit sistemlerde bu maliyetlerin daha düşük olması mümkündür. Ayrıca, filtrasyon yöntemlerinin uzun vadeli işletme giderleri ile sürdürülebilirliği, seçilecek yöntemin

ekonomik açıdan uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. Bu değerlendirme sürecinde, filtrasyon sistemlerinin birim su başına maliyeti, enerji verimliliği, gerekli altyapı yatırımları ve bu yatırımların geri dönüş süresi gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır.

Filtrasyon yöntemi seçim sürecinde maliyet unsurlarının her biri, sistemin hem kısa vadeli bütçe gereksinimlerini hem de uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerini karşılaması açısından belirleyici rol oynamaktadır. Çizelge 4.17'de yer alan puanlamanın oluşturulmasında, farklı filtrasyon yöntemlerinin maliyet kriterine yönelik değerlendirmelerden elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.2.1.1 Hızlı kum filtresi

Dünya yüzeyinin büyük bir kısmı (%70'ten fazlası) nehirler, göller ve okyanuslarla kaplıdır ve bu su kütleleri, gezegendeki toplam su miktarının büyük bölümünü barındırır. Ancak, bunun sadece %1'i yüzey tatlı suyu olarak bulunur ve bu oranın çok küçük bir kısmı insan kullanımı için erişilebilirdir. Yeraltında bulunan buz çekirdekli buzullar, dünya tatlı su rezervlerinin %2'sinden fazlasını oluşturur ve en büyük potansiyel tatlı su kaynağıdır. Tatlı su kaynaklarının sınırlı olması, suyun yeniden kullanımı için arıtma süreçlerinin kritik bir önem taşımaya neden olmuştur.

Su arıtma sistemleri, deniz ve yeraltı suyundan kirliliklerin giderilmesi yoluyla temiz su sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmada, su arıtımında kullanılan yavaş ve hızlı kum filtrelerinin performansı şu şekilde ölçülmüştür: 60 mg/L ve 58 mg/L toplam sertlik, 1,5 NTU ve 3 NTU bulanıklık, 62 mg/L ve 40 mg/L toplam alkalinite, 11 mg/L ve 10 mg/L klorür iyonu, pH değeri sırasıyla 7,4 ve 7,2, elektriksel iletkenlik 85 ve 72, bakteri giderme oranları ise %98 ve %86'dır. Hızlı kum filtresi, elektriksel iletkenlik, toplam sertlik, alkalinite, klorür iyonu ve pH ayarlarında daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, bu mekanik filtrasyon (MF) yöntemi, sistemin bazı fonksiyonlarını yerine getirebilmek için hava kompresörleri ve pompalar gibi ek cihazlara ihtiyaç duyar.

Hızlı kum filtre (RSF) teknolojisi, yavaş kum filtrasyonunun (SSF) uygulanmasından yaklaşık 90 yıl sonra geliştirilmiştir. RSF, artan içme suyu talebini karşılamak amacıyla daha yüksek filtrasyon hızları sunarak SSF'nin bazı zayıflıklarını giderir. Her ne kadar her iki yöntem de kum yatağı kullansa da RSF, 10-15 cm arası derinlikte, 3-45 mm arasında boyutlanmış çakıl katmanlarına ve 60-90 cm büyüklüğünde çakıl

kullanır. Ayrıca, RSF'nin kum yatağı 0,35-0,55 mm arasında parçacık büyüklüğüne sahip olup, tekdüzelik katsayısı 1,2 ile 1,8 arasında değişir.

SSF ve RSF arasındaki başlıca fark, filtrasyon kapasitesi ve verim oranlarında görülmektedir. SSF'nin bakteri giderme verimliliği %80 ile %90 arasında değişirken, RSF'de bu oran %98 ile %100 arasında olabilmektedir. Yavaş ve hızlı kum filtrelerinde bakteri giderme oranları sırasıyla %97,5 ve %89 olarak ölçülmüştür. SSF'de toplam sertlik ve alkalinite sırasıyla 46 mg/L ve 24 mg/L, RSF'de ise 16 mg/L ve 14 mg/L olarak bulunmuştur.

Hızlı kum filtresinin bakımı, her 24 ila 48 saatte bir geri yıkama işlemi gerektirir. İlk kurulum maliyetleri düşük olsa da işletme ve bakım maliyetleri yüksektir. Bu tür sistemlerin yönetilmesi için uzman personel gerekmektedir. Su kalitesine ilişkin yapılan değerlendirmede, arıtılmış su örneklerinin görünüm, renk ve tat açısından istenmeyen özellikler göstermediği belirlenmiştir. Tüm ölçülen parametreler, EPA (2002) tarafından belirlenen Ulusal İçme Suyu Kalitesi Standartları'na uygun olarak, bulanıklık ≤ 5 NTU ve pH 6,5 ile 8,5 arasında kalmaktadır (Abubakar, 2022). Ayrıca hızlı Kum Filtrasyonu süreçleri, her bir metreküp su için yaklaşık 0,35 kWh enerji harcar (Anh, 2020).

4.2.1.2 Mikrofiltrasyon

Su geri kazanımında enerji ihtiyacı, suyun başlangıçtaki kalitesi ve gerekli arıtma düzeyine göre farklılık göstermektedir. Koagülasyon, flokülasyon, hızlı kum filtrasyonu ve UV ışınlarıyla dezenfeksiyon gibi yöntemleri içeren klasik üçüncül arıtma süreçleri, tatlı su arıtımına yakın bir enerji tüketimi ile 0,15 ila 0,3 kWh/m³ arasında enerji harcar. Ancak, mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi membran teknolojileri, 0,35 ila 0,65 kWh/m³ arasında değişen, çok daha yüksek enerji ihtiyaçlarıyla öne çıkar. Daha ileri yöntemler, örneğin ters ozmoz ve gelişmiş oksidasyon süreçleri, organik mikro kirlenmelerin giderilmesi veya tuzdan arındırma amacıyla kullanıldığında enerji tüketimi iki katına kadar çıkarak 1,1 ila 2,0 kWh/m³ seviyelerine ulaşabilir. Ayrıca, suyun yeniden kullanımıyla ilgili projelerde, dağıtım ve taşıma süreçleri için gereken enerji, kimi zaman arıtma sürecinde harcanandan daha yüksek olabilir ve mutlaka dikkate alınmalıdır (Lazarova, 2012).

Membran tabanlı sistemlerin işletme giderleri; bakım faaliyetleri, enerji gereksinimi, atık su üretimi, kullanılan kimyasal maddeler ve membran yenileme süreçleri gibi pek çok faktörden etkilenir (Lipp, 1998).

İçme suyu arıtımı alanında, membran sistemleri basınç dayalı membran modüllerinin kullanıldığı farklı düzenlemelerle arıtma sürecini iyileştirecek şekilde yapılandırılmaktadır. Bu tür sistemlerin en önemli maliyet unsurlarından biri, membran ünitelerinin basınç altında çalıştırılması ve yeterli akış hızlarının sağlanması için gereken enerjidir. Sistemin enerji ihtiyacı, düşük basınç koşullarında çalışan daldırılmış membran tasarımlarının kullanılmasıyla azaltılabilir. Bu tasarımlar, modül tasarımına farklı bir bakış açısı getirmektedir. Örnek bir çalışmada, 30 dakikalık hava temizleme döngüsü ile permeat su kalitesi sürekli olarak yüksek olmuştur. Arıtma verimliliği, genellikle UV254 emiliminin %85 azalması, TOC'de %65-75 arasında bir düşüş ve %95'ten fazla renk giderimiyle sonuçlanmıştır. Tüm örneklerde permeat bulanıklığı 0,2 NTU'nun altında kalmış ve askıda katı maddeler tespit edilememiştir (Leiknes, 2004).

4.2.1.3 Ultrafiltrasyon

Sürdürülebilir su arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi, 21. yüzyılda çözülmesi gereken en temel sorunlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Ultrafiltrasyon (UF) membran teknolojileri, büyük çaplı içme suyu arıtma tesislerinde yaygın bir şekilde uygulanmaya başlanmışken, özellikle ekonomik imkânların kısıtlı olduğu bölgelerde geleneksel filtreleme yöntemleri hâlâ baskınlığını korumaktadır. UF sistemlerinin tutarlı şekilde yüksek kalitede arıtılmış su elde edebildiğini, %99 oranında bulanıklık giderimi sağladığını ve koliform bakterilerin tamamen uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir. Ancak, membran kirlenmesi önemli bir operasyonel sorun olarak öne çıkmakta ve işletme maliyetlerini artırmaktadır. Sermaye harcamaları, su arıtma tesisleri için gerekli olan elektrik panelleri, mekanik ekipmanlar, yapısal inşaat çalışmaları ve diğer donanımlara yapılan yatırımları kapsamaktadır. 2013 yılı itibarıyla, standart bir medya filtreleme sisteminin inşaa maliyetinin yaklaşık 2.760.726 ABD doları olduğu tahmin edilmiştir. Aynı büyüklükte bir UF sistemi kurulumunun maliyeti ise aynı yıl yaklaşık 3.710.000 ABD doları olarak belirlenmiştir. Bu durum, UF teknolojilerinin genellikle daha yüksek bir başlangıç yatırımı gerektirdiğini gösteren bulgularla uyumlu bir tablo

çizmektedir. Bununla birlikte, UF sistemlerinin geleneksel sistemlere kıyasla daha az arazi ve fiziksel alan gereksinimi sunduğu belirtilmektedir.

UF sistemi, geleneksel sistemlere kıyasla inşaat için çok daha az araziye ihtiyaç duyar; bu oran %69,6 daha azdır. Ancak, arazi kullanımı ve arıtma kapasitesi hesaba katıldığında, toplam inşaat maliyetleri yalnızca %5,6 gibi küçük bir artış göstermektedir. Arazi ihtiyacındaki bu azalma, UF membranlarının giderek azalan maliyetiyle birleştiğinde, son yıllarda bu teknolojinin büyük ölçekli uygulamalar için daha uygun maliyetli bir seçenek haline gelmesini sağlamıştır.

Operasyonel maliyetler, arıtma tesislerinin düzenli bakımını yapmak ve sürekli olarak istenen kalite ve miktarda arıtılmış su sağlamaktan doğan harcamalardır. Bu giderler genellikle iki ana başlık altında toplanır: kimyasal maddelere ilişkin maliyetler ve elektrik giderleri. UF sisteminde ön arıtma, ham suyun işlenmesi için basınçlı kum filtreleri ve hava ile oksidasyon yöntemlerinin kullanılmasını içerir. Geleneksel sistemlerden farklı olarak, UF süreci koagülan kullanmaz; çünkü koagülasyonun UF sistemlerinde organik kirleticilerin uzaklaştırılması üzerindeki etkisi sınırlı kalmaktadır. Kum filtreleri, büyük boyutlu partikülleri tutarak bunların UF membranlarına ulaşmasını ve tıkanmaya yol açmasını engeller.

Maliyet başlığı altında filtre temizleme maliyetlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir. UF sisteminde kullanılan başlıca temizlik maddeleri sodyum hidroksit (NaOH) ve hidroklorik asittir (HCl). Arıtılmış suyun dezenfeksiyonu içinse sodyum hipoklorit (NaOCl), yaygın adıyla sıvı klor, tercih edilmektedir. NaOH ve HCl, uygun maliyetleri ve içme suyu arıtma tesislerindeki işlevsellikleri nedeniyle UF membran temizliği için öncelikli seçeneklerdir. Filtrat suyunun dezenfekte edilmesi sürecinde klor gazı (Cl₂) ya da NaOCl kullanılabilir. Klor gazı, toplu alımlarda daha düşük maliyet sunduğu için yaygın bir seçenektir; ancak NaOCl, kullanımı daha kolay ve daha az teknik bilgi gerektiren bir alternatiftir. Ayrıca, NaOCl suda çözüldüğünde serbest klor oluşturarak operasyonel riskleri en aza indirir. Her iki dezenfektanın da içme suyunda bulunan bakteri ve virüslerin yok edilmesinde etkili olduğu kanıtlanmıştır.

Bununla birlikte hem NaOCl hem de klor gazı, eğer uygun şekilde dozajlanmazsa insan sağlığı üzerinde zararlı etkiler yaratabilecek trihalometanlar (THM) gibi yan ürünler üretebilir. Bu tür zararlı yan ürünlerin oluşumu, doğru dozaj kontrolüyle büyük

ölçüde azaltılabilir. Klor gazı ile dezenfeksiyon, vakum sistemleri, yüksek basınçlı pompalar, regülatörler ve gaz kaçaklarını önlemek için özel contalar gibi karmaşık bir altyapı gerektirir. Buna karşın, NaOCl'nin uygulanması, yalnızca depolama tankları ve dozaj pompaları kullanılarak çok daha kolay bir şekilde gerçekleştirilir ve bu da işlem sürecini oldukça basitleştirir. Her iki sistemin çalıştırılmasında, dönen mekanik cihazlar (örneğin, pompalar, hava üfleyiciler, kompresörler) gibi ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, UF sistemlerinin enerji tüketiminin geleneksel sistemlere göre oldukça yüksek olduğu rapor edilmiştir. Eğer ham su kalitesi yeterince iyi durumdaysa, geleneksel filtreleme yöntemleri genellikle UF teknolojisinden daha uygun maliyetli olduğu sonucuna varılmıştır.

Ayrıca UF sistemi, 1000 m³ arıtılmış su üretmek için 35,40 USD işletme maliyeti ile çalışırken, geleneksel filtrasyon sisteminin aynı miktardaki suyu arıtma maliyeti 11,06 USD olduğu tespit edilmiş olup UF sisteminin maliyetinin yaklaşık üç kat fazla olduğu bulunmuştur. Ancak, UF teknolojisinde kullanılan kimyasalların maliyeti, geleneksel yöntemin kimyasal giderlerinin %43'ü kadar bir düzeydedir. UF sistemlerinde enerji tüketimine neden olan başlıca faktörler; hava üfleyicinin oksidasyon işlemi, basınçlı kum filtreleri ile büyük parçacıkların ayrıştırılması ve besleme pompasının yüksek basıncı koruma gerekliliğidir. Buna karşın, geleneksel sistemler büyük ölçüde yerçekimi kuvvetine dayalı olarak çalışır ve bu nedenle enerji ihtiyacı asgari düzeydedir.

Bakım giderleri, sistemin işlevselliğini sürdürmek için yapılan harcamaları ifade eder. UF sistemlerinde mekanik ekipman kullanımının yoğunluğu, bakım maliyetlerini artıran temel sebeplerden biridir. Ayrıca, yüksek çalışma basıncı, boru sistemlerinde sızıntı ve hasar onarım ihtiyacını artırarak bakım giderlerini yükseltir. UF sistemlerinin hem kurulum ve işletme maliyetleri hem de bakım giderleri, geleneksel sistemlere kıyasla daha yüksektir. UF sistemlerinin bir avantajı da yüksek seviyede otomasyona sahip olmasıdır. Geleneksel sistemlerde, operatörler sık sık kimyasal dozajını ayarlamak ve filtreleri manuel olarak geri yıkamak zorundayken, UF sistemlerinde bu süreçler minimum insan müdahalesi ile gerçekleşir. Böylece, operatörlerin günlük iş yükü önemli ölçüde azalır (Chew, 2016).

Bir ultrafiltrasyon tesisi, hizmet ömrü boyunca her bir metreküp içme suyu üretimi için yaklaşık olarak 0,8 kWh enerji harcar. Enerji tüketimi detaylarına bakıldığında, yalnızca %18'i, yani 0,15 kWh/m³, suyun arıtılması için kullanılmaktadır. Buna

karşılık, kimyasal üretimi toplam enerji tüketiminin %36'sını oluşturmakta ve 0,3 kWh/m³ enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, suyun son kullanıcıya dağıtılması, toplamın %32'sine denk gelen 0,25 kWh/m³ enerji tüketimini gerektirir. Öte yandan, suyun çekilmesi için kullanılan pompalar, %14 oranında bir enerji payına sahip olup, 0,12 kWh/m³ tüketmektedir. Kimyasal üretimi ve arıtılmış suyun dağıtımı gibi enerji yoğun süreçler, toplam enerji ihtiyacının yaklaşık üçte ikisini oluşturarak dikkat çekmektedir (Vince, 2007).

Eleme prensibini temel alan bir UF sistemi, kullanımı son derece kolay bir yöntemdir, kirleticileri ve virüsleri tamamen ortadan kaldırır ve zararlı atık ürünlerin oluşumuna yol açmaz. Membran filtreleme teknolojileri, sudaki çözünabilir, kolloidal ve büyük boyutlu kirleticileri doğal yollarla temizleme kapasitesine sahiptir. Bu sistemler, tek başına ya da geleneksel arıtma yöntemleriyle entegre olarak kullanıldığında, otomasyon teknolojileri sayesinde insan gereksinimini en düşük seviyeye indirir. Dünya genelinde membran teknolojilerine olan talebin artışındaki başlıca nedenler arasında, üretim maliyetlerindeki düşüş, kurulum için gerekli alanın azalması ve kimyasal kullanımının en aza indirilmesi yer almaktadır. Su arıtımında işletme ve bakım giderleri, geleneksel derin filtreleme yöntemlerinde 0,41 €/m³, UF membran sistemlerinde ise 0,46 €/m³ olarak belirlenmiştir. Ancak UF sistemlerinin nispeten yüksek maliyetleri, kimyasal ve sarf malzemelerinden sağlanan tasarruflarla dengelenmektedir. UF sistemlerinin, geleneksel sistemlere göre daha pahalı olmasının nedenleri arasında sermaye yatırımları ile sabit bakım ve işletme maliyetleri bulunmaktadır (gelenekselde 0,44 €/m³'e karşılık UF'de 0,47 €/m³). Ancak UF sistemlerinin öne çıkan avantajlarından biri, daha az yer kaplamasıdır. Bir UF sistemi, geleneksel bir arıtma sistemine kıyasla %69,6 daha az alan gerektirirken, inşaat maliyetleri yalnızca %5,6 daha yüksektir. Bu durum, özellikle arazi maliyetlerinin yüksek olduğu bölgelerde UF sistemlerini daha cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, basınçla çalışan membran filtreleme sisteminin enerji tüketimi oldukça yükündür ve temizlik işlemleri için kimyasallara ihtiyaç duyulmaktadır; bu da UF sistemlerinin işletme giderlerini geleneksel sistemlere göre iki kat artırmaktadır. Enerji maliyetlerini düşürmek için hidroelektrik ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların kullanılması, etkili bir çözüm olabilir (Katrevesis, 2021).

UF sistemleri, su içerisindeki parçacıkları gidermede yüksek verimlilik sağlasa da maliyet analizleri bu teknolojinin doğrudan filtrasyon gibi diğer yöntemlere göre çok

daha maliyetli olduğunu göstermektedir. Ultrafiltrasyon (UF) membranlarının gözenek boyutları, mikrofiltrasyon membranlarından daha küçük ancak nanofiltrasyon membranlarından daha büyüktür. Bu özellikleri sayesinde, virüs, bakteri ve alg gibi boyutları gözenek çapını aşan kirleticileri sudan ayrıştırabilirler. Ancak, bu membranlar biyolojik birikim ve yüksek pH seviyelerinden kaynaklanan zarar görme riskine karşı hassastır. Pilot çalışmalarda UF sistemlerinin enerji tüketimi net bir şekilde belirtilmemiş olsa da benzer sistemler dünyanın çeşitli bölgelerinde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerden elde edilen verilere göre, enerji tüketiminin filtrelenen her bir metreküp su için 0,1 ila 0,15 kWh arasında olduğu tahmin edilmektedir. Bu değerler genellikle çıkmaz filtreleme modunda çalışan sistemler için geçerlidir. Tahminlere göre, enerji giderleri toplam işletme maliyetlerinin %30'unu oluşturmaktadır. Membran değişim maliyetleri, işletme harcamaları içinde dikkate alınması gereken önemli bir kalemdir. Membran üreticileri, suyun kaynak kalitesine bağlı olarak membranların yaklaşık beş yıllık bir ömre sahip olduğunu belirtmektedir. Ancak, genellikle yalnızca iki veya üç yıllık garanti sağlamaktadırlar. Bu durum, finansal hesaplamalara her iki ila üç yılda bir membran yenileme maliyetinin dahil edilmesini gerektirmektedir (Lipp, 1998).

4.2.1.4 Nanofiltrasyon

NF membranlar, sahip oldukları farklı özellikler sayesinde, askıda bulunan katı maddeler, kolloidal parçacıklar, mikroorganizmalar ve organik bileşiklerin yüksek verimle giderilmesini sağlarken, çözünmüş iyonları da kısmen uzaklaştırarak içme suyu arıtımı için ideal bir seçenek sunar. Geleneksel yöntemlere kıyasla NF membranlar, çeşitli avantajlarıyla öne çıkar. Bu avantajlar arasında:

- 1) daha az yer kaplayan kompakt bir tasarım ve otomasyona uygun yapı,
- 2) farklı türdeki kirleticileri uzaklaştırarak yüksek kaliteli su üretimi
- 3) değişen ham su özelliklerine uyum sağlayabilme yeteneği yer alır.

Ancak, NF teknolojisinin içme suyu üretiminde ne derece etkili olabileceğini tam anlamıyla değerlendirebilmek için işletme maliyetleri, membran kirliliği ve uzun vadeli dayanıklılık gibi unsurların incelenmesi gerekir. (Guo, 2021)

Yapılan araştırmalar, nanofiltrasyonun 0,001 mikron boyutundaki çok küçük partikülleri, çözünmüş tuzları, mineralleri, organik maddeleri, bakterileri, virüsleri ve

yağ emülsiyonları gibi çeşitli kirleticileri uzaklaştırmada oldukça başarılı olduğunu tespit etmiştir. Yine aynı çalışmada, nanofiltrasyon tesislerinin 24 saat kesintisiz çalışabildiği, ilk yıl boyunca, kullanılan nanofiltrasyon membranlarının kalsiyum karbonat (CaCO_3) birikimi nedeniyle performans kaybı yaşadığı gözlenmiştir. Bu sorun, düzenli olarak haftalık yapılan asit temizlik işlemleri ile giderilmiştir. (Wafi, 2019)

Su arıtımı için en verimli ve ekonomik yöntemlerden biri olarak kabul edilen membran ayırma teknolojisinden biri olan nanofiltrasyonun gözenek boyutları genellikle 1-2 nanometre arasındadır. Nanofiltrasyon için işletme maliyeti metreküp başına 0,23 dolar, toplam maliyeti ise metreküp başına 3,21 dolar olarak belirtilmektedir (Yang, 2019). Ayrıca NF süreçleri, her bir metreküp su için yaklaşık 0,92 kWh enerji harcar (Yateh, 2024).

4.2.2 Performans kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında filtrasyon yöntemi seçilirken, performans kriteri dikkate alınması gereken bir diğer unsurdur. Bu kapsamda, kullanılan filtrasyon yönteminin askıda katı madde, doğal organik madde, mikroorganizmalar, demir-mangan gibi çözülmüş metaller ve renk parametrelerinin giderimindeki etkinliği değerlendirilmektedir. Filtrasyon sisteminin bu parametrelerde sağladığı arıtma verimliliği, suyun istenen kalite standartlarına uygunluğunu doğrudan etkileyen en önemli unsurlardan biridir. Filtrasyon yönteminin farklı kirlilik seviyelerine sahip su kaynaklarında tutarlı bir şekilde yüksek performans gösterebilmesi, sistemin değişken su kalitesi koşullarında adaptasyon yeteneği ve arıtma kapasitesi kritik bir değerlendirme konusudur. Özellikle mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi ileri teknolojilerin daha küçük partikülleri ve mikroorganizmaları tutma konusundaki üstünlükleri performans açısından avantaj sağlayabilmektedir. Ayrıca, filtrasyon yöntemlerinin uzun vadeli performans stabilitesi, zamanla tıkanma eğilimleri, bakım ve yenileme gereklilikleri ve arıtma kapasitesindeki olası düşüşler de değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, filtrasyon sistemlerinin giderim verimliliği, işletme koşullarındaki esneklik, işlevsellik sürekliliği ve arıtma kalitesi standartlarını karşılama düzeyi gibi performansla ilgili faktörler dikkate alınmaktadır.

Filtrasyon yöntemi seçim sürecinde performans unsurları, hem kısa vadeli arıtma hedeflerinin sağlanması hem de uzun vadeli su kalitesi ve halk sağlığı açısından

belirleyici bir rol oynamaktadır. Çizelge 4.17'de yer alan puanlamanın oluşturulmasında, farklı filtrasyon yöntemlerinin performans kriterine yönelik değerlendirmelerden elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.2.2.1 Hızlı Kum Filtresi

Filtrasyon, içme suyu arıtımında, özellikle zararlı mikroorganizmaların uzaklaştırılmasında önemli bir aşamadır ve çoklu bariyer yönteminin temel unsurlarından biridir. Su içerisinde bulunan askıda katı maddeler ve diğer partiküller, bakterilerin dezenfeksiyona karşı daha dirençli hale gelmesine neden olur. Bu durum, granüler filtrasyonun etkinliğini artırır, çünkü bu yöntem bu tür maddeleri etkili bir şekilde süzerek dezenfeksiyonun başarısını yükseltir. Geçmişte kum, filtrasyon için en sık kullanılan malzeme olsa da son yıllarda farklı filtre malzemeleri geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

Filtrasyon ve dezenfeksiyon, bir asrı aşkın süredir su arıtma sistemlerinin ana bileşenleri arasında yer almıştır. Su kaynaklarında sıklıkla karşılaşılan bulanıklık, renk değişimi ve zararlı mikroorganizma sorunları, filtrasyon süreçleriyle etkili bir şekilde kontrol altına alınabilir. Filtrasyon işlemi, suyun granüler bir filtre tabakasından geçirilerek askıdaki katı parçacıkların fiziksel yollarla tutulmasını ifade eder. Koagülan kullanımı, daha küçük parçacıkların ve kolloidlerin de tutulmasını sağlayarak filtrasyonun kapsamını genişletir ve suyun berraklığını artırır. Bu süreç, ister arıtma öncesinde ortaya çıkmış olsun, ister doğal kaynaklı olsun, bulanıklık, renk bozukluğu, mikroorganizma ve partikül problemlerini çözmeye odaklanır (Cescon, 2020).

Hızlı kum filtrasyonu, su arıtımında sıklıkla kullanılan ve basit yapısıyla dikkat çeken bir yöntemdir. Filtrasyon hızı, 7,6 ile 9,9 m³/m²/saat arasında değişiklik gösterebilir ve bu, hızlı bir arıtma sürecine olanak tanır. Kum filtrelerinin gözenek boyutu genellikle 4 µm civarındadır ve bu, daha büyük partiküllerin tutulmasında etkilidir. Bu sistemler, oldukça düşük bir işletim basıncına sahiptir (0,2 bar) ve enerji maliyetlerini minimize eder. Ancak, sürekli çalışma süresi 12 saat ile sınırlıdır ve düzenli olarak ters yıkama işlemi yapılması gereklidir.

Ayrıca kum filtreleri protozoaları (4–100 µm) tutabilse de daha küçük boyutlardaki bakteri (0,2–1,0 µm) ve virüsler (0,01–0,1 µm) filtreyi geçebilir ve bunların giderimi için ilave dezenfeksiyon işlemleri gereklidir. Yapılan performans analizleri,

mikrofiltrasyon membranlarının bulanıklık, E. Coli ve mikroplastiklerin gideriminde hızlı kum filtrelerine kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Mikrofiltrasyon membranları, yalnızca daha yüksek bir verimlilik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda hızlı kum filtrelerine kıyasla geri yıkama işlemi için çok daha az miktarda su kullanır. Mikrofiltrasyon ile giderim oranları; E. Coli için %100, bulanıklık için %53–96, toplam askıda katı maddeler (TSS) için %100, organik maddeler için %17–31 ve mikroplastikler için %37–81 arasında değişmektedir. Özellikle bulanıklık ve E. Coli giderim oranları oldukça kararlı ve tutarlıdır (Marsono, 2022).

Yüzey suyu arıtımında askıda kalan maddelerin giderilmesi için genellikle flokülasyon-çöktürme yöntemi tercih edilir ve ardından yerçekimi filtrasyonu uygulanır. Ancak arıtma verimliliğini artırmak ve hem sabit hem de işletme maliyetlerini azaltmak amacıyla geleneksel yerçekimi filtrelerinin ultrafiltrasyon membran üniteleriyle değiştirilmesi önerilmektedir. Kum filtrelerinin etkinliği, debi arttıkça azalır. Buna karşılık, membran ultrafiltrasyonu daha yüksek bulanıklık seviyeleri ya da artan parçacık yoğunlukları ile daha iyi başa çıkmaktadır. Membran ultrafiltrasyonu, kimyasal maddelere duyulan ihtiyacı ve atık çamur oluşumunu azaltarak çevresel etkileri minimuma indirirken uzun vadede ekonomik faydalar sağlayabilir. Genellikle, ham suyu filtrelemek için membran filtrasyonu, granüler organik karbon, derin kum yatakları veya bu yöntemlerin kombinasyonları kullanılabilir. Derin yatak filtrelerinin, içme suyu için ham yüzey suyunu artırırken mikrobiyolojik patojenleri ve askıda maddeleri etkili bir şekilde uzaklaştırabilmesi için kimyasal ön işlemler gereklidir. Ön işlem yapılmadan, derin yatak filtreleri ilk bulanıklığın yaklaşık %28'ini ve Giardia'nın %69'unu giderirken, koagülant-flokülant eklenmesi durumunda Giardia için %95'ten fazla, toplam koliform bakterileri için %99 ve bulanıklık için %70 oranında daha yüksek giderim verimliliği sağlanabilir. Koagülantların doğru dozajı, doğal organik madde (NOM) kimyasal özelliklerine ve konsantrasyonlarına bağlıdır, bu da su arıtma süreçlerinde önemli bir zorluktur. Önceki araştırmalar, NOM'un klorlama sonrası dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir (Katrivesis, 2021).

4.2.2.2 Mikrofiltrasyon

Membran filtrasyon sistemleri, gözenek çaplarının boyutuna bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Daha küçük gözenek çapları, daha yüksek işletme basıncı

gerektirir. Örneğin, nanofiltrasyon çok değerlikli iyonları ayırmada etkiliyken, ultrafiltrasyon büyük organik molekülleri uzaklaştırabilir ve mikrofiltrasyon askıdaki parçacıkları filtreleyebilir. Membranlar genellikle metaller, seramikler veya karbon gibi basınca ve sıcaklığa dayanıklı inorganik maddelerden üretilir.

Mikrofiltrasyon membranları, su arıtımında yaygın olarak kullanılan bir filtrasyon yöntemidir. Bu tür membranlar, $6,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{saat}$ gibi yüksek bir filtrasyon hızına sahiptir. 0,9 bar gibi düşük bir işletim basıncı ile çalışabilen mikrofiltrasyon membranları, enerji tüketimi açısından avantaj sağlar. Ayrıca, bu membranların uzun süreli operasyon kabiliyeti, 48 saatten fazla sürekli çalışmaya olanak tanır ve bakım gereksinimlerini azaltır.

Mikrofiltrasyon (MF) yöntemi, kolloidal maddeleri süspanse etmek amacıyla farklı basınç seviyeleri kullanır ve mikro gözenekli membranlarla çalışır. Bu sistem, genellikle 2 bar'ın altındaki basınçlarla kullanılabilirken hızlı kum filtreleri ise yerçekimi etkisiyle çalışır ve yaklaşık 0,2 bar basınç gerektirir. Kum filtreleri genellikle 12 saatlik çalışma döngüsüne sahipken, membranlar 24 saatten daha uzun süre çalışarak süreklilik sağlar.

Membran teknolojisi hem içme suyu hem de atık su arıtımında önemli gelişmeler göstermiştir. MF sistemleri, özellikle kum filtrelerinden sonra yüzey ve yer altı sularının arıtımı için sıklıkla tercih edilir. Bu membranların gözenek boyutları tipik olarak 0,1 ila 10 μm arasında değişir. MF ve UF (ultrafiltrasyon) membranları, sırasıyla yaklaşık 0,1 μm ve 0,01 μm gözenek boyutlarıyla partikülleri ve mikroorganizmaları etkili bir şekilde ayırır. Geleneksel arıtma sistemlerinden daha üstün olan bu teknolojiler, besleme suyunun kalitesinden bağımsız olarak, bulanıklık seviyesi 0,1 NTU'nun altında olan filtratlar sağlayabilir. Ayrıca, Giardia (5-15 μm) ve Cryptosporidium (3-5 μm) gibi protozoa türlerini etkili bir şekilde giderebilir.

Yapılan araştırmalar sonucunda, mikrofiltrasyon membranlarının kum filtrelerine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur. Özellikle, 0,05 μm gözenek çapına sahip mikrofiltrasyon membranların, Escherichia coli'nin %100'ünü, bulanıklığın %93'ünü ve toplam askıda katıların (TSS) %100'ünü başarılı bir şekilde uzaklaştırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, bulanıklık, partikül madde ve mikropların uzaklaştırılmasında membranları daha avantajlı kılar (Marsono, 2022).

Mikrofiltrasyon (MF), su içerisindeki asılı partikülleri basınç kullanarak ayıran başka bir teknolojidir. MF membranları, katı partiküllerin ve kolloidlerin giderilmesinde etkili olup organik maddelerin yaklaşık %40'ını tutabilir. MF hem organik hem de inorganik kirleticilerle kirlenmiş yeraltı sularını arıtmada etkili bir yöntemdir. Pilot ölçekte yapılan deneyler, MF sistemlerinin sudaki organik maddelerin %84'ünü ve bakterilerin %99'unu giderebildiğini, böylece içme suyu için temiz ve güvenli bir kaynak oluşturduğunu göstermektedir.

Araştırmalar, MF'nin mineralli kaynak sularındaki organik madde ve bulanıklığı azaltabildiğini ortaya koymuştur. Bu yöntem, algler, protozoalar ve bakteriler gibi küçük partikülleri bile ortadan kaldırabilir. MF ve UF membranları, içme suyu arıtımında farklı avantajlar sunmaktadır. Her iki yöntem de bulanıklığı azaltmada başarılı olmanın yanı sıra Giardia ve Cryptosporidium gibi patojenleri ve bazı organik bileşenleri etkili bir şekilde uzaklaştırır. Bu sistemler, su içerisinde askıda bulunan partiküller, virüsler, bakteriler, silt ve organik kirliliklerin giderilmesinde oldukça etkilidir. UF, yeraltı suyunda bulunan kirleticilerin uzaklaştırılmasında üstün performans gösterirken, düşük membran kirlenme oranlarıyla çalışır. MF ise düşük basınçlarda çalışabilen, virüsleri ve mikroorganizmaları etkili bir şekilde temizleyen ekonomik bir seçenektir (Aziz, 2023).

4.2.2.3 Ultrafiltrasyon

Son 20 yılda Ultrafiltrasyon membranları (UF), su arıtma teknolojileri arasında devrim niteliğinde bir yenilik olarak ortaya çıkmış ve geleneksel tekniklere etkili bir alternatif hâline gelmiştir. UF sistemlerinin kompakt yapısı, daha az fiziksel alan gereksinimi ile yatırımcıların ilgisini çekmektedir. Bakteri, virüs, partikül ve kolloidleri etkin bir şekilde ortadan kaldırma kapasitesi sayesinde UF, içme suyu arıtımında tortulaşma ve medya filtrasyonunu tamamen devre dışı bırakma potansiyeline sahiptir. UF'nin en büyük avantajlarından biri, uygun gözenek boyutları ve membran malzemelerinin seçimi ile suyun geçirgenlik kalitesini kontrol edebilme yeteneğidir. Ancak, büyük ölçekli uygulamalarda karşılaşılan en büyük engel, membran yüzeyinde meydana gelen kirlenmenin zorluğudur. Bunun yanı sıra, UF teknolojisi genellikle geleneksel filtreleme yöntemlerine kıyasla daha maliyetli bir seçenek olarak görülmektedir.

UF teknolojisi, çözünmüş organik karbon (DOC) gideriminde geleneksel filtrasyona kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir. Yapılan bir çalışmada ham yüzey

suyundaki DOC miktarının 3,6 mg/L olduğu tespit edilmiş olup UF sistemi DOC miktarını 0,7 mg/L'ye indirirken, geleneksel filtreleme sisteminde bu değerin 2,1 mg/L seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Bu durum önemlidir çünkü DOC, zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna yol açan bir öncü madde olarak kabul edilir. Ayrıca, UF sistemleri kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) gideriminde de üstün bir verimlilik sunmaktadır (Chew, 2016).

Ultrafiltrasyon membranları, daha hassas bir filtrasyon sağlamak amacıyla kullanılan gelişmiş bir teknolojidir. Bu membranların filtrasyon hızı $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{saat}$ olup, mikrofiltrasyona göre daha düşük bir hız sergiler. Ancak, daha küçük gözenek boyutlarına sahip oldukları için ince partikülleri ve çözünmüş maddeleri etkili bir şekilde uzaklaştırabilirler. 2 bar işletim basıncıyla çalışan ultrafiltrasyon membranları, daha yüksek basınç dayanıklıdır. Uzun süreli operasyon süresi ise 24 saat ile sınırlıdır ve genellikle düzenli geri yıkama veya temizleme gerektirir (Marsono, 2022).

Ultrafiltrasyon (UF), gözenek boyutu açısından mikrofiltrasyon ve nanofiltrasyon arasında yer alan bir membran teknolojisidir. Bu yöntem, ilaç üretimi gibi endüstriyel uygulamalardan su arıtımına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yarı geçirgen bir membran sayesinde, basınç altında sıvılar ayrıştırılır ve moleküler boyutlarına göre süzülür. UF teknolojisi, kolloidler, asılı katı maddeler ve virüsler gibi kirleticileri gidererek mikrobiyal kirlenmeyi en aza indirir ve suyun güvenli hale gelmesini sağlar. Araştırmalar, UF membranlarının partiküllerin %99,9'unu giderebildiğini ve çıkış suyu bulanıklığının 0,1 NTU'nun altında olduğunu göstermektedir. UF, toplam koliform bakterilerin 7 log'una kadarını (%99,99999), Giardia lamblia ve Cryptosporidium parvum gibi parazitlerin 4,4-7 log'una kadarını ve MS2 gibi virüslerin 6 log'dan fazlasını etkili bir şekilde yok edebilmektedir. Geleneksel yöntemlere kıyasla UF, daha kararlı ve güvenilir bir su kalitesi sunar. Daha yüksek hassasiyet ve daha etkili bulanıklık giderimi sağlayan bu teknoloji, bakteri, virüs, kimyasal kirleticiler ve Giardia ile Cryptosporidium gibi mikroorganizmaların ortadan kaldırılmasında oldukça başarılıdır. UF ile arıtılan su, ek bir dezenfeksiyon işlemi gerektirmez, çünkü bu süreç patojen içermeyen su üretir. Böylece kimyasal madde kullanımını azaltır, işlemleri basitleştirir ve otomasyon sistemlerine entegrasyonunu kolaylaştırır. Ayrıca, UF sistemleri geleneksel arıtma yöntemlerine kıyasla su ve enerji tüketimini beş kata kadar azaltır ve enerji verimliliği sağlar (Aziz, 2023).

Arıtma etkinliği ve kirleticilerin giderilmesi açısından UF, nehir suyunun içme amaçlı arıtılmasında uygun bir seçenek olduğunu kanıtlamaktadır. UF permeatı, ham suyun partikül ve bulanıklık seviyelerinden bağımsız olarak, 0,2 NTU'nun altındaki bulanıklık ve 2–750 mikron aralığında 10 ila 20 arasındaki partikül sayısı ile sürekli olarak yüksek kalitede kalmaktadır. Kimyasal oksijen ihtiyacı %31–42, çözünmüş organik karbon (DOC) %42–47 ve UV absorbansı %22–29 oranlarında azalarak, toplam organik karbon (TOC) önemli ölçüde düşürüldüğü tespit edilmiştir (Xia, 2004).

4.2.2.4 Nanofiltrasyon

İçme suyu kalitesi, halk sağlığı için kritik öneme sahiptir ve bunu artırmak, sadece ulusal su kalitesi standartlarını karşılamının ötesindedir. Dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) ve iz seviyedeki organik kirleticiler, arıtılmış suyun temel temizlik kriterlerini karşılamasına rağmen, su kalitesini artırma çabalarında büyük engeller oluşturmaktadır. Geleneksel arıtma yöntemlerine karşı direnç gösteren organik kirleticiler ve DBP öncülleri için su kalitesinin daha da iyileştirilmesi amacıyla genellikle gelişmiş arıtma tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

UF ünitesinden geçen ham sudaki bulanıklık %88,6 oranında azaltılabilmektedir. Küçük gözenek boyutlarına sahip olan NF membranları, organik maddeleri ve çok değerlikli iyonları ham sudan daha etkili bir şekilde arıtmaktadır. NF işleminden çıkan su, %90 su geri kazanımı ile birlikte iletkenlik, kimyasal oksijen ihtiyacı ve sertlik gibi parametrelerde belirgin bir iyileşme göstermiştir. UF ve NF membranlarının kombinasyonu ile membranların tıkanmasının önüne geçilebileceği ve kimyasal tüketimin düşük seviyelerde tutulabileceği gözlenmiştir. NF membranının işletme maliyetlerinin su başına 0,165 - 0,179 ABD doları arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, UF + NF kombinasyonunun su arıtma tesislerinde gelişmiş arıtma süreçleri için uygun olduğunu göstermektedir (Chen, 2023).

Yapılan bir araştırmada NF permeatının bulanıklık seviyesi sürekli olarak düşük seviyelerde kalmış ve 0,2 NTU'nun altında seyretmiştir. Buna karşın, iletkenlik değeri sabit olmasına rağmen görece yüksek bir aralıkta, 48 ila 55 mS/cm arasında gözlemlenmiştir. NF membranları, kalsiyum ve magnezyum gibi çok değerlikli iyonları etkin bir şekilde uzaklaştırırken, sodyum ve klorür gibi tek değerlikli iyonların tutulmasında aynı başarıyı gösteremediği gözlenmiştir (Fujioka, 2021). Ayrıca başka bir çalışmada da Nanofiltrasyon uygulanmış su ile kontrol musluk suyu örnekleri

arasında mikrobiyolojik açıdan kayda değer bir fark gözlemlenmediği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen nanofiltrasyon işlemi hem DNA hem de hücre dışı DNA formlarındaki toplam bakterileri %98'in üzerinde, hedeflenen direnç genlerini ise %99,99 oranında uzaklaştırmayı başarmıştır (Oliveira, 2022).

Suda mikrobiyal büyüme potansiyelini azaltmada nanofiltrasyonun (NF) etkinliğini değerlendirebilmek için, düşük molekül ağırlıklı biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerin giderim başarısını anlamak kritik öneme sahiptir. NF, doğal organik madde (NOM) gideriminde yüksek bir performans sergilemiş, çözünmüş organik karbonun (DOC) %85'ten fazlasını ve UV absorpsiyonunun %92'den fazlasını ortadan kaldırmıştır (Vrouwenvelder, 2024).

4.2.3 İşletme kolaylığı hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında filtrasyon yöntemi seçilirken, işletme kolaylığı kriteri de dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda, kullanılan filtrasyon yönteminin günlük işletme ve yönetim süreçlerindeki pratikliği, personel gereksinimi, sistemin otomasyon düzeyi ve kullanım kolaylığı değerlendirilmektedir. Filtrasyon sisteminin karmaşıklık düzeyi, operatörlerin teknik bilgi gereksinimi ve bakım süreçlerinin kolaylığı, işletme kolaylığı açısından en önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Buna ek olarak, filtrasyon yönteminin düzenli bakım ve temizlik gereklilikleri, ekipmanların arıza durumunda hızlıca onarılabilme kapasitesi ve yedek parça temininde yaşanabilecek zorluklar kritik bir değerlendirme konusudur. Özellikle mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi ileri teknolojilerde, daha karmaşık sistemlerin gerektirdiği detaylı bakım ve işletme süreçleri, daha fazla uzmanlık ve zaman gerektirebilir. Buna karşın, hızlı kum filtreleri gibi daha geleneksel yöntemler, genellikle daha kolay işletim süreçlerine sahip olabilmektedir. Filtrasyon sistemlerinin çalışma süresince oluşabilecek tıkanıklık problemlerine müdahale edebilme kolaylığı, sistemin arıza durumlarında hızlı bir şekilde devreye alınabilmesi ve işletim sırasında çevresel veya teknik faktörlerden etkilenme düzeyi de işletme kolaylığı açısından önemli faktörlerdir. Bu bağlamda, filtrasyon sistemlerinin otomasyon entegrasyonu, bakım sıklığı, personel ihtiyacı ve işletme sırasında kullanıcı dostu olma düzeyi gibi unsurlar işletme kolaylığı kriteri kapsamında değerlendirilmiştir.

Filtrasyon yöntemi seçim sürecinde işletme kolaylığı unsurları, sistemin sürdürülebilir işletim koşullarını sağlaması ve günlük operasyonel süreçlerde verimlilik açısından

belirleyici bir rol oynamaktadır. Çizelge 4.17’de yer alan puanlamanın oluşturulmasında, farklı filtrasyon yöntemlerinin işletme kolaylığı kriterine yönelik değerlendirmelerden elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.2.3.1 Hızlı kum filtresi

Filtreler, çalışma biçimlerine göre de sınıflandırılabilir: sürekli çalışan sistemler veya yarı sürekli çalışan sistemler. Yarı sürekli sistemler, geri yıkama sırasında devre dışı bırakılmayı gerektirir ve en sık kullanılan türdür. Filtrasyon süreci, yerçekimi etkisiyle çalışan hızlı yerçekimi filtrasyonu veya basınç uygulanarak gerçekleştirilen basınç filtrasyonu şeklinde uygulanabilir. Her iki yöntem de yalnızca fiziksel ayırma prensibine dayanır ancak kullanılan kap tipleri, filtrasyon hızları ve gerekli basınç miktarları bakımından birbirlerinden ayrılır. Basınçlı filtreler, yerçekimi sistemlerine göre çok daha yüksek akış hızları sağlayabilir.

Geçmişte, yavaş kum filtresi en eski filtrasyon yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu sistem, biyolojik faaliyetlerle fiziksel süzme işlemini bir arada kullanır. Ancak zamanla, yavaş kum filtreleri yerini hızlı kum filtrelerine bırakmıştır. Bunun temel nedenleri arasında, yavaş kum filtrelerinin yeterli miktarda su arıtabilmesi için büyük alan ihtiyacı ve düşük filtrasyon hızları yer alır. Bu düşük hız, kullanılan kum tanelerinin küçük boyutundan kaynaklanmaktadır. Tüm bu dezavantajlara rağmen, yavaş kum filtrasyonu, protozoa kaynaklı patojenleri etkili bir şekilde uzaklaştırması nedeniyle, özellikle küçük yerleşim yerlerinde yeniden ilgi görmüştür. Basınçlı filtreler küçük ölçekli tesislerde sınırlı ölçüde kullanılmakla birlikte, yerçekimi filtreleri su arıtma sürecinde daha yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Hızlı yerçekimi filtrasyonu, tek bir filtreleme materyaliyle veya farklı materyallerin bir arada kullanıldığı bir yapılandırma ile uygulanabilir. Bu yöntem, yavaş kum filtrasyonuna kıyasla çok daha yüksek akış hızlarında çalışabilmesi nedeniyle belirgin bir avantaj sunar.

Filtrenin performansını izlemek için akış hızı, basınç kaybı artışı ve çıkış suyunun kalite özellikleri (örneğin bulanıklık) düzenli olarak değerlendirilmelidir. Filtrasyon hızları, kullanılan filtre tipine, filtre malzemesine, tesisin özelliklerine ve ham suyun kalitesine göre değişiklik göstermektedir. Kaba taneli filtre yatakları genellikle 6–8 m/s hızında çalışırken, suyun kalitesi sürekli yüksekse çift katmanlı filtrelerde bu hız 12–15 m/s’ye kadar çıkabilir. Ani akış hızı değişimlerinden kaçınılmalıdır, çünkü bu

durum, filtre yatağında biriken maddelerin yerinden oynayarak çıkış suyuna karışmasına ve su kalitesinin düşmesine neden olabilir. 15 m/s'yi aşan hızlarda su kalitesi genellikle bozulurken, 20 m/s'yi geçen hızlar hızlı bir basınç kaybına yol açabilir. Sabit akış hızına sahip filtrasyon, giriş veya çıkış akışının kontrol edilmesiyle sağlanabilir. Filtreler genellikle belirli bir çalışma süresinin ardından (24 ila 60 saat arasında) ya da bulanıklık belirli bir eşiğe ulaştığında geri yıkanır. Bununla birlikte, operasyonel güvenlik öncelikli olduğu için, filtreler kritik arızaya yaklaşımdan önce geri yıkama süreci başlatılmalıdır (Cescon, 2020).

Kum filtrelerinin dezavantajları arasında, temizleme sürecinde yüksek miktarda suya ihtiyaç duyulması, filtreleme kalitesinin istikrarsız olması ve 0,01 mm'den küçük mikroorganizmaların engellenememesi bulunur. Membran teknolojisi, daha kompakt bir yapıya sahip olması ve yüzey alanının hacme oranının daha yüksek olması gibi avantajlarıyla bu sorunları aşabilir (Marsono, 2022).

4.2.3.2 Mikrofiltrasyon

Hem mikrofiltrasyon hem de ultrafiltrasyon süreçlerinde, su, organik ve inorganik kirliliklerden arındırılmak için mikroskobik gözeneklere sahip bir membran aracılığıyla geçirilir. Mikrofiltrasyon membranlarının gözenek boyutları 0,1 ila 10 mikron arasında değişirken, ultrafiltrasyon membranları çok daha ince, 0,001 ile 0,1 mikron arasında bir aralığa sahiptir. Mikrofiltrasyon, tüm virüsleri temizlemese de bakterileri, bazı virüsleri ve Giardia ile Cryptosporidium gibi parazitleri etkili bir şekilde ortadan kaldırır.

Mikrofiltrasyon, yağ ve su karışımlarını ayırma, meyve suları, şarap ve bira gibi içecekleri temizleme, ilaç ve içecekleri sterilize etme ve ters ozmoz ve nanofiltrasyon gibi ileri arıtma işlemleri için su hazırlama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır. Ultrafiltrasyon ise 0,001 ile 0,1 mikron arasındaki tüm patojenleri, virüsleri ve askıda partikülleri giderme yeteneğine sahiptir. Bu yöntem, boya üretimi, yağ-su karışımlarının ayrılması, gıda işleme ve tekstil sektörlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Dore, 2014).

Filtrasyon kapasitesi, filtrasyon hızı, çalışma süresi ve basınç gibi faktörlerden etkilenirken, gözenek boyutunun dolaylı etkisi de göz önüne alınmalıdır. Ayrıca yüzey alanının hacim oranına oranla daha geniş olması genel verimliliği artırır. Örneğin, mikrofiltrasyon kullanılan bir tesiste filtrasyon oranı 0,9 ila 0,7 bar emiş basıncıyla 6,5

$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{saat}$ olarak ölçülürken hızlı kum filtresi için kaydedilen $9,9 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{saat}$ ve $7,6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{saat}$ oranlarının gerisindedir. Ancak, membranlar daha uzun çalışma süreleriyle bu farkı telafi eder; granüler filtrelerden yaklaşık 1,5 kat daha uzun süre etkinlik gösterir. Bu nedenle, membran sistemleri geleneksel filtrelere göre daha yüksek bir verimlilik sunmaktadır (Marsono, 2022).

Mikrofiltrasyon, suyun arıtılmasında önemli avantajlar sunan bir yöntemdir. Bu sistem, mikroorganizmaları, partikülleri ve bazı virüsleri etkili bir şekilde filtreleyerek suyu daha güvenli ve temiz hale getirir. Düşük işletme maliyetleri ve az bakım gereksinimiyle ekonomik bir seçenek sunar. Çevre dostu bir teknoloji olan mikrofiltrasyon, enerji tasarrufludur ve kimyasal kullanımını ortadan kaldırır. Kompakt tasarımı, dar alanlar için ideal bir çözüm sunar ve karmaşık bir kullanım gerektirmediğinden kullanıcı dostudur. Ayrıca, suyun bulanıklığını ve rengini azaltarak estetik görünümünü iyileştirir. Çeşitli amaçlar için uygun olan bu yöntem, sanayi proseslerinden atık su arıtımına ve içme suyu temizliğine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Teknoloji, farklı ihtiyaçlara uyacak şekilde ölçeklendirilebilir ve ters ozmoz ya da iyon değişimi gibi sistemlerle entegre edilerek performansı artırılabilir.

Bununla birlikte, mikrofiltrasyonun bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çözünmüş organik maddeler gibi bazı kirleticiler üzerinde yetersiz kalabilir ve ek arıtma süreçlerine ihtiyaç duyulabilir. Daha büyük parçacıkların arındırılması için ön işlem gerekmesi durumunda maliyetler artabilir. Membranlarda biriken kir, sistemin verimliliğini düşürebilir ve daha fazla bakım ihtiyacını doğurabilir. Bakım eksikliği, bakterilerin çoğalmasına ve suyun kirlenmesine neden olabilir. Bunun yanında, suyun lezzetini ve kokusunu etkileyen çözünmüş gazlar ya da minerallerin uzaklaştırılmasında sınırlı kalabilir. Organik içeriği yüksek olan su, tıkanmaya yol açarak yöntemi bu tür durumlar için elverişsiz hale getirebilir. Ayrıca, belirli minerallerin ve çözünmüş maddelerin tamamen giderilememesi, ilave arıtma yöntemlerinin gerekliliğine işaret eder. Büyük ölçekli uygulamalar ya da yoğun kullanım gereksinimleri için kurulum ve işletme maliyetleri yüksek olabilir. Membranların zamanla aşınması, düzenli olarak değiştirilmesini gerektirir ve bu da sistemin ömrünü etkiler. Mikrofiltrasyon tek başına her türlü mikroorganizmayı ya da virüsü tamamen yok edemeyebileceğinden, tam bir arıtma sağlamak için ek yöntemlere başvurulması gerekebilir (Aziz, 2023).

4.2.3.3 Ultrafiltrasyon

Arıtma sürecinde elde edilen suyun tüm kalite standartlarını karşılamasını sağlamak, özellikle yüzey sularındaki kirlilik dikkate alındığında, ciddi bir sorun teşkil etmektedir. Geleneksel arıtma yöntemleri, özellikle azot türevlerini ve çözünmüş organik maddeleri etkili bir şekilde ortadan kaldıramaması nedeniyle içme suyu güvenliğini tam anlamıyla sağlayamamaktadır.

Düşük basınçla çalışan ve katı-sıvı ayrımında üstün performans gösteren bir membran yöntemi olan Ultrafiltrasyon (UF), büyük ölçekli su arıtma tesisleri için oldukça umut vaat eden bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ancak UF'nin temel dezavantajı, membran yüzeyinin kolayca kirlenmesidir. Bu problemi minimize etmek için UF öncesinde gelişmiş ön arıtma yöntemlerinin uygulanması kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, UF'nin çözünmüş organik maddeleri (DOM) giderme konusundaki sınırlı başarısı, arıtma sürecinin etkinliğini olumsuz etkileyebilir. DOM'un etkili bir şekilde giderilmesini sağlayabilecek ileri düzey bir ön işlem, UF ile entegre çalışabilecek hibrit sistemlerin geliştirilmesi açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Her ne kadar UF ve mikrofiltrasyon gibi membran teknolojileri suyun içerisindeki partikülleri ayırma konusunda oldukça başarılı olsa da, amonyağı uzaklaştırma konusunda sınırlı bir performansa sahiptir. Bu durum, kapsamlı bir arıtma sürecine ulaşmada ek bir engel olmaktadır (Liu, 2017).

Bununla birlikte, UF sistemi birçok avantaja sahiptir. Yüksek kalitede filtrat üretme kapasitesine sahiptir, az yer kaplar, çevre dostu çamur üretir ve otomasyon seviyesi yüksek olduğu için insan müdahalesine minimum düzeyde ihtiyaç duyar. Geleneksel medya filtrasyon sistemleri ise ham su kalitesindeki değişimlerden olumsuz etkilenir ve tutarlı bir filtrat kalitesini sağlamakta zorlanır. Bu sistemlerde çökelme ve filtrasyon için koagülanların doğru şekilde dozlanması kritik öneme sahiptir. Ancak bu koagülanlar, ağır metal kalıntıları bırakır ve çamurun çevreye zarar verme potansiyelini artırır. UF sistemi, koagülan kullanımına ihtiyaç duymadan yüksek kalitede filtrat sağlayabildiği için daha sürdürülebilir bir alternatif sunar. Bu farklılıklar, özellikle kentsel alanlarda, arazi ve maliyet kısıtlamalarının önemli olduğu içme suyu arıtma projelerinde karar vericiler için büyük bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, UF sistemi daha yüksek işletme ve bakım maliyetleri gerektirse de alan

tasarrufu, filtrat kalitesi ve çevresel etkiler açısından sunduğu avantajlar, onu kentsel su arıtma tesisleri için güçlü bir seçenek haline getirmektedir (Chew, 2016).

UF sistemlerinin belirgin iki avantajı vardır. İlk olarak, yüzey bazlı filtreleme mekanizması, geleneksel yöntemlerdeki koagülasyon ve flokülasyon süreçlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve kimyasal kullanımını yaklaşık %43 oranında azaltır. İkinci olarak, UF membranlarının temizlenmesi, geleneksel berraklaştırıcılar ve kum filtreleri gibi sistemlerin bakımına kıyasla %46 daha düşük maliyetlidir. Ancak dezavantaj olarak, UF sistemleri daha gelişmiş otomasyon ekipmanları gerektirir ve bu ekipmanların bakımı, geleneksel sistemlerdeki manuel işlemlerle karşılaştırıldığında %210 daha fazla maliyetlidir.

Su kaynaklarının sınırlı olduğu yerlerde, arıtma sistemlerinden kaynaklanan su kayıplarının başlıca nedenleri membran temizliği ve çamur deşarjıdır. Geleneksel sistemler %6,6 oranında su kaybına neden olurken, UF sistemlerinde bu oran yaklaşık %11'e çıkmaktadır. Ayrıca, sistemden çıkan çamurun ve askıda katı maddelerin bileşimi önemli bir endişe kaynağıdır. Örneğin, alüminyum çamurunun işlenmesi ve bertaraf edilmesi, geleneksel kum filtreleriyle çalışan su arıtma tesislerinde işletme maliyetlerini m³ başına 0,05 € artırabilir. Çevresel etkilerin azaltılmasını hedefleyen sürdürülebilir su arıtma uygulamaları, uzun vadede ekonomik kazanç sağlayabilir.

Avantajlarına rağmen, UF teknolojisiyle ilgili sınırlı bilgi birikimi ve daha düşük başlangıç maliyetleri nedeniyle geleneksel yöntemler hala yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, membran filtreleme yöntemleri organik ve inorganik parçacıkları, bakteri, protozoa ve virüslerin çoğunu etkili bir şekilde uzaklaştırdığı için, içme suyu standartlarını karşılamak adına güvenilir bir seçenek sunar. Ayrıca, membran sistemlerinin değişken bulanıklık seviyelerine sahip suları işleme kabiliyeti ve daha az alan gereksinimi, onları su sağlayıcılar için giderek daha cazip hale getirmektedir. Membran teknolojilerinin maliyet avantajı arttıkça, geleneksel yöntemlere güçlü bir alternatif haline gelmektedir (Katrivesis, 2021).

Organik kirleticiler, yosunlar ve siyanobakterilerin uzaklaştırılmasında etkili olan Ultrafiltrasyon yönteminin sunduğu avantajlar, onu geleneksel arıtma yöntemlerine göre daha cazip ve etkili bir alternatif haline getirir:

- Daha basit işlem süreçleri ve kompakt tasarımlar.

- Kimyasal kullanımını optimize eden ve işletme maliyetlerini düşüren otomasyon imkanları.
- Farklı su özelliklerine uyum sağlama yeteneği.
- Mikroorganizmaların ve diğer kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılması.
- Kötü koku oluşumunun ve THM gibi yan ürünlerin oluşum riskinin azaltılması.
- Daha az çamur üretimiyle, genel su geri kazanım oranlarının artırılması.
- Modüler tasarımlar sayesinde kolay genişleme imkânı ve arızalara karşı daha dayanıklı sistemler.
- Geleneksel yöntemlere kıyasla UF, daha tutarlı su kalitesi sağlar, kimyasal tüketimini azaltır ve çevre dostu, ekonomik bir seçenek sunar (Cuartucci, 2020).

4.2.3.4 Nanofiltrasyon

Su arıtımında yaygın olarak kullanılan membran teknolojileri arasında mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (RO) bulunmaktadır. Bu membranlar, filtreledikleri moleküllerin boyutuna göre farklı ayırma mekanizmalarına sahiptir. UF membranları, büyük partiküller, kolloidler, bakteriler ve virüsler gibi makromolekülleri suyun içinden geçirebilir. NF membranları ise UF ve RO membranlarının gözenek boyutları arasında yer alır ve nanoskalada küçük partikülleri filtreleyebilir. Ayrıca, NF membranlarının yüzeyinde bir yük bulunması, yüklü maddelerle etkileşime girmelerine olanak tanır. NF membranlarının etkinliği, arıtılacak maddelerin moleküler büyüklüğüne, kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) gibi iyonların tutulmasında etkili olan yüzey potansiyeline bağlıdır.

NF membranlar, suyun içindeki küçük organik maddeleri ve inorganik iyonları etkili bir şekilde uzaklaştırmalarına rağmen, yüksek adsorpsiyon kapasiteleri nedeniyle mikrobiyal büyümeye eğilimli olabilir. Biyofilm membran yüzeyine yerleştiğinde, kimyasal temizlik işlemleri bile bu birikintiyi tamamen ortadan kaldıramaz ve bu durum, uygun ön arıtma yapılmadığı takdirde membranların verimliliğini ve ömrünü önemli ölçüde düşürebilir.

Buna karşın, UF membranları, daha büyük gözenek boyutları, düşük basınç gereksinimleri ve enerji tüketimindeki azalma sayesinde, kirlenmeye karşı daha

dirençlidir ve bu nedenle NF membranlara kıyasla daha avantajlıdır. Bu nedenle, UF ve NF teknolojilerinin birleşimi, su kalitesi ve güvenliğine dair artan talepleri karşılamak için su arıtma tesislerinde gelişmiş arıtma çözümleri arasında tercih edilen bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. UF + NF sisteminin entegre yapısında; UF ünitesi için her saatte bir hidrolik geri yıkama yapılması ve temizlik döngüsünün 40 ile 60 saniye arasında değişmesinin uygun olacağı öngörülmüştür. Kimyasal geri yıkamanın ise her üç ila yedi günde bir gerçekleştirileceği kabul edilmiştir. NF membranlarının temizlenmesi için kimyasal temizliği her 24 saatte bir yapılmaktadır. NF sistemi için ön arıtma işlemi olarak, yaygın olarak kullanılan ticari bir UF membranı kullanılır. UF ünitesinde temizlik için sodyum hidroksit (500 mg/L), sodyum hipoklorit (200 mg/L) ve sitrik asit (2000 mg/L) çözeltileri tercih edilirken, NF ünitesinde sodyum hidroksit ve sitrik asit solüsyonları kullanılmaktadır. Ayrıca, NF ünitesine fazla klor girmesini engellemek için UF ünitesinde polialüminyum klorür (0,2 mg/L) flokülant olarak, NF ünitesinde ise klor seviyesini kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak amacıyla sodyum bisülfid (1 mg/L) solüsyonu kullanılmaktadır. UF sisteminin uzun süreli verimliliğini izlemek için, UF membranının transmembrane basıncının (TMP), her yedi günde bir kimyasal temizlik sonrası kontrol edildiği belirtilmiştir (Chen, 2023).

4.2.4 Atık yönetimi hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında filtrasyon yöntemi seçilirken, atık yönetimi kriteri dikkate alınması gereken temel unsurlardan biridir. Bu kapsamda, kullanılan filtrasyon yönteminin işlem sürecinde oluşturduğu atık miktarı, bu atıkların bertaraf edilme yöntemleri ve çevreye olan etkileri değerlendirilmektedir. Filtrasyon sırasında oluşan atık su, çamur ve diğer yan ürünlerin güvenli bir şekilde yönetilmesi, sistemin çevresel sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Filtrasyon yönteminin ürettiği atık miktarının minimize edilmesi, oluşan çamurun fiziksel ve kimyasal özellikleri, bu çamurun depolanması, taşınması ve bertaraf edilmesi sırasında ortaya çıkan lojistik gereksinimler önemli bir değerlendirme konusudur. Özellikle mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon gibi ileri teknolojilerde, yoğunlaştırılmış atık akışlarının yönetimi daha fazla dikkat gerektirebilirken, hızlı kum filtreleri gibi geleneksel yöntemlerde atık miktarı genellikle daha düşük olabilir. Filtrasyon sürecinden sonra oluşan atıkların geri dönüştürülebilirliği, bu atıkların bertaraf edilmesi sırasında çevresel etkilerin minimize edilmesi ve bertaraf maliyetleri gibi faktörler de atık yönetimi açısından dikkate alınmaktadır. Bu bağlamda, filtrasyon

sistemlerinin oluşturduğu atık hacmi, bertaraf süreçlerinin çevresel etkisi, atık yönetim maliyetleri ve geri dönüşüm potansiyeli gibi unsurlar atık yönetimi kriteri kapsamında değerlendirilmiştir.

Filtrasyon yöntemi seçim sürecinde atık yönetimi unsurları, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de uzun vadeli operasyonel verimlilik açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. Çizelge 4.17’de yer alan puanlamanın oluşturulmasında, farklı filtrasyon yöntemlerinin atık yönetimi kriterine yönelik değerlendirmelerden elde edilen bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.2.4.1 Hızlı kum filtresi

Hızlı kum filtrelerinde filtre temizliği gerçekleştirilirken, ters akış yöntemiyle sisteme temiz su verilir. Bu işlemde, suyun akışkanlığı belirgin bir etkiye sahiptir ve sıcaklık değişimleri de dikkate alınması gereken bir faktördür. Akış hızının gereğinden fazla olması, gereksiz su tüketimine ve filtre malzemesinin kaybına neden olabileceği için, doğru geri yıkama hızını korumak hayati önem taşır. Geri yıkama sırasında kullanılan su miktarı genellikle filtre yatağının hacminin yaklaşık 2,5 katıdır ve bu süreçte filtrasyon suyu ve basınç arasında bir denge sağlanmalıdır. Yetersiz geri yıkama hızı filtre yatağında etkisiz temizliğe yol açarak, çamur birikintileri, çatlaklar, kanallaşma ya da sıkışmalar gibi sorunlara neden olabilir.

Hava ve suyun bir arada kullanıldığı geri yıkama işlemi oldukça etkili bir yöntem olarak öne çıkmakla birlikte, hava kullanımı sırasında dikkatli olunmalıdır. Uygunsuz uygulamalar filtre yatağının yapısal düzenini bozabilir ve ortam kayıplarına yol açabilir. Homojen kum yataklarında, yeterli akışkanlık sağlamak için uygun su akış hızıyla (4-6 dakika) ve hava yıkamasıyla (3-4 dakika) gerçekleştirilen geri yıkama yöntemi, hızlı yerçekimi filtreleri için yaygın olarak önerilmektedir.

Bazı çalışmalar, su akış hızının 10-30 m/saat, hava akış hızının ise 50-80 m/saat arasında olması gerektiğini belirtirken, diğer kaynaklar bu değerleri 7-25 m/saat (su) ve 23-58 m/saat (hava) olarak önermektedir. İlk geri yıkama işlemleri sırasında filtre yatağından ince parçacıkların uzaklaşması olağandır ve bu durum, akış hızlarında veya prosedürlerde düzenlemeler yapılmasını gerektirebilir. Bu etkileri azaltmak için yatağın derinliğine 30-50 mm ek malzeme konulması önerilmektedir. Antrasit veya granül aktif karbon (GAC) gibi malzemeler, aşınma dayanımları daha düşük olduğundan, genellikle daha fazla ortam kaybına neden olmaktadır. Eğer bu tür

kayıplar birkaç döngü sonrasında devam ederse, geri yıkama hızlarının fazla olduğu veya filtre malzemesinin yeterince dayanıklı olmadığı anlamına gelebilir.

Granül aktif karbon (GAC), geniş yüzey alanı, gözenekli yapısı ve organik moleküllere olan yüksek bağlanma kapasitesi sayesinde geleneksel filtreleme malzemelerine güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, organik kirleticileri gidermek için genellikle standart filtrasyon işlemlerinden sonra ek bir adım olarak kullanılır. Kum ve GAC'nin bir arada bulunduğu çift ortam filtrelerinin, partikülleri ve organik kirleticileri gidermedeki etkinliği üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Örneğin, tipik bir içme suyu arıtma tesisinde fenol giderimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla üç farklı kum-GAC kombinasyonu ve iki farklı GAC türü (bitkisel ve mineral kaynaklı) incelenmiştir. Bu çalışma, kum ve GAC'nin birleşiminden oluşan çift ortam filtrelerinin toplam organik karbon (TOC) ve fenol gideriminde üstün sonuçlar sağladığını göstermiştir. GAC filtreleri, TOC için %80 ve fenoller için %99 gibi yüksek giderim oranlarına ulaşırken, yalnızca kum kullanılan sistemde bu oranlar sırasıyla %26 (TOC) ve %10 (fenol) olarak kaydedilmiştir. En iyi arıtma performansını elde etmek için her uygulama özelinde çalışma koşullarının dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir. GAC'nin adsorpsiyon kapasitesi; suyun özellikleri, temas süresi, filtre yatağının derinliği ve kullanılan adsorban miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Cescon, 2020).

4.2.4.2 Mikrofiltrasyon

Hem derin yatak hem de membran filtrasyon sistemleri, çamur arıtma ve temizlik işlemleri için önemli miktarda suya ihtiyaç duyar. Granül filtreleme sistemleri, ham suyun %4'üne kadar kayba yol açabilir, ayrıca derin filtrelerin geri yıkama işlemi, ham suyun %2 ila %3'ünü kullanabilir. Membran sistemlerinde ise hem çamur hem de kimyasal atıklar oluşur. Geri yıkama suyu, çamurun bir parçası olarak, genellikle giriş akışından daha yoğun olur. Çamur miktarı, besleme suyu kalitesine, kimyasal ön işleme ve kullanılan berraklaştırma adımına bağlı olarak değişkenlik gösterir ve giriş suyunun %2 ila %10'u arasında olabilir. Bu çamurun yoğunluğu, kum yataklı filtrelerden elde edilen yıkama suyuna benzer.

Su temizleme gerekliliği, ham sudaki askıda kalmış parçacık türüne bağlı olarak değişir. Filtrenin performansı ve ömrü üzerinde etkili olan sık ve yoğun geri yıkama işlemi, kullanılan malzeme türü ve yıkama suyunun sıcaklığı göz önünde

bulundurularak dikkatlice yapılmalıdır. Bu işlemlerin atık yönetimi, atık üretimini azaltmaya yönelik sürdürülebilir çözümlerle ele alınması gereken önemli bir çevresel sorundur.

Filtrasyon işlemi ilerledikçe, kirlenme nedeniyle suyun akış hızı azalır. Kirlenme artışı, suyun fiziksel ve kimyasal bileşimi, bulanıklık düzeyi ve filtrenin çalışma süresi gibi etmenlerle tetiklenebilir. Bununla birlikte, membranın özellikleri, özellikle su ile olan temas açısı, yüzey potansiyeli, hız ve gözenek boyutu, kirlenmeyi etkileyen en önemli faktörlerdir. Membran yüzeyinin hidrofilik olduğu, yani suyla temas açısının küçük olduğu durumlar, kirlenmeye daha yatkın olduğunu gösterir. Membran üretiminde kullanılan polimerlerin çoğu hidrofobik olup, bu özellikleri nedeniyle proteinler gibi hidrofobik maddelerle etkileşimde bulunarak membran yüzeyinde kirlilik tabakaları oluşturur ve verimliliği düşürür (Katrivesis, 2021). Membran yüzeyinde kir birikimi, emme basıncındaki düşüşle birlikte akış hızında azalmaya yol açar (Marsono, 2022).

Kirlenmenin önlenmesi ve kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi, birçok araştırmanın odak noktası olmuştur. Araştırmacılar, düşük maliyetli yerinde temizleme (CIP) süreçleri ve fiziksel temizlik yöntemleri (örneğin, ters yıkama ve hava kabarcığıyla temizlik) üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, yüzey yapısında değişiklikler yapılarak kirlenmeye dirençli membranların tasarlanması üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Kirlenmeyi azaltmak ve daha iyi yönetmek için, besleme ara elemanlarının yapılandırılması ve ön arıtma tekniklerinin optimize edilmesi de önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Matematiksel modeller, membran performansı üzerindeki kirlenme etkilerini tahmin etmek ve kirlenme süreçlerini anlamak adına kritik bir araç olmuştur (Jafari, 2021).

Liu (2021) yaptığı çalışmada NF membranının uygulama sahasında iki ana avantajı olduğunu bulmuştur. İlk olarak, içme suyundaki monomoleküler ve mikromoleküler organik kirleticileri başarılı bir şekilde uzaklaştırır. İkinci olarak, Na, K gibi yararlı mineralleri ve eser elementleri korurken, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} ve NO_3^- gibi iyonları elimine ederek suyun sertliğini önemli ölçüde azaltır. Ancak, NF membranı zamanla kir birikimine maruz kalır ve bu da performansını düşürür. Ham suyun kalitesindeki dalgalanmalar nedeniyle oluşan bu kirliliği önlemek için, su NF sistemine girmeden önce çözünmeyen maddeler etkili bir şekilde filtrelenmelidir. Bu işlem, düşük

maliyetli, uzun ömürlü ve tutarlı filtreleme performansı sunan polipropilen (PP) filtreler gibi yüksek hassasiyetli filtrelerin kullanıldığı MF sistemi ile sağlanır.

MF (mikrofiltrasyon) sisteminde geri yıkama işlemi, sistemin verimli çalışmasını sağlamak için belirli parametrelerle gerçekleştirilir. Geri yıkama işlemi, hava ve su kullanılarak yapılır. Hava geri yıkama basıncı 0,2 MPa olarak ayarlanmıştır. Su geri yıkama debisi ise saatte 1 m³ olarak belirlenmiştir. Hava geri yıkama debisi ise saatte 2 m³'tür. Bu işlem, belirli aralıklarla yapılır ve geri yıkama aralığı 12 ila 24 saat arasında değişir. Geri yıkama süresi ise her seferinde 2 dakika olarak uygulanır. Bu parametreler, filtrasyon sisteminin uzun süreli verimli çalışmasını ve tıkanmaların önlenmesini sağlamak amacıyla optimize edilmiştir.

NF sistemi, 5 bar altındaki bir giriş basıncıyla çalışır. Gelişmiş su arıtma projelerinde, ultrafiltrasyon (UF) sistemleri genellikle NF öncesinde bir arıtma aşaması olarak tercih edilir. UF sistemi, kum filtrelerinden geçen suyun bulanıklığını ve olası kum filtresi arızalarında geride kalan partikülleri de yakalar. Böylelikle NF membranı ciddi kirlilik veya aşınmalardan korunmuş olur. Pilot araştırmalar, ham su kalitesinin yüksek olduğu durumlarda basınçlı kap MF sisteminin UF sisteminin yerine geçerek NF ön işlem ünitesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu sistem, düşük kurulum maliyetleri ve kolay geri yıkama işlemi sayesinde daha düşük işletme maliyetleriyle benzer işlevsellik sunar. Sistem, su veya kimyasal maddelerle kolayca geri yıkama yapabilme özelliğine sahiptir.

MF (mikrofiltrasyon) sisteminin çalışma parametreleri, sistemin etkinliğini ve verimliliğini sağlamaya yönelik olarak belirli aralıklarla yapılan temizlik işlemlerini içerir. Fiziksel temizlik işlemi en az 24 saatte bir yapılırken, kimyasal temizlik sıklığı ise 7 ila 15 gün arasında bir periyotta gerçekleştirilir. NF (nanofiltrasyon) sistemi ise, özellikle suyun organik bileşenlerinden arındırılması açısından yüksek performans sergiler. Bu sistem, toplam organik karbon (TOC) giderme oranını %90'dan fazla bir seviyeye çıkarırken, pigment giderme oranı da aynı şekilde %90'ın üzerinde kalır, bu performans aralığı 4-30°C sıcaklıklar arasında geçerlidir. Enerji tüketimi açısından ise, basınçlı kap MF sistemi oldukça verimli olup, ton başına yalnızca 0,003 kWh enerji tüketirken, NF sistemi aynı miktar suyu işlemek için 0,197 kWh enerji harcar. Bu durum, MF sisteminin enerji verimliliği açısından önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

4.2.4.3 Ultrafiltrasyon

Membran filtrasyon sistemleri (mikro, ultra, nano ve ters ozmoz gibi) bakterileri, mikroorganizmaları, partikül maddeleri, eser kirleticileri ve doğal organik bileşenleri etkili bir şekilde uzaklaştırır. Membran teknolojileri, kolay kullanım, az alan gereksinimi, yüksek akış/düşük basınçla çalışma ve kimyasal işleme ihtiyacını ortadan kaldırma gibi avantajlar sunar. UF membranlarında yaygın bir sorun, kirleticilerin membran yüzeyine birikerek gözenekleri tıkaması ve bu da filtrasyon verimliliğini azaltarak bir jel tabakası oluşturmasıdır. NOM, UF membranlarını kirleten en yaygın bileşendir. Membranların düzenli olarak kimyasal veya mekanik yöntemlerle temizlenmesi, operasyonel ömürlerinin uzatılması ve verimliliklerinin korunması için gereklidir.

Geleneksel filtreleme ve Ultrafiltrasyon (UF) yöntemleri nehirlerden sağlanan ham yüzey suyunu arıtmak için karşılaştırıldığında gelen suyun kalitesinde meydana gelen değişikliklere rağmen, UF sistemlerinin istikrarlı ve yüksek kalitede arıtılmış su elde edilmesini sağladığı tespit edilmiştir. UF sisteminden alınan geri yıkama çamuru, yüksek partikül içeriğine sahip olsa da genel olarak besleme suyuyla benzer özellikler taşımaktadır. Buna karşılık, geleneksel filtreleme sistemlerinden çıkan çamur, kullanılan koagülantların bir yan ürünü olarak yüksek seviyede alüminyum kalıntısı içermektedir. Ayrıca, UF sistemlerinde meydana gelen su kayıpları geleneksel yöntemlere göre daha fazladır. Bununla birlikte, işletim ve bakım maliyetleri açısından geleneksel sistemler daha uygun bir seçenek sunmaktadır.

Geleneksel sistemlerde karşılaşılan bir çevresel sorun, koagülanların kullanımı sonucu oluşan ve çamurdaki alüminyum kalıntılarının 58 mg/L gibi yüksek seviyelere ulaşmasıdır. Bu tür kalıntılar, Alzheimer hastalığı ve nörolojik gelişim bozuklukları gibi sağlık problemleri ile ilişkilendirilmiştir. Buna karşılık, UF sisteminden elde edilen çamur, yalnızca kaynak suyundaki askıda katılarla benzerdir ve çevresel etkisi çok daha düşüktür. Alüminyum yüklü çamurun bertaraf edilmesi, geleneksel sistemlerde önemli bir işletme giderine yol açar. Yapılan bir çalışmada, bu tür çamurun bertaraf maliyeti ton başına 130 USD'yi bulabildiği tespit edilmiştir. Geleneksel sistemin ayda yaklaşık 148 ton çamur ürettiği düşünüldüğünde, bu bertaraf maliyeti, arıtılan suyun metre-küp başına ek 1,85 USD maliyet anlamına gelir. UF sisteminin çamuru ise ilave kimyasal kullanımına gerek duyulmaksızın güvenli bir şekilde su yollarına bırakılabilir, bu da bertaraf masraflarını en aza indirir (Chew, 2016).

UF membranlarının 0,01–0,1 µm arasında değişen gözenek boyutları, partikülleri, mikroorganizmaları ve proteinleri yüksek verimlilikle tutmasını sağlar. Özellikle pıhtılaştırma ile birlikte kullanıldığında, UF hem organik maddelerin hem de askıda katıların etkin bir şekilde uzaklaştırılmasında oldukça başarılıdır. Bu yöntemin geri yıkaması sırasında, üretilen filtratın bir kısmı membran yüzeyine ters yönde uygulanarak birikmiş tabaka temizlenir ve membranın performansı yenilenir. Kimyasal Destekli Geri Yıkama (CEB) yöntemi, geri yıkama sırasında klor, asit veya baz gibi temizlik kimyasallarının eklenmesiyle temizlik etkinliğini artırır. Kullanılan kimyasalların türü ve uygulama sıklığı, su kalitesine ve kirlilik türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. UF sistemlerinde zamanla membran yüzeyinde biriken kirlenme, transmembran basıncının artmasına, filtrat akışının azalmasına ve enerji ile kimyasal tüketiminin yükselmesine neden olur. Bu nedenle, sistemin düzenli olarak izlenmesi ve gerektiğinde temizlik yapılması kritik öneme sahiptir. Temizliğin geciktirilmesi durumunda, geri dönüşü olmayan hasarlar meydana gelebilir ve UF modülleri ya da diğer ekipman zarar görebilir (Cuartucci, 2020).

4.2.4.4 Nanofiltrasyon

NF teknolojisinin, su kirliliği ve kaynak yetersizliği gibi temel sorunların çözümüne olan katkı potansiyeli dikkate alındığında, membran geliştirme, malzeme yenilikleri ve saha uygulamalarındaki gelişmelerin derinlemesine ve zamanında ele alınması kritik öneme sahiptir. Geleneksel yüzey suyu arıtma süreçleri genellikle koagülasyon, çökeltme, filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi aşamaları içerir. Bu yöntemler patojen ve partikül gideriminde etkili olsalar da yeni ortaya çıkan kirleticilere karşı yeterince etkili olamayabilir. Ayrıca, dezenfeksiyon sırasında, dezenfektanların bromür ve doğal organik maddeler (NOM) gibi öncül maddelerle reaksiyona girmesi, zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP) oluşumuna neden olabilir. NF membranlar, geleneksel yöntemlere ek bir çözüm veya alternatif olarak, organik maddelerin büyük bir kısmını tutarak ve DBP oluşum risklerini azaltarak bu problemlerin üstesinden gelme noktasında önemli bir seçenek sunmaktadır.

Yüzey suyunun arıtımı için kullanılan tipik bir NF sistemi, ön arıtma, membran süreci ve son arıtma olmak üzere üç temel aşamadan oluşur. Ön arıtma işlemi, özellikle yüzey suyundaki yüksek doğal organik madde (NOM) miktarı nedeniyle membranların kirlenme olasılığını en aza indirmek için tasarlanmıştır. Sıklıkla kullanılan ön arıtma

yöntemleri arasında koagülasyon, flokülasyon, çökelme, kum filtresi, mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon yer alır. Bu işlemler, bakteriler, organik maddeler ve partiküllerin büyük bir kısmını ortadan kaldırarak NF sistemlerindeki membran kirlenme sorunlarının önüne geçebilir. NF membranı, çoğu kirleticiyi etkin bir şekilde giderirken, ön arıtma işlemi alkaliniteyi kısmen düşürerek korozyon riskini artırabilir. Bununla birlikte, NF membranları mikroorganizmalar, ağır metaller, iki değerlikli iyonlar, NOM ve eser miktardaki organik kirleticilerin gideriminde oldukça etkilidir.

Dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler), genellikle dezenfektanların (örneğin klor veya kloramin) NOM gibi öncül maddelerle reaksiyona girmesiyle oluşur. Trihalometanlar (THM), haloasetik asitler (HAA) ve N-nitrosodimetilamin (NDMA) en bilinen dezenfeksiyon yan ürünleri arasında yer alır. NF, NOM'un yüksek oranda reddedilmesini (%50-95) sağlayarak, DBP oluşumunu önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, ticari NF membranları NDMA'yı %72-97, THM'leri ise %57-83 oranında giderebilir. Ancak, bromun neden olduğu bromlu DBP'ler, NF'nin bromür giderim oranının düşük (%30'dan az) olması nedeniyle sorun yaratabilir. Bu durum, NF ile işlenmiş suya klor eklenmesi halinde THM ve HAA türlerinin daha fazla brom içeren formasyonlara dönüşmesine yol açabilir. Yine de NF membranları patojenleri etkin bir şekilde ortadan kaldırdığı için (fiziksel dezenfeksiyon), bu durum sonraki aşamada daha düşük miktarda klor kullanılmasına olanak tanır. Klor miktarındaki bu azalma yalnızca DBP oluşumunu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda içme suyundaki klor kokusunu da minimum seviyeye indirir. Özetle, NF yöntemi DBP oluşumuna yol açan maddelerin giderilmesinde ve klor dozajının azaltılmasında etkili bir çözümdür.

Membran bazlı su arıtımında en büyük zorluklardan biri kirlenme problemidir. Yoğun kirlenme, çözünmüş maddelerin tutulmasını azaltabileceği gibi, hidrolik direnç artışına ve dolayısıyla işletme basıncının yükselmesine neden olabilir. Kirlenme sorununu hafifletmek için, grafen oksit ve gümüş nanopartiküller gibi antimikrobiyal maddelerin membranlara eklenmesi veya membran yüzeyinde oluşan biyofilmin modifiye edilmesi gibi yenilikçi yaklaşımlar kullanılabilir. Bu yöntemler, organik ve inorganik kirlenmenin yanı sıra biyolojik kirlenmenin (biyokirlenme) önlenmesinde önemli bir potansiyele sahiptir (Guo, 2021).

Nanofiltrasyon (NF) membranları, düşük moleküler ağırlığa sahip maddeleri ve çok değerli iyonları seçici şekilde uzaklaştırmak için kullanılan, basınca dayalı bir yöntemdir ve bu süreç minimum enerji harcaması ile gerçekleştirilir. Ayrıca, yüzey

polimerizasyonu ve nanoparçacıkların kullanımı gibi teknolojik ilerlemeler, NF membranlarının organik ve inorganik maddeleri daha verimli şekilde ayrıştırmasını sağlamıştır.

Yapılan çalışmalar, fiziksel geri yıkamanın partiküller ve kolloidler temizlemede etkili olduğunu ve bu sayede membran performansını artırdığını göstermektedir. Ancak, içi boş fiber membranlarda fiziksel geri yıkama genellikle organik kirlenmeyi kontrol etmede yetersiz kalmaktadır. Bu durumun çözümü için kimyasal temizlik yöntemleri yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yerinde temizlik (CIP) ve kimyasal olarak desteklenmiş geri yıkama (CEB) bu yöntemlerden başlıcalarıdır. CIP, CEB'ye göre daha etkili bir yöntem olmakla birlikte, yüksek maliyetli olması, daha yoğun temizlik kimyasalı gereksinimi ve yüksek sıcaklıklarda işlem yapılmasını gerektirmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Sodyum hipoklorit (NaClO), membran temizliğinde etkili bir ajan olarak öne çıkmaktadır; çünkü bu madde hem membran geçirgenliğini yeniden kazandırmada başarılıdır hem de diğer klor bazlı kimyasallara göre çevreye daha az zarar verir. Düzenli aralıklarla ve uygun kimyasal miktarlarıyla uygulandığında, CEB'nin su ve atık su arıtma membran sistemlerinde uzun vadeli kullanımı desteklediği tespit edilmiştir. Membran sistemlerinin uzun vadeli çalıştırılmasında, işletme maliyetlerini düşürmek için kimyasal temizleme sürecinin optimize edilmesi büyük önem taşır. Yıkama süresi, geri yıkama süresi ve sıklığı, kimyasal madde miktarı, temizlik süresi ve kimyasal temizlik sıklığı bu süreçte dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Örnek bir çalışmada, geri yıkama işlemleri sırasında NaClO , 20 ve 30 mg/L konsantrasyonlarında uygulanmıştır. Kimyasal geri yıkama ve hidrolik geri yıkama süreçlerinin karşılaştırılması amacıyla hidrolik geri yıkama ayrı bir işlem olarak gerçekleştirilmiştir. Her geri yıkama işlemi yaklaşık 30 saniye sürmüş ve 1 bar basınç uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, NaClO konsantrasyonunun 20 ve 30 mg/L'ye çıkarılmasının, yedi günlük filtrasyon sonrasında geri yıkama etkinliğini belirgin şekilde artırdığını ve geri yıkamanın ardından geçen 60 saniye içinde gözle görülür iyileşmeler sağladığını ortaya koymuştur (Kim, 2021).

NF sistemlerinde, besleme kanallarındaki basınç zamanla başlangıç seviyesine göre %25-40 oranında arttığı için düzenli CIP uygulaması zorunludur. CIP işlemi iki aşamadan oluşur: birinci aşamada, %2 konsantrasyonlu sitrik asit çözeltisi, 35 °C'de üç saat boyunca dolaştırılarak asit temizliği yapılır. İkinci aşamada ise sodyum

hidroksit (NaOH) ile alkalın temizlik gerçekleştirilir. Üç asit-alkalin temizlik dngs tamamladıktan sonra, membranlar NF sisteminin çıkış suyuyla durulanır. Besleme suyunun düşük kirlenme potansiyeline sahip olması nedeniyle, NF tesisleri genellikle her iki yılda bir CIP uygular. Bu sistemlerde otomatik CIP ekipmanları kullanılmaktadır. Asidik ve alkalın zeltilemlerle yapılan temizleme sırasında, akış hızı her 30 dakikada bir düşük (modül başına 5 m³/saat) ve yüksek (modül başına 10 m³/saat) olmak üzere değişir. Bu periyodik akış hızı değişimleri, temizlik işleminin etkinliğini artırır ve biriken kirleticilerin tamamen temizlenmesini sağlar (Jafari, 2021).

4.2.5 TOPSIS yönteminin uygulanması

Elde edilen veriler ışığında oluşturulan karar matrisi ile en uygun filtrasyon senaryosunun seçimi yapılmış olup TOPSIS uygulamasının anlatıldığı bölümdeki hesaplama yöntemleri kullanılarak izelge 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26'da gerçekleştirilen işlem basamakları aşağıda sunulmuştur;

Çizelge 4.18: Kriterler İçin Belirlenen nem Dereceleri.

Kriter	nem Derecesi
Maliyet	0,25
Performans	0,30
İşletme Kolaylığı	0,20
Atık Yönetimi	0,25

Çizelge 4.19: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.

Fitrasyon Türü	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
Hızlı Kum Filtresi	0,66712	0,25503	0,41100	0,23905
Mikrofiltrasyon	0,51887	0,44630	0,57540	0,59761
Ultrafiltrasyon	0,44475	0,57382	0,57540	0,59761
Nanofiltrasyon	0,29650	0,63758	0,41100	0,47809

Çizelge 4.20: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.

Fitrasyon Türü	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
Hızlı Kum Filtresi	0,16678	0,07651	0,08220	0,05976
Mikrofiltrasyon	0,12972	0,13389	0,11508	0,14940
Ultrafiltrasyon	0,11119	0,17215	0,11508	0,14940
Nanofiltrasyon	0,07412	0,19127	0,08220	0,11952

Çizelge 4.21: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.

Çözüm Değerleri	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
İdeal Çözüm Değeri	0,16678	0,19127	0,11508	0,14940
Negatif İdeal Çözüm Değeri	0,07412	0,07651	0,08220	0,05976

Çizelge 4.22: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Fitrasyon Türü	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
Hızlı Kum Filtresi	0,00000	0,01317	0,00108	0,00804
Mikrofiltrasyon	0,00137	0,00329	0,00000	0,00000
Ultrafiltrasyon	0,00309	0,00037	0,00000	0,00000
Nanofiltrasyon	0,00859	0,00000	0,00108	0,00089

Çizelge 4.23: İdeal Uzaklık Değerleri.

Fitrasyon Türü	S_i^+
Hızlı Kum Filtresi	0,14929
Mikrofiltrasyon	0,06831
Ultrafiltrasyon	0,05879
Nanofiltrasyon	0,10276

Çizelge 4.24: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Fitrasyon Türü	Maliyet	Performans	İşletme Kolaylığı	Atık Yönetimi
Hızlı Kum Filtresi	0,00859	0,00000	0,00000	0,00000
Mikrofiltrasyon	0,00309	0,00329	0,00108	0,00804
Ultrafiltrasyon	0,00137	0,00915	0,00108	0,00804
Nanofiltrasyon	0,00000	0,01317	0,00000	0,00357

Çizelge 4.25: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.

Fitrasyon Türü	S_i^-
Hızlı Kum Filtresi	0,09266
Mikrofiltrasyon	0,12450
Ultrafiltrasyon	0,14013
Nanofiltrasyon	0,12939

Çizelge 4.26: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.

Fitrasyon Türü	S_i^+	S_i^-	P_i
Hızlı Kum Filtresi	0,14929	0,09266	0,38296
Mikrofiltrasyon	0,06831	0,12450	0,64571
Ultrafiltrasyon	0,05879	0,14013	0,70445
Nanofiltrasyon	0,10276	0,12939	0,55736

Bu çalışma, farklı değerlendirme kriterleri kullanarak içme suyu arıtımı için en uygun filtrasyon yönteminin seçimini belirlemek amacıyla TOPSIS yönteminin uygulanmasını göstermektedir. Çalışma, filtrasyon yöntemlerinin performans, işletme kolaylığı, maliyet ve atık yönetimi gibi kriterler açısından değerlendirilmesini içermektedir. Hızlı Kum Filtreleri, Mikrofiltrasyon, Ultrafiltrasyon ve Nanofiltrasyon olmak üzere dört farklı filtrasyon yöntemi, TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, Ultrafiltrasyon'un özellikle performans ve işletme kolaylığı kriterlerinde diğer yöntemlere kıyasla öne çıktığını göstermektedir. Bu üstün özellikler, Ultrafiltrasyonun daha küçük partikülleri ve mikroorganizmaları etkin bir şekilde giderebilmesi, su kalitesinde yüksek standartlar sağlaması ve gelişmiş otomasyon sistemleri ile işletme süreçlerini kolaylaştırması ile ilişkilidir. Ultrafiltrasyon, bakım ve temizleme işlemlerinin standartlaştırılmış olması sayesinde operatör gereksinimini minimize ederken, farklı su kalitesi koşullarında tutarlı bir performans sergileyebilmesi nedeniyle esnek bir kullanım sunmaktadır. Bununla birlikte, Ultrafiltrasyon maliyet kriterinde yüksek puan alamamıştır. Yüksek enerji tüketimi ve yatırım maliyetleri, bu yöntemin ekonomik açıdan dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Atık yönetimi açısından ise Ultrafiltrasyon, ürettiği yoğunlaştırılmış atık akışları nedeniyle ortalama bir performans göstermektedir. Ancak, bu atıkların bertarafının düzenli bir şekilde yönetilebilmesi, yöntemin çevresel sürdürülebilirliği açısından bir avantaj sunmaktadır. Diğer yöntemler incelendiğinde, Hızlı Kum Filtreleri ekonomik avantajları ve temel işletme kolaylığıyla dikkat çekerken, performans kriterinde sınırlı bir etkinlik göstermiştir. Mikrofiltrasyon ve Nanofiltrasyon, performans açısından yüksek puan alsa da işletme kolaylığı ve maliyet kriterlerinde Ultrafiltrasyonu geçememişlerdir.

TOPSIS modelinden elde edilen sonuçlara göre, tüm kriterlerin değerlendirilmesi sonucunda Ultrafiltrasyon, içme suyu arıtımı için en çok tercih edilen filtrasyon yöntemi olarak belirlenmiştir. Özellikle performans ve işletme kolaylığı konularında sağladığı üstünlükler, bu yöntemi içme suyu arıtımı için ideal bir seçenek haline getirmiştir.

4.3 Dezenfeksiyon Senaryosu

İstanbul'un Avrupa Yakası'nda yer alan İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleşen dezenfeksiyon süreci için Ön Ozonlama, Ara ve Son Klorlama

uygulamalarının gerçekleştirildiği belirtilmektedir (İSKİ, 2023). Mevcut süreç; UV, Klor, Kloramin ve Ozon kullanılarak gerçekleştirilecek dezenfeksiyon yöntemi ile karşılaştırılarak en uygun senaryo tespit edilmeye çalışılmıştır.

TOPSIS metodunun kullanılabilmesi için ilk adım olarak hedefin tanımlaması ve ilgili değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi tamamlanmıştır. Bu sebeple karşılaştırma yapılacak yöntemler için 7 farklı kriter başlığı belirlenmiş olup bu kriterler ışığında 4 farklı dezenfeksiyon yöntemi için karşılaştırma yapılmıştır.

Karşılaştırma yapılacak kriterler “Maliyet, Operasyonel Kolaylık, Patojen Giderimi, Güvenlik Riski, Proses Performansı, Bakiye Dezenfektan ve Yan Ürün Oluşturmama” olacak şekilde belirlenerek karşılaştırma yapılacak yöntemler için gerekli literatür araştırması yapılarak Çizelge 4.27’de de görüleceği üzere karar matrisi oluşturulmuştur.

Bu karar matrisi oluşturulurken, kriterler fayda ve maliyet yönlü olarak değerlendirilmiş ve 1 ile 10 arasında bir puanlama yapılmıştır. Fayda yönlü kriterlerde daha yüksek puanlar tercih edilirken, maliyet yönlü kriterlerde daha düşük puanlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, operasyonel kolaylık, patojen giderimi, proses performansı, bakiye dezenfektan, yan ürün oluşturmama gibi kriterler fayda yönlü olup, daha yüksek puanlar bu özelliklerin daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Öte yandan, maliyet, güvenlik riski ilişkisi kriterleri maliyet yönlü olup, düşük puanlar daha avantajlı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.27: Dezenfeksiyon Yöntemleri İçin Hazırlanan Karar Matrisi.

Dezenfeksiyon Yöntemi	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
UV	8	7	7	7	9	1	10
Klor	7	5	6	4	6	6	2
Kloramin	6	4	5	5	5	5	3
Ozon	5	6	9	6	8	2	9

4.3.1 Maliyet kriteri hakkında bilgiler

Maliyet kriteri dezenfeksiyon yöntemlerinin seçiminde dikkate alınması gereken temel ekonomik unsurlardan biridir. Bu kapsamda içme suyu arıtma tesislerinde sermaye giderleri, bir arıtma sisteminin uygulanması için gerekli olan elektromekanik ekipmanların satın alınması ve kurulumuna yönelik finansal kaynaklar, altyapının inşasında gerekli olan mühendislik çalışmaları, mekanik işlemler ve tesislerin kurulumu için gereken arazi maliyetlerini değerlendirilmektedir. Buna ek olarak,

bakım ve işletim giderleri, sistemin çalışır durumda tutulması için düzenli olarak yapılan harcamalar, enerji tüketimi, onarım hizmetleri, kimyasal malzeme alımı ve çalışan maaşları gibi ek başlıklar değerlendirilebilir (Gelete, 2020). Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.27’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.1.1 UV

Su arıtmanın birincil amacı, safsızlıkları ortadan kaldırmak ve suyu belirlenen amaca uygun hale getirmektir. Bu süreç, kirleticilerin etkili bir şekilde giderilmesini sağlamak için fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerin bir kombinasyonuna dayanır. Bunlar arasında dezenfeksiyon, zararlı mikroorganizmaları etkisiz hale getiren veya yok eden ve böylece halk sağlığını koruyan kritik bir adımdır. Bu adım, tehlikeli patojenleri ortadan kaldırarak hastalıkların bulaşmasını önlediği için özellikle içilebilir su üretiminde çok önemlidir. Dezenfeksiyon yöntemleri genellikle iki kategoriye ayrılır: ultraviyole (UV) radyasyon gibi fiziksel yaklaşımlar ve klor, kloramin, ozon gibi maddelerin kullanıldığı kimyasal işlemler. Etkinliklerine rağmen, bu yöntemler genellikle maliyet, potansiyel toksik yan ürünler, verimlilik ve güvenilirlik gibi konularda kıyaslanmaktadır (Gelete, 2020).

UV dezenfeksiyon seçeneği, sistem üzerindeki olumsuz etkileri azaltma (örneğin, içme suyunun tat ve koku kalitesini iyileştirme) ve dezenfeksiyon yan ürünleri üretimini en aza indirerek uzun vadeli yerel sağlık risklerini düşürme açısından en avantajlı seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ancak, bu alternatif, işletme verimliliği, bakım gereksinimleri, maliyet ve küresel çevresel etkiler açısından en düşük performansı göstermiştir (Jones, 2019).

UV dezenfeksiyon sistemlerinin başlangıç maliyetleri, tesisin büyüklüğü, gerekli UV lambalarının tipi (orta veya düşük basınç), suyun özellikleri ve talep edilen kapasite gibi faktörlere bağlı olarak değişir. İşletme maliyetleri açısından UV dezenfeksiyonu, klorlama ile karşılaştırıldığında, her metreküplük su başına £0.0022 yerine £0.0019 gibi bir maliyete sahiptir, bu da UV’yi ekonomik bir seçenek haline getirir. Ayrıca, elektrik harcaması, lamba bakım işlemleri ve manşonlar ile balastlar gibi parçaların onarımı işletme giderlerini etkileyebilir (Kerwick, 2005).

Enerji tüketimi, UV sistemlerinin en önemli dezavantajlarından biridir. UV lambaları sürekli enerji gereksinimi duyar ve kısa bir kullanım ömrüne sahiptir, genellikle 6-12 ayda bir değiştirilmesi gerekir. Sık değişimler, lamba üretimi, taşınması ve bertarafı için daha fazla enerji tüketilmesine neden olur. Ayrıca, atılan lambaların içerdikleri cıva çevresel bir tehdit oluşturur; bu nedenle, cıvanın çevreye yayılmasını önlemek ve geri dönüştürülebilir malzemeleri kazanmak için geri dönüşüm programları gereklidir. Ancak geri dönüşüm işlemleri de UV sistemlerinin enerji tüketimini artırır. Cıva bazlı UV lambalarının verimliliği genellikle %15-40 arasında değişirken, çalışma sırasında kullanılan elektrik verimliliğiyle birleştiğinde toplam verimlilik %5-15 gibi düşük bir seviyeye düşer. Bu durum, UV dezenfeksiyonunun yüksek enerji gereksinimi ve çevresel etkilerinin temel zorluklardan biri olduğunu ortaya koyar (Pichel, 2019).

Gerekli operasyonel bilgi ve eğitim seviyesi, kullanılan sistemin teknolojik karmaşıklığı ve güvenlik gereksinimleriyle doğrudan ilişkilidir. Ozon veya klor dioksit gibi ileri düzey dezenfeksiyon yöntemleri, karmaşık yapıları nedeniyle detaylı bakım ve özel uzmanlık gerektirir. Bunun aksine, hipoklorit çözeltileri ya da perasetik asit gibi daha basit dozaj yöntemleri, çok daha az teknik bilgiyle işletilebilir ve bu durum, daha düşük bakım ve işletim maliyetleriyle sonuçlanır. Ancak, etkili bir dezenfeksiyon sistemi için mutlaka karmaşık bir tasarıma ihtiyaç duyulmaz; farklı teknolojik yaklaşımlar benzer başarı seviyeleri sunabilir. Örneğin, temel UV sistemleri oldukça basit bir kullanım sağlarken, daha gelişmiş tasarımlar enerji tüketimini azaltma veya güvenlik standartlarını artırma amaçlı özellikler barındırabilir, bu da sistemin karmaşıklığını artırabilir. Yüksek otomasyonlu sistemlerin başlangıç aşamasında performans testleri ve sahaya özgü operasyonel prosedürlerin oluşturulması için yoğun operatör desteği gerekse de bu sistemler devreye girdikten sonra, otomasyon sayesinde rutin operasyonlarda insan müdahalesi ihtiyacı önemli ölçüde azalır (Van Haute, 2015).

Metreküp başına sırasıyla 0,04 ve 0,09 kg CO₂ eşdeğeri ile klorlama ve UV uygulamaları, çevresel etkileri en düşük olan yöntemler arasında öne çıkmıştır. Bu iki yöntem aynı zamanda, her metreküp için yalnızca 0,004 EUR maliyetle en ekonomik seçenekler olarak değerlendirilmektedir (Zagklis, 2022).

4.3.1.2 Klor

Çevresel faktörlerin ekonomik tercihler üzerindeki etkisini değerlendirirken, bu etkileşimin karşılıklı olduğunu ve ekonomik kararların çevreyi nasıl etkileyebileceğini göz önünde bulundurmak önemlidir. Bir süreç, ürün veya etkinlikteki iyileştirmeleri incelerken, maliyet faktörü karar alma sürecinin temel unsurlarındandır. Klorlama sistemi, UV sistemine göre daha düşük inşaat maliyetine sahip olsa da yıllık işletme giderleri her iki sistem için de benzer seviyelerdedir. Dolayısıyla, klorlama yöntemini tercih etmek, ekonomik açıdan herhangi bir belirgin avantaj sağlamamaktadır (Das, 2002).

Klorlama yöntemi ile ilişkili diğer sorun, gereken miktar konusunda sabit bir kuralın olmamasıdır. Ancak, ihtiyaç duyulan miktar su kalitesine ve dezenfeksiyon gereksinimine bağlıdır. Ayrıca, dezenfektan olarak klor gazı kullanan bir su arıtma tesisi, yüksek becerili mühendisler, operatörler ve bakım ve onarım altyapıları gerektirir. Ancak, seyreltilmiş klor kullanan bir arıtma tesisi nispeten uygun maliyetli ve basittir. Yine de bu yöntemin dünya çapında uygulanabilirliği, uzun yıllar boyunca kullanımıyla oluşturulmuş olan bir dezenfektan olarak son derece kabul edilebilir performansına ve rahatlığına atfedilebilir (Gelete, 2020).

Klorlama, maliyet açısından uygun ve uygulama açısından kolay olduğu için geleneksel su arıtma tesislerinde en yaygın tercih edilen yöntemdir. Ancak, klorlama sırasında meydana gelen yan ürünlerin (DBP'ler) sağlık üzerindeki potansiyel tehlikeleri, son yıllarda daha fazla endişe yaratmıştır (Issa, 2019).

Ekonomik açıdan bakıldığında, klorlama, metreküp başına 0,0003 ile 0,006 EUR arasında değişen düşük maliyetlerle en uygun fiyatlı üçüncül arıtma yöntemlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, klorlama işlemi minimum enerji tüketimi gerektirdiği için düşük seviyelerde karbon emisyonuna sahiptir. UV ışını, ozonlama ve klorlama, her biri kendine özgü faydalar sunan en etkili üçüncül arıtma yöntemleri olarak öne çıkmıştır. Ozonlama, mikropların ve farmasötik maddelerin giderilmesinde daha yüksek verim sağlarken, klorlama daha düşük sera gazı salınımı ve daha ekonomik bir çözüm sunmaktadır (Zagklis, 2022).

4.3.1.3 Kloramin

İçme suyu sistemleri, ekonomik, çevresel ve toplumsal sürdürülebilirlik unsurlarını bir araya getiren detaylı karar verme süreçlerini gerektiren çeşitli karmaşık sorunlarla başa

çıkma zorundadır. Amonyak ve klorun dikkatle dengelenmiş bir reaksiyonla bir araya getirilmesi sonucu yerinde üretilen monokloramin (NH_2Cl), çoğunlukla su dağıtım sistemlerinde destekleyici bir dezenfektan olarak kullanılır. Klorla kıyaslandığında, temel dezenfeksiyon sürecindeki etkinliği oldukça sınırlıdır ve dezenfeksiyon gücü yaklaşık 200 kat daha düşüktür. Bununla birlikte, kloramin kullanımı, trihalometan (THM) oluşumunu engellemekte ve klorlama sırasında ortaya çıkan tat ve koku problemlerini azaltmakta başarılıdır. Yine de bu yöntem hassas dozaj ekipmanlarına ve uzman operatörlere ihtiyaç duyar (Pichel, 2019).

Hedeflenen dezenfeksiyon seviyesine ulaşıldıktan sonra, ekonomik değerlendirmeler karar verme sürecinin merkezine oturur. Gerekli ekipman için yapılan ilk harcamaların yanı sıra, sermaye giderlerine amortisman, tesisin teknik ve fiziksel kısıtlamaları ve kurulumu gerçekleştirecek uzmanların hizmet bedelleri eklenir. İşletme maliyetleri ise, bir metreküp suyun arıtılması başına hesaplanarak, temizlik ürünleri, sarf malzemeleri, düzenli bakım, ekipman tamirâtı, kimyasal ve yedek parça depolama, çalışan maaşları, eğitim giderleri ve enerji tüketiminden oluşan çeşitli unsurları kapsar. Ayrıca, piyasadaki dalgalanmalar bu toplam maliyetleri doğrudan etkileyebilir (Van Haute, 2015).

İçme suyu arıtımında en yaygın dezenfeksiyon yöntemi, klor temelli maddelerin kullanımını içerir. Serbest klor, ekonomik ve uygulanması basit bir seçenek olsa da bu yöntemin zararlı yan etkileri olan dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP) oluşumuyla bağlantılı olması, son yıllarda kaygıların artmasına neden olmuştur. Bu durum, birçok Avrupa ülkesini klor bazlı tekniklerden uzaklaşmaya yöneltmiş ve ozon veya ultraviyole (UV) ışınları gibi genellikle daha etkili kabul edilen alternatif teknolojilere yönelmelerine yol açmıştır.

Bir başka önemli nokta ise, bir dezenfektanın yalnızca uygulanmasının onun etkin olduğu anlamına gelmemesidir. Örneğin, kloramin kullanımı daha uzun süreli bir koruma sağlasa da sistemde kalan klor miktarını ciddi şekilde azaltabilir. Bu nedenle, kloraminlerin kullanılması her zaman doğru ve verimli bir şekilde uygulandığını göstermez. Klor sistemlerinden başlangıç maliyeti ve işletme maliyeti olarak daha yüksek maliyetlere sahip olan kloramin yöntemi, UV ışını, ozon gibi yöntemler maliyet değerlendirmelerine tabii olduklarında ekipman açısından daha büyük yatırımlar gerektirdiğini göstermektedir. Buna karşın, serbest klor başlangıç

maliyetleri bakımından daha uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Moghadam, 2012).

4.3.1.4 Ozon

Ozon, oldukça dengesiz bir bileşik olduğu için üretiminin tesis içinde yapılması gerekmektedir. Ozonlama sistemlerinde hava hazırlama, kontrol mekanizmaları, ozon üreticisi ve imha üniteleri gibi araçlar bulunmaktadır. Bu tür sistemler genellikle yüksek başlangıç maliyetlerine sahiptir ve bakım ve işletme süreçleri daha karmaşık olabilmekle birlikte küçük ölçekli sistemlerde elektrik tüketimi, toplam işletme ve bakım masraflarının %26 ile %43'ünü oluşturabilmektedir (Collivignarelli, 2017).

Klor gibi diğer dezenfeksiyon yöntemlerine kıyasla, ozonlama daha az miktarda kimyasal kullanımı ve daha kısa temas süreleri ile etkili sonuçlar elde etme yeteneğine sahiptir. Özellikle kistler ve sporlar gibi dirençli patojenlere karşı güçlü bir savunma sağlar ve *Cryptosporidium* ile *Giardia*'yı etkisiz hale getirebilen tek kimyasal dezenfektan olarak bilinir. En belirgin avantajı ise çevreye zararlı yan ürünler bırakmaması ve kullanımdan sonra oksijene dönüşerek sürdürülebilir bir dezenfeksiyon yöntemi sunmasıdır. Ayrıca, bu yöntem hem başlangıç hem de işletme maliyetleri açısından oldukça yüksek bir bütçe gerektirir. Yüksek enerji ihtiyacı, uzman personel desteği ve oksidasyon sırasında oluşan organik karbonu bertaraf etmek için ek arıtma süreçleri, yöntemin karmaşıklığını daha da artırmaktadır. Diğer bir olumsuz yanı ise ozonun bromür ve organik bileşenlerle reaksiyona girerek bromat, aldehit ve keton gibi insan sağlığı için tehlike oluşturabilecek yan ürünler meydana getirmesidir (Gelete, 2020).

Ozon gibi alternatif dezenfeksiyon yöntemleri, su arıtımında pestisitleri ortadan kaldırmak ve dezenfeksiyonu iyileştirmek gibi amaçlarla kullanılmasına rağmen, klorun yerini almamıştır. Bunun nedeni, bu yöntemlerin genellikle etkili bir şekilde kullanılabilmesi için yüksek maliyetlere sahip olmaları ya da suyun dağıtım sistemindeki kalitesini korumak için gerekli koruyucu kalıntıları bırakmamalarıdır (Kerwick, 2005).

Ozonlama hem başlangıç maliyeti hem de işletim masrafları açısından oldukça pahalı bir dezenfeksiyon yöntemidir. Bu süreç, yüksek enerji tüketimi, yerinde üretim altyapısı, uzmanlaşmış bakım personeli ve oksidasyon sonucu ortaya çıkan asimile edilebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir organik karbonun giderilmesi için ek

arıtma işlemleri gerektirir. Ozonun doğal organik maddeler ve bromür iyonlarıyla (Br^-) etkileşimi sonucunda bromat, aldehitler, ketonlar ve kinonlar gibi istenmeyen yan ürünler oluşabilir. Bununla birlikte, ozonlama süreci THM veya HAA üretmez ve ikincil dezenfektan olarak klorun kullanımı bu bileşiklerin oluşumunu daha da azaltabilir (Pichel, 2019).

Ozon ve membran filtreleme sistemleri, yerel ve küçük ölçekli uygulamalar için daha uygun olan basit UV cihazlarına kıyasla daha yüksek maliyetli olup, daha ileri düzeyde uzmanlık gerektirir. Bunun yanı sıra, ozon jeneratörleri ve membran sistemleri, genellikle özel bilgi ve beceri gerektiren karmaşık bakım süreçleri nedeniyle daha fazla teknik destek ihtiyacı doğurur. Ayrıca, bromür içeren sıvılar üzerinde uygulanan ozonlama, bromat ve bromoorganik yan ürünlerin oluşumuna sebep olabilir (Van Haute, 2015).

Ozon tedavisi, suya düşük çözünürlük özelliği nedeniyle verimliliği sınırlıdır ve organik kirleticilerle reaksiyona girerek zararlı ara ürünler oluşturabilir. Araştırmalar, ozon kullanımının koliform sayısını 4 log, Salmonella, Enterococcus ve E. coli'yi ise 2,2 ile 5,3 log arasında azalttığını göstermektedir. Ozonlama aynı zamanda farmasötik maddelerin %5 ila %80 oranında uzaklaştırılmasına da yardımcı olmuştur. Ozonlama işlemi için belirlenen maliyetler metreküp başına yaklaşık 0,03 EUR'dur ve küresel ısınma potansiyeli 0,025 ila 0,3 kg CO_2 eşdeğeri arasında değişmektedir (Zagklis, 2022).

4.3.2 Operasyonel kolaylık hakkında bilgiler

Operasyonel kolaylık kriteri için Dezenfeksiyon yöntemi seçimi yapılırken, her yöntemin kendine özgü ihtiyaçları ve kısıtlamaları göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer bir dezenfeksiyon sistemi, çalıştırılması için yüksek düzeyde uzmanlaşmış bir kadro gerektiriyorsa, özellikle kırsal ya da ulaşılması zor bölgelerde bu yöntem karar vericiler tarafından tercih edilmeyebilir. Farklı yöntemler arasında değerlendirme yapılırken, işletim ve bakım süreçlerinde pratiklik ve esneklik ön planda tutulmalıdır. Zira sade ve kullanımı kolay sistemler, arıtma sürecinin uzun vadede başarılı ve kesintisiz bir şekilde sürdürülmesini sağlama açısından daha avantajlıdır (Gelete, 2020). Karar matrisinin hazırlanması için Çizelge 4.27'de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.2.1 UV

Günümüzde ultraviyole radyasyon (UV), çok çeşitli zararlı mikroorganizmaları etkili bir şekilde etkisiz hale getirdiği için suyun dezenfekte edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik suda herhangi bir kalıntı madde bırakmaz veya zararlı yan ürünler üretmez. Süreç, suyun kısa dalga radyasyona maruz bırakılmasını içerir, bu da mikroorganizmaların büyüme ve üreme yeteneklerini bozarak onları ortadan kaldırır. UV bunu mikroorganizmaların DNA yapısını hedef alarak ve zarar vererek gerçekleştirir. Ultraviyole radyasyon (UV) dezenfeksiyon için etkili bir yöntem olarak hizmet eder ve suyun özelliklerini değiştirmez. UV, bakterileri ortadan kaldırmak için kimyasallar kullanmak yerine fiziksel bir mekanizmaya dayandığından, suyun tadı, kokusu ve pH'ı değişmeden kalır. Bu yöntem, herhangi bir kimyasal reaksiyona neden olmadan özellikle mikroorganizmaları hedef alır. UV'nin içme suyu arıtımındaki en önemli faydalarından biri, tehlikeli kimyasallar kullanmadan dezenfekte etme kabiliyetidir ve toksik maddelerle çalışma ihtiyacını ortadan kaldırır. Ayrıca UV hızlı etki, kullanım kolaylığı ve maliyet verimliliği gibi avantajlar da sunmaktadır. Bununla birlikte, birincil sınırlaması kalıntı dezenfeksiyonunun olmamasıdır, bu da sürekli koruma sağlamadığı anlamına gelir (Gelete, 2020).

UV dezenfeksiyon, kimyasal maddeler kullanmadığından aşındırıcı bir etki göstermez, kolayca kurulabilir ve işletilebilir, ayrıca işlem sonrası zararlı yan ürünler bırakmaz. İşlem hızlı bir şekilde tamamlandığı için suyun tat ve kokusunda herhangi bir değişiklik meydana gelmez. Bu avantajlar, UV ışığını hem atık su hem de içme suyu arıtımı için güvenilir, çevre dostu ve verimli bir alternatif haline getirir (Lanrewaju, 2022).

Ortamın pH değeri, kimyasal dezenfektanların etkinliğini ve kararlılığını doğrudan etkiler. Ozon gibi bazı dezenfektanlar, belirli pH koşullarında hızla bozulabilirken, perasetik asit gibi maddeler yüksek pH seviyelerinde, özellikle 9'un üzerinde, daha az etkili hale gelir. Ayrıca, pH değeri kireçlenme ve kirlenme hızlarını değiştirebilir ve UV ışınlaması veya membran filtrasyonunun etkinliğini etkileyebilir, özellikle düşük pH ve yüksek iyonik güç koşullarında bu yöntemler daha az verimli hale gelebilir (Van Haute, 2015).

4.3.2.2 Klor

Su temin sistemlerinde dezenfeksiyonun temel amacı, su kaynaklı hastalıklardan sorumlu hastalık yapıcı mikroorganizmaları ortadan kaldırmaktır. Bu amaç için en etkili ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri, birçok ülkede baskın dezenfeksiyon yaklaşımı olmaya devam eden klorlamadır. Bu işlem suya klor veya klor türevi bileşiklerin eklenmesini içerir. Bu maddeler eklendiğinde, dezenfeksiyon etkisinden sorumlu olan hipokloröz asit ve hipoklorit iyonlarını üretmek için su ile reaksiyona girerler. Klor, suyun dezenfeksiyonunda etkili bir oksitleyici bileşiktir. Düşük konsantrasyonlarda bile uygun maliyetli olup, kalıntı bırakır ve ilave bir işleme ihtiyaç duymaz. Bu tekniğin en belirgin avantajı, klorun suda kalıcı olarak uzun süre varlık göstermesidir; böylece dezenfeksiyon süreci, suyun depolanması ve dağıtım esnasında devam eder. Etkinliği ve düşük maliyeti nedeniyle, klorlama dünya çapında en çok tercih edilen dezenfeksiyon yöntemlerinden biridir (Gelete, 2020).

Klor, suyun pH değeri 8.0'ın altında ve berrak olduğu (bulanıklık 1 NTU'nun altında) durumlarda daha etkili olur. Klorlamanın en önemli avantajı, eklenen klorun suyun içinde kalması ve suyun dağıtım ve depolama sistemlerine devam ederken dezenfeksiyon sağlamaya devam etmesidir. Klorlama yöntemi güvenilir bir dezenfeksiyon sağlasa da bazı olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunlar arasında kötü tat ve koku, *Cryptosporidium* ve *Giardia* gibi protozoan kistleri ile helmint yumurtalarına karşı düşük etkinlik, ayrıca trihalometanlar (THM'ler) ve haloasetik asitler (HAA'lar) gibi 40'tan fazla farklı dezenfeksiyon yan ürünü (DBP) oluşması yer alır. Ayrıca, klor gazı kullanan dozajlama sistemleri, bakım ve onarım için özel eğitim almış operatörler, mühendisler ve altyapı gerektirir. Bu durum, bu tür sistemleri daha karmaşık ve pahalı hale getirir. Seyreltilmiş klor kullanılan sistemler ise daha basit, daha ekonomik olup teknik bilgi gereksinimini azaltır (Pichel, 2019).

4.3.2.3 Kloramin

Monokloramin, genellikle dezenfektan olarak tercih edilir çünkü doğal organik maddelerle kolayca reaksiyona girmez ve bu sayede toplam trihalometanlar ve haloasetik asitler gibi düzenlemeye tabi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu büyük ölçüde sınırlar. ABD'de pek çok içme suyu sistemi, monokloramini, dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu azaltmak ve boru hatlarındaki biyofilm

tabakasını kontrol altında tutmak amacıyla ek bir dezenfektan olarak kullanmayı tercih etmektedir.

Araştırma bulguları, monokloraminin inaktivasyonunun ve sistem tasarımının doğru şekilde modellenebilmesi için, farklı virüsler üzerindeki etkinliğine dair verilerin göz önünde bulundurulması gerektiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, tek bir dezenfeksiyon yönteminin tüm virüs türlerini etkili bir şekilde inaktive etme kapasitesi sınırlı olabilir.

Kloramin, daha zayıf dezenfeksiyon etkisi ve spor oluşturan su kaynaklı hastalıklara karşı etkinliğinin düşük olması nedeniyle genellikle ana dezenfektan olarak tercih edilmez. Kloraminin etkin bileşeni olan hipoklorit, yavaş bir şekilde serbest kalır ve bu nedenle klora göre daha az etkili bir virüs öldürücüdür. Aynı dezenfeksiyon seviyelerine ulaşabilmesi için daha uzun süreli temasa ihtiyaç duyar. Bu durum, özellikle su kaynaklı virüsler ve enterik patojenlerin etkisiz hale getirilmesinde, kloramini klora göre daha az verimli bir seçenek yapmaktadır (Lanrewaju, 2022).

4.3.2.4 Ozon

Ozon, içme suyu arıtımı ve kimyasal oksidasyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı bölgelerde dezenfeksiyon için klora alternatif olarak tercih edilmektedir. Ozon, güçlü bir kokuya sahiptir ve son derece reaktif, kararsız bir oksijen formudur. Ozon, piyasadaki en güçlü dezenfektanlardan biri olup, neredeyse her türlü suyla bulaşan hastalık üzerinde etkili olabilmektedir. Ozon, mikroorganizmaların hücre yapılarındaki organik bileşiklerle etkileşime girerken, sudaki çözünürlüğü oldukça düşüktür. Hücre zarlarını etkileyerek, organizmaların protein üretimini engeller. Ozonun, klora karşı dirençli patojenlere ve ayrıca *Cryptosporidium*, *Giardia* ve *Legionella* gibi mikroorganizmalara karşı etkili olduğu kanıtlanmıştır. Özellikle ozon, suyun içindeki virüsleri yok etmekte başarılıdır, genellikle bunun için viral parçacıkların içindeki proteinleri pıhtılaştırır ya da nükleik asitleri oksitleyerek yok eder. Ozon ayrıca, dezenfeksiyonun ötesinde, suyun kokusunu ve tadını düzenlemenin yanı sıra kirleticilerin kimyasal oksidasyonunu sağlamak için de kullanılır. Çevre Koruma Ajansı'na (1999) göre, 0,1 mg/L ozon, 2,0 mg/L klora kıyasla mikrobiyal yeniden çoğalma olmadan dezenfeksiyon konusunda daha etkili sonuçlar verir. Ozon ile patojen inaktivasyonu gerçekleştirilirken karşılaşılan temel sorun, suda bulunan bromür iyonlarının oksitlenmesiyle oluşan bromat adlı dezenfeksiyon yan ürünüdür. Yüksek ozon dozları gerektiren dezenfeksiyon işlemlerinde bromat oluşumu önemli

bir problem yaratır. Ozonun suya karışmasının zor olması ve kararsız yapısı, onun kullanımını daha da karmaşıktırarak, üretimin sahada yapılmasını zorunlu hale getirir. Bu durum, ozonlama işlemiyle ilgili yüksek işletme maliyetlerine yol açar, çünkü ozon jeneratörleri ve bakım işlemleri maliyetli olabilir (Lanrewwaju, 2022).

4.3.3 Patojen giderimi hakkında bilgiler

Farklı yöntemlerle arıtılan suyun, Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suyu standartlarına uygun hale gelmesi için dezenfeksiyon işlemi uygulanması zorunludur. Bu süreç, dezenfeksiyon yönteminin patojenleri ve diğer istenmeyen maddeleri ne derece etkili bir şekilde ortadan kaldırabildiğini ölçer. Bir dezenfeksiyon yönteminin etkinliği, geniş ölçekli arıtma tesislerinden elde edilen veriler ve gözlemler ışığında değerlendirilebilir. Çeşitli araştırmalar, en ideal dezenfeksiyon yönteminin belirlenmesinde giderim başarısını temel bir kriter olarak kullanmıştır (Gelete, 2020). Patojen giderimi kriteri için Çizelge 4.27'de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.3.1 UV

Ultraviyole (UV) ışınımı, görünür ışık ile X ışınları arasında yer alan, 100 ile 400 nm arasındaki dalga boylarına sahip elektromanyetik dalgaları ifade eder. UV ışığının mikropaları öldüren bölümü 220-320 nm dalga boyları arasında yer alır. UV ışını üretmek için, cıva buharıyla dolu lambalar, cıvanın uyarılması sonucu ortaya çıkan elektrik arkı ile çalıştırılır. Bu enerji, UV ışını yayılmasına yol açar ve ışınlar bakteriyel hücre zarlarından geçerek nükleik asitler tarafından emilir. Bu süreç, hücrelerin çoğalmasını engeller ve sonuçta bakterilerin ölümüne yol açar. UV ışığı, ileri arıtma aşamalarında elde edilen suyun dezenfeksiyonunda etkili olduğu kanıtlanmıştır. UV ışınımının dezenfeksiyon verimliliği, askıda bulunan parçacıklar, bakteri yoğunluğu ve parçacık büyüklüğü gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Bu yöntem, içme suyunda güvenlik riski oluşturan Giardia ve Cryptosporidium gibi patojenlerin yok edilmesinde özellikle başarılı bulunmaktadır (Collivignarelli, 2017).

Mikroplar, 200 ila 300 nm arasındaki dalga boylarında UV ışığını yüksek oranda soğurur çünkü bu ışık oldukça yüksek enerji taşır. UV ışınlarına maruz kalmak, mikroorganizmaların genetik yapısını bozarak üreme yetilerini kaybetmelerine neden olur. Bu süreç, suyun UV dezenfeksiyon sistemlerinden geçirilmesiyle gerçekleşir ve

bu işlem bakteri ile virüsleri etkisiz hale getirir. Yapılan araştırmalar, UV ışınlarının Giardia ve Cryptosporidium gibi parazitleri başarıyla etkisizleştirdiğini ortaya koymuştur (Lanrewaju, 2022).

Tüm dezenfeksiyon yöntemleri, suyun çevreye verilmeden önce virüs yoğunluğunu azaltma amacı güder. Ancak bu yöntemlerin virüs inaktivasyonu hızları farklılık gösterir. Örneğin, ozon ve UV ışınlaması, klorlamaya kıyasla virüsleri daha etkili bir şekilde yok eder. UV ışınlaması, virüsleri inaktive etmenin yanı sıra, yan ürün üretmemesi nedeniyle çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkar (Lanrewaju, 2022).

4.3.3.2 Klor

Klor, bakterilere karşı güçlü bir yok edici etki gösterir ve bunu karmaşık yollarla temel biyolojik işlevleri sekteye uğratarak gerçekleştirir. Temel etkisi, bakterilerin beslenme mekanizmalarını yöneten enzimlerin yapısını kimyasal olarak değiştirmek, bu enzimleri işlevsiz hale getirmek ve böylece bakterilerin çoğalma ve yaşamını sürdürme kapasitesini durdurmaktır (Collivignarelli, 2017).

Klorlama hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde su dezenfeksiyonu için yaygın bir şekilde tercih edilen, ekonomik ve çok yönlü bir yöntemdir. Bu yöntemin tercih edilmesinin başlıca nedeni, klorun diğer kimyasal dezenfektanlara kıyasla daha yavaş bir çözünme hızına sahip olmasıdır. Bu özellik, içme suyu şebekelerinde ve depolama alanlarında daha uzun süreli dezenfeksiyon sağlarken mikroorganizmaların üremesini engeller. Ancak, klorun suda bulunan organik bileşiklerle etkileşime girmesi sonucu, ilk kirleticilerden daha tehlikeli olabilen yan ürünler oluşabilir. Klor, bakterilerin metabolik faaliyetlerini bozarak güçlü bir mikrop öldürücü etki gösterir. Bu süreç, mikroorganizmaların hayatta kalması ve çoğalması için hayati öneme sahip olan enzimlerin kimyasal yapısını değiştirmesi ve işlevsiz hale getirmesiyle gerçekleşir. Ancak, Bacillus ve Clostridium gibi spor oluşturan bazı bakteri türlerine karşı etkisizdir. Aynı şekilde, Giardia lamblia ve Entamoeba histolytica gibi protozaların etkisiz hale getirilebilmesi için daha yüksek klor konsantrasyonları ve uzun temas süreleri gereklidir. Serbest klorun su kaynaklı virüsler üzerindeki etkinliği ise, virüsün türüne, suyun sıcaklığına ve pH seviyesine göre değişiklik gösterebilir (Lanrewaju, 2022).

4.3.3.3 Kloramin

Monokloramin, klor ve amonyağın dikkatlice yönetilen koşullar altında birleştirilmesiyle üretilir, bu işlem genellikle kloraminasyon olarak adlandırılır. Yan ürünlerin ve hoş olmayan tatların oluşmasını önlemek için, bu prosedür sırasında sıkı bir kontrol sağlamak çok önemlidir. Monokloramin, klora kıyasla mikroorganizmaları ortadan kaldırmada daha az etkilidir. Ancak, öncelikle su dağıtım şebekesinde dezenfektan kalıntısının kalmasını sağlamak için kullanılır (Gelete, 2020).

4.3.3.4 Ozon

Elektroliz, ışık temelli işlemler veya elektriksel deşarjların tetiklediği radyokimyasal reaksiyonlar gibi yöntemlerle üretilen ozon, suyla etkileşerek viral proteinleri ve genetik materyali tahrip edebilen serbest radikaller üreten güçlü bir oksidandır. Bu özellik, ozonlamayı insan virüslerinin yayılmasını engellemek için etkili bir yöntem olarak ön plana çıkarır, çünkü ozon, virüsleri geleneksel tedavi yöntemlerine göre daha etkin bir şekilde yok edebilir ya da tespit edilemez duruma getirebilir (Chen, 2021). Yüksek reaktiviteye sahip bir oksitleyici olarak ozon, özellikle mikroorganizmaların hücre duvarlarını parçalama kabiliyeti sayesinde klora kıyasla daha etkili bir dezenfeksiyon sağlar ve bu özelliği onu güçlü bir bakterisit haline getirir (Collivignarelli, 2017).

Yeni nesil dezenfeksiyon yöntemleri, suyun içindeki virüsleri etkili bir şekilde yok etme konusunda büyük bir potansiyele sahip olup, su kaynaklarında virüslerin uzun süre varlığını sürdürmesi sorununu çözme kapasitesine sahiptir. Ancak, bu tekniklerin kullanımı toksik etkiler ve yüksek işletme maliyetleri gibi zorluklarla karşı karşıyadır. Örneğin, UV ışını uygulaması, klor kullanmadan önce virüsleri etkili bir şekilde inaktive ederek dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP'ler) oluşumunu en aza indirebilir. Bu yöntem, klor ihtiyacını azaltabilir. Ancak, daha önce klorlanmış suyu UV ışığına maruz bırakmak, DBP üretimini artırabilir (Lanrewawju, 2022).

4.3.4 Güvenlik riski hakkında bilgiler

En uygun dezenfeksiyon yöntemi seçilirken, farklı aşamalarda görev alan çalışanların güvenliği göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü hem işlem sırasında hem de bakım faaliyetlerinde kazalar meydana gelebilir, bu da çalışanların sağlığını tehdit edebilir. Personel güvenliği, çeşitli su arıtma yöntemlerini değerlendirirken dikkate alınması

gereken temel faktörlerden biridir (Gelete, 2020). Güvenlik riski kriteri için Çizelge 4.27’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.4.1 UV

UV ışığı yerinde üretildiği için çevredeki topluluklar için önemli bir güvenlik riski oluşturmaz. Ancak, işçi güvenliği, UV ışığına maruz kalmaktan korunma, elektriksel tehlikelerden kaçınma ve kullanılmış lambaların, kuvarsın ve balastların doğru şekilde bertaraf edilmesi konularında önlemler almayı gerektirir (Das, 2002).

UV dezenfeksiyonu, kimyasal katkılar gerektirmeyen tamamen fiziksel bir süreçtir. UV ile arıtılan suların zararlı dezenfeksiyon yan ürünleri üretmediği gözlemlenmiştir. UV ışınımı, 1900’lerin başından bu yana dezenfeksiyon amacıyla kullanılmaktadır. Ancak UV dezenfeksiyonu, kalıntı dezenfektan bırakmadığı için, özellikle eski su dağıtım sistemlerinde biyofilm oluşumu ve mikrobiyal yeniden büyüme olasılığı artmaktadır. Bu durum, biyofilmler nedeniyle ağda suyun bulanıklaşması ve kötü tatlar gibi sorunlara yol açabilir. Ayrıca UV dezenfeksiyonu, fiziksel bir işlem olduğu için zararlı veya toksik kimyasalların üretimi, taşınması, depolanması ve işlenmesi gerekmez. Kalıntı dezenfektan bulunmaması haricinde, UV dezenfeksiyonu, etkili bir dezenfeksiyon teknolojisi için gereken çoğu özelliği karşılamaktadır (Kerwick, 2005).

Su arıtma tesislerinde çalışan operatörler, dezenfektanların yol açabileceği sağlık tehditlerini göz önünde bulundurarak güvenliklerini ön planda tutmalıdır. Bu doğrultuda, belirlenen güvenlik kurallarına riayet edilmesi hayati öneme sahiptir. Örneğin, ultraviyole ışınları, tümör oluşumunu tetikleyen ve hızlandıran genetik hasara neden olduğu için "tam kanserojen" olarak nitelendirilir (Lanrewaju, 2022).

4.3.4.2 Klor

Klorlama yöntemi bazı önemli dezavantajlar taşır. Klorun kokusu ve tadı rahatsız edici olabilir, protozoa yumurtaları ve kistlerine karşı etkisizdir, ayrıca trihalometanlar ve 400’ün üzerinde yan ürün meydana getirebilir. Bu sebeplerle, alternatif dezenfeksiyon yöntemlerinin kullanılmaya başlanmasına neden olmuştur. Ayrıca, klorun kullanım miktarının standart olmaması, suyun kalitesi ve dezenfeksiyon gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik göstermesi gerekliliği de bir zorluktur. Klor gazı kullanılan tesisler, yüksek derecede uzmanlık gerektiren mühendislik bilgisi ve bakım sistemleri

gerektirirken, seyreltilmiş klor çözümleri daha düşük maliyetli ve pratik bir alternatif sunar. Yine de klorlama, dünya genelinde uzun yıllar süren uygulamaları sayesinde güvenilirliği ve verimliliği ile yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir (Gelete, 2020).

Bir ürün ya da hizmetin çevresel etkileri, üretimden son tüketime kadar tüm aşamalarını kapsayan bir yaşam döngüsü değerlendirmesi ile anlaşılabilir. Bu yaklaşım, enerji üretimi ve kullanımı ile dezenfeksiyon sürecinde kullanılan kimyasalların taşınması gibi işlemlerin çevresel sonuçlarını daha iyi kavrayabilmeye yardımcı olur. Örneğin, klor gazı basınç altında sıvı halde depolanıp taşınır. Bu yöntem, oksidanların sızması riski ve taşınmanın çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle çevresel ve sosyal açıdan sorun teşkil eder (Kerwick, 2005).

İşyeri düzenlemeleri, ozon, klor gazı veya klor dioksit gibi gaz fazındaki kimyasalların kullanımı sırasında ortamda bulunan kimyasal seviyelerinin izlenmesini şart koşar. Bu tür güçlü oksitleyici maddeler genellikle seyreltilmiş çözeltiler halinde taşınır, bu da taşınan yükün yalnızca bir kısmının aktif bileşen olduğunu gösterir. Ayrıca, depolama, kullanım ve depolama sürecindeki bozulmalar nedeniyle oluşan ek maliyetler, kapsamlı güvenlik önlemleri gerektirir.

Riskleri azaltmak amacıyla fiziksel dezenfeksiyon yöntemleri ya da kimyasal dezenfektanların yerinde üretilmesi gibi seçenekler değerlendirilebilir. Ancak yerinde üretim, daha fazla yatırım, uzman kadro ve bazı durumlarda tehlikeli öncül kimyasalların taşınması ile depolanmasını gerektirir. Örneğin, klor veya klor dioksitin yerinde üretilmesi, hidroklorik asit gibi tehlikeli malzemelerin güvenli bir şekilde saklanmasını zorunlu kılar (Van Haute, 2015).

4.3.4.3 Kloramin

İçme suyu dezenfeksiyonunda klor kullanımı, zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin ortaya çıkması, bazı patojen türlerinin direnç göstermesi ve suyun tat ve koku özelliklerine olumsuz etkileri gibi çeşitli sorunları beraberinde getirmiştir. Bu durum, su sektörünün alternatif dezenfeksiyon tekniklerini sürekli olarak araştırmasını teşvik etmiştir. (Kerwick, 2005) Dezenfeksiyon sırasında ve suyun dağıtım sürecinde, doğal organik maddelerin (NOM) dezenfektanlarla, örneğin ozon, kloramin veya klor ile etkileşime girmesi sonucu dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) meydana gelir. İçme suyunda, bu yan ürünler arasında en yüksek seviyelerde genellikle trihalometanlar

(THM'ler) yer alır ve bunları haloasetik asitler, haloketonlar ve haloasetonitriller gibi maddeler takip eder. Kullanılan dezenfeksiyon yönteminin türü ve miktarı, suyun kalitesi, miktarı ve maliyet-risk dengesi gibi faktörlere bağlıdır.

Modern teknolojilerden ozonlama ve ultraviyole ışın uygulamaları, klorlamaya kıyasla dört ila on kat daha pahalıdır ve dağıtım ağı boyunca kalıcı koruma sağlamaz. Bu nedenle, suyun nakli sırasında devam eden dezenfeksiyon için genellikle ek olarak klor veya kloramin kullanılması zorunlu hale gelir.

Kloramin, klorla göre daha zayıf bir dezenfektan olduğu için benzer bir dezenfeksiyon etkisi elde etmek adına genellikle çok daha fazla miktarda kullanım ve daha uzun temas süresi gerektirir. Buna karşın, uzun süreli etkisi ve dayanıklılığı sayesinde dağıtım hatlarında bakteri üremesini önlemede etkilidir.

Halojen içeren dezenfeksiyon yan ürünlerini (DBP) düşük seviyelerde üretir. Ancak, kloraminin, özellikle böbrek diyalizi gören hastalar için tehlike oluşturduğu ve iyodo-THM'ler ile N-nitrosodimetilamin gibi yüksek toksisiteye sahip azotlu DBP'lerin oluşumuna yol açabileceği bilinmektedir.

Kloraminasyon işlemi sırasında, amonyak türevli kimyasallar ve klor bazlı maddelerin taşınması ve yönetimi gerçekleştirilir. Bu süreç, kloraminlerin oluşumu için yeterli süreyi sağlamak adına geniş depolama alanlarına ihtiyaç duyar. Her ne kadar temas süresi açısından daha az etkili olsa da kloramin bazı su dağıtım sistemlerinde sıkça ikincil dezenfektan olarak tercih edilir. Özellikle uzun temas süresinin mümkün olduğu durumlarda kullanımı daha uygundur (Chowdhury, 2008).

4.3.4.4 Ozon

Tatlı su kaynaklarının yönetimi, şehirlerdeki su ihtiyacını karşılamak ve yoksullukla mücadele etmek için kritik bir rol oynamaktadır. Şehir nüfuslarının hızlı artışı, tarımsal bölgelerden metropollere su taşınması ve etkin bir şekilde işleyen su arıtma altyapılarının geliştirilmesi gereksinimini artırmıştır. Bunun yanında, su tüketimine dayalı küresel ticaret faaliyetleri, tatlı su kullanımının çevresel, ekonomik ve toplumsal sonuçlarını değerlendirme zorunluluğunu ortaya koymaktadır (Jachimowski, 2019).

Aynı şekilde, ozonun solunması, düşük seviyelerde dahi akciğerlere zarar verebilir ve nefes darlığı, göğüs ağrısı, boğaz yanması ve öksürük gibi belirtilere yol açabilir.

Zamanla, ozon kronik solunum hastalıklarını, özellikle astımı şiddetlendirebilir ve vücudun solunum yolu enfeksiyonlarına karşı savunma mekanizmasını zayıflatabilir. Bu nedenle, dezenfektanlarla çalışırken gözlük, maske, eldiven, uzun kollu giysiler ve uzun pantolon gibi uygun kişisel koruyucu ekipmanların eksiksiz kullanılması büyük önem taşır (Lanrewaju, 2022).

4.3.5 Proses Performansı hakkında bilgiler

Farklı dezenfeksiyon yöntemlerinin karşılaştırılması sırasında sistemin güvenilirliği kritik bir faktördür. Güvenilirlik, bir dezenfeksiyon tekniğinin belirli koşullarda ve belirli bir süre boyunca sürekli olarak etkili performans sergileme olasılığını ifade eder. Su dezenfeksiyonu açısından güvenilirlik, arıtılmış suyun, ülke ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen kalite standartlarına ne derece uyduğuna göre değerlendirilebilir. Seçilen dezenfeksiyon yöntemi, güvenilir olmalı ve belirlenen şartlar altında en yüksek verimi sağlamalıdır.

Güvenilirlik, bu yöntemin hem olağan hem de olağanüstü durumlarındaki etkinliğini, ekipman arızası olasılığını, arıtılan suyun kalitesini nasıl etkilediğini ve suyun özelliklerinde meydana gelen değişimlere nasıl tepki verdiğini kapsar (Gelete, 2020). Proses performansı kriteri için Çizelge 4.27’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.5.1 UV

UV için geleneksel cıva buharlı lambaların kullanımı hakkında hem kırılğan hem de cıva ile ilgili tehlikeler sebebiyle UV-LED kullanımının zamanla UV lambalarının yerini alacağına inanılmaktadır. Üstelik UV-LED teknolojisinin ilerlemesi özellikle yenilenebilir kaynaklarla desteklendiğinde enerji tüketiminin büyük ölçüde azaltılması ve elektrik maliyetlerinin düşürülmesi konusunda olumlu etkiye sebep olacaktır (Chen, 2021).

UV ışınıyla dezenfeksiyonun verimliliği, mikroorganizmaların aldığı enerji miktarına bağlıdır. Bu miktar, UV ışığının şiddeti, mikroorganizmalara maruz kalma süresi ile suyun renk ve bulanıklık durumu göz önünde bulundurularak belirlenir. Eğer verilen enerji yetersizse, organizmanın DNA’sına zarar verilebilir ancak bu, onları tamamen yok etmez (Collivignarelli, 2017).

UV ışınları, kimyasal ekleme gerektirmediği için atık suya zararlı bileşiklerin girmesine neden olmaz. Bu nedenle, alıcı ortamlardaki su ekosistemleri veya içme suyu kaynakları üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi bulunmaz. Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'nın birçok bölgesinde, UV ışını, atık suyun dezenfeksiyonunda geleneksel klorlama ya da klor giderme yöntemlerine karşı giderek daha fazla tercih edilen bir alternatif olarak kabul edilmektedir (Das, 2002).

Aynı dezenfeksiyon seviyesine ulaşmak için klordan daha az miktarda kullanılması gerektiğine inanılan UV sistemlerinin verimli çalışabilmesi için reaktörler, balastlar ve lambaların düzgün bir şekilde işlev görmesi sağlanmalı ve UV ışığına maruz kalan tüm yüzeyler düzenli olarak temizlenmelidir. Yetersiz temizlik, UV sistemlerinin başarısız olmasının başlıca nedenlerinden biridir. Temizlik sıklığı, her sistemin ihtiyaçlarına göre farklılık gösterir ve bazı sistemlerin daha sık bakım gerektirdiği gözlemlenebilir. Genellikle, lambaların 12.000 saat kullanım süresinin ardından değiştirilmesi gerekse de tipik bir lambanın ömrü 8.760 ila 14.000 saat arasında değişir (Das, 2002).

4.3.5.2 Klor

Su arıtımında sıklıkla tercih edilen dezenfektanlardan biri olan klor, gaz formu, kloramin bileşikleri ve özellikle sodyum hipoklorit gibi çeşitli türevlerde bulunabilmektedir. Klorun etkisi, suyun içeriğindeki organik maddeler, asitlik veya alkalilik düzeyi ve sıcaklık gibi değişkenlerden büyük ölçüde etkilenir. Gaz halindeki klor suyla temas ettiğinde hızlı bir şekilde hidroliz reaksiyonu geçirerek hidroklorik asit (HCl) ve hipokloröz asit (HOCl) gibi bileşenler oluşturmaktadır (Collivignarelli, 2017).

Amerika Birleşik Devletleri'nde, klor hala atık su dezenfeksiyonunda en yaygın kullanılan kimyasal madde olmaya devam etmektedir. Klorun düşük maliyeti, güvenilirliği ve geniş yelpazede zararlı mikroorganizmaları yok etme yeteneği, onu diğer dezenfektanlara göre daha tercih edilen bir seçenek haline getirir.

Sıcaklık ve pH düzeyleri gibi faktörlerin verimliliğini etkilediği klorlama işleminde; pH değeri 7.6'dan düşük olduğunda, klorun çoğunluğu HOCl formunda bulunurken, pH 7.6'nın üzerinde OCI^- formu baskın hale gelir. Serbest klor, dezenfeksiyon için aktif olan HOCl ve OCI^- bileşenlerini kapsar, ve bunlar arasında hipokloröz asit, başlıca dezenfeksiyon etkisini gösterir (Das, 2002).

Klorlama yönteminin başlıca olumsuzlukları, dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP'ler) oluşma olasılığı ve mikroorganizmalar ile virüslerin yok edilmesindeki verimliliğiyle ilgilidir. Sıcaklık, pH ve temas süresi gibi operasyonel faktörler, klorlama sürecinin patojenleri etkili bir şekilde ortadan kaldırmasını önemli ölçüde etkileyebilirken, bu etmenlerin DBP oluşumu üzerinde pek bir etkisi yoktur (Issa, 2019).

Klorlama, düşük maliyeti, askıda bulunan vejetatif bakterilere karşı üstün etkisi ve her ölçekteki arıtma süreçlerine kolayca adapte edilebilmesi nedeniyle dünya genelinde en yaygın tercih edilen dezenfeksiyon yöntemidir. Ayrıca, gıda güvenliğini ve ürün kalitesini sağlamak amacıyla birçok ülkede yaygın olarak uygulanmaktadır. Bununla birlikte, klorlama bazı ciddi dezavantajlarla birlikte gelir. Bu olumsuzluklar arasında, dezenfeksiyon sırasında toksik yan ürünlerin oluşumu, sucul yaşamı tehdit eden klor kalıntıları, belirli virüs ve protozoa türlerine karşı etkisizlik ve yüksek dozlarda kullanıldığında klor gazı açığa çıkma riski sayılabilir. Bu tür gazlar, işçi sağlığı ve güvenliği açısından tehlike oluşturabilir. Bu durumlar, klorlamanın her tür su dezenfeksiyonu için ideal bir yöntem olmadığını ve kullanılacak dezenfeksiyon tekniğinin arıtma amaçlarına ve çevresel şartlara uygun olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Van Haute, 2015).

4.3.5.3 Kloramin

Kloraminasyon yönteminin birkaç sınırlaması vardır: Uygun uygulama için eğitimli profesyonellere ihtiyaç duyulmaktadır, güvenilir kimyasal tedarikine bağlıdır, patojenlerin ortadan kaldırılmasında alternatif yöntemlere göre daha az etkilidir ve özellikle balık yetiştiriciliği olmak üzere su ürünleri yetiştiriciliği faaliyetleri için risk oluşturmaktadır (Gelete, 2020).

Klorun amonyak içeren bir sulu çözeltiyle tepkimeye girmesi, ortamın pH değeri, sıcaklık ve konsantrasyon gibi değişkenlere bağlı olarak gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyona yol açar. Klor ve amonyak arasındaki etkileşimden doğan reaksiyon süreci, bu iki bileşiğin molar oranlarıyla şekillenir ve kloramin oluşumuyla sonuçlanır. Ardından, kloraminin bazı amino asitlerle girdiği tepkimeler sonucunda organik kloramin bileşikler meydana gelir. Belirli sıcaklık ve pH koşullarında, kloraminin alanin, glisin ve tirozin gibi amino asitlerle reaksiyona girmesi, organohalojen bileşiklerinin sentezlenmesine neden olur (Lanrewaju, 2022).

4.3.5.4 Ozon

Ozonlamanın etkinliğinin yüksek pH, düşük sıcaklık ve parçacıklar, organik maddeler ve iyonların varlığı gibi etkenlerle azaldığı belirtilmektedir. Özellikle, pH değeri ozonun oksidasyon kapasitesini etkilerken düşük sıcaklıkların ozon moleküllerinin hareketini yavaşlatarak etkinliğini olumsuz yönde etkilediğine inanılmaktadır (Chen, 2021). Bunun yanı sıra, ozonlama işlemi suyun rengini ve ultraviyole ışık emilimini ciddi şekilde azaltır, bu da belirli geri kullanım uygulamaları için önemli bir avantaj sunar. Ayrıca, ozonlama, atık suyun arıtımını optimize etmek ve çeşitli organik mikrokirleticileri ortadan kaldırmak için ileri bir yöntem olarak dikkat çekmektedir (Collivignarelli, 2017).

Ozon, geleneksel su arıtma tekniklerinden, örneğin mekanik arıtma, havalandırmalı kum odaları, aktif çamur ve reaktörlerden daha etkili bir şekilde virüsleri suyun içinde inaktive eder. Ancak, düşük sıcaklıklar veya yüksek pH seviyeleri gibi faktörler ozonun etkinliğini azaltabilir. Basitçe ifade edersek, ozonun zayıflama oranı ve oksidasyon gücü, pH değişikliklerinden etkilenir.

Organik maddeler, parçacıklar ve aynı anda bulunan iyonlar gibi diğer faktörler, ozonun virüsleri etkisiz hale getirme gücünü sınırlayabilir. Sıcaklık arttıkça, ozon moleküllerinin hareketi hızlanır ve organik parçacıklar virüse bağlanarak onu ozondan korur, böylece virüsün inaktive olmasını zorlaştırır. Sonuç olarak, znebiyen organik maddeler ozonu tkettike, ozonun dezenfekte edici etkisi azalır (Lanrewaju, 2022).

4.3.6 Bakiye dezenfektan kriteri hakkında bilgiler

Bakiye dezenfektan, dezenfektanın dağıtım sistemindeki aksaklıklar nedeniyle tedavi sonrası oluşabilecek kirlenmelere karşı ek bir koruma sağlayacak kalıntı bırakabilme yeteneğini ifade eder. Bu nedenle, arıtılmış suyun depolandığı ve dağıtıldığı ağda dezenfektan kalıntısının bulunup bulunmadığına dair bir değerlendirme yapılması gereklidir. En uygun dezenfektan, tedavi sonrasında bile kalıcı bir kalıntı bırakarak etkinliğini sürdürebilmelidir (Gelete, 2020). Bakiye Dezenfektan kriteri için izelge 4.27’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.6.1 UV

İçme suyu dağıtım şebekesi, belirli bir dezenfektan kalıntısının varlığını sürdürmelidir. Bu gereksinim, dağıtım hattındaki olası bir kontaminasyon kaynağının varlığından kaynaklanmaktadır. Dezenfeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra, ultraviyole ışınlama arıtılmış suda dezenfektan kalıntısı bırakmadığı için tüketicilere güvenli içme suyu temin edemez (Issa, 2019).

Dezenfektan kalıntısının bulunma gerekliliği, ulusal yönetmeliklere göre değişiklik gösterir. Dağıtım altyapısının durumu ve kaynak suyunun kalitesi gibi unsurlar, gereken kalıntı seviyesini belirler. Kalıntıların varlığı, mikroorganizmaların kontrol edilmesini sağlamak, biyofilm ve dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu sınırlamak ve suyun görsel ve tatsal özelliklerine zarar vermemek amacıyla gereklidir.

UV dezenfeksiyonu, suyun içinde herhangi bir kalıntı bırakmaz. Eğer dağıtım sisteminin yapısı kalıntı olmadan korunabiliyor ve düzenlemeler kalıntıyı zorunlu kılmıyorsa, bu yöntem geçerli olabilir. Bununla birlikte, UV ışınları, kalıntı bırakması gereken sistemlerde temel dezenfeksiyon yöntemi olarak kullanılabilir ve diğer kalıntı bırakan dezenfektanlarla birlikte uygulanabilir (Kerwick, 2005).

Dezenfeksiyondan sonra bakterilerin yeniden çoğalma olasılığı önemli bir sorun haline gelebilmektedir. Bu durum özellikle UV ışınlarına maruz kalan mikroorganizmalar için geçerlidir, çünkü birçok tür, DNA hasarını ışığa bağımlı veya karanlıkta gerçekleşen onarım mekanizmalarıyla düzeltme kapasitesine sahiptir. Bu problemi önlemek amacıyla, monokloramin gibi daha stabil bir dezenfektan ya da klor veya klor dioksit gibi daha az stabil seçeneklerin düşük konsantrasyonda bir kalıntı bırakacak şekilde kullanımı, özellikle arıtılmış suyun depolandığı süreçlerde yeniden üremeyi engelleyebilir (Van Haute, 2015).

4.3.6.2 Klor

Klor, güçlü bir oksitleyici su dezenfektanıdır. Düşük konsantrasyonlarda bile ucuz ve etkilidir ve kalıntı oluşturur (sonradan işlem gerektirmez). Bu yöntemin birincil tercih edilen bakış açısı, klorun suda kalıntı klor olarak daha uzun süre kalmasıdır; bu nedenle, dezenfektan etkisi depolama ve dağıtım sırasında devam eder. Düşük maliyeti ve güçlü dezenfeksiyon kabiliyeti nedeniyle, klorlama dünya çapında yaygın olarak kullanılan bir dezenfeksiyon teknolojisidir (Gelete, 2020).

4.3.6.3 Kloramin

Su dağıtım ağında dezenfektan kalıntısının bulunması, iki ana sebepten ötürü önemlidir. İlki, ağıdaki mikrobiyal yenilenmeyi kontrol etmeye yardımcı olmasıdır. İkincisi ise, özellikle daha fazla kalıntı bırakan ağlarda, sisteme sızabilecek mikroorganizmaları etkisiz hale getirmesidir. Dezenfektan kalıntısı biyofilm oluşumunu engellemeye yardımcı olabilir. Gereken kalıntı miktarı, dağıtım sisteminin durumu ve kaynak suyunun özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Dağıtım ağındaki organik maddeler ve korozyon, oksidan kalıntılarının tükenmesine neden olabilir. Bu sebeple, su kalitesinin farklı özelliklerinin dezenfektan kalıntısının sürekliliğini nasıl etkilediğini anlamak çok önemlidir (Kerwick, 2005).

Kloraminasyon yöntemi kalıntı özelliklerinin dağıtım sırasında arıtılmış suyu olası yeniden kirlenmeden koruduğu için birçok gelişmiş ülkede popülerlik kazanmaktadır (Gelete, 2020).

4.3.6.4 Ozon

Ozon (O_3), kuru oksijen ya da havanın yüksek voltajlı bir elektrik sistemi aracılığıyla işlenmesiyle doğrudan kullanım noktasında üretilir. Kuvvetli oksidasyon özelliğiyle dikkat çeken ozon, dezenfeksiyon sağlamak ve su kalitesini yükseltmek amacıyla su arıtma işlemlerinde sıklıkla tercih edilir. Yüksek oksidasyon kapasitesi sayesinde, su arıtma alanında kullanılan en etkili dezenfeksiyon tekniklerinden biri olarak öne çıkar. Klorun bir alternatifi olarak ozon, düşük yoğunluklarda ve kısa süreli temaslara kimyasal kalıntıları, pestisitleri, mikroorganizmaları ve organik kirleticileri hızlıca yok edebilir. Bununla birlikte, ozonlama yönteminin dezavantajları da bulunmaktadır. Ozon, sudaki konsantrasyonunu hızlı bir şekilde kaybettiği için, dağıtım sistemi içerisinde yeniden kirlenme riskini artırabilir (Gelete, 2020).

Klorun ardından içme suyu arıtımında en sık tercih edilen ikinci dezenfektan olan ozon (O_3), kuru oksijen ya da havanın yüksek voltajlı elektriksel alanlardan geçirilmesiyle üretilir.

Son derece güçlü bir oksidan olan ozon, klordan çok daha üstün bir dezenfeksiyon yeteneğine sahiptir.

Ozon düşük miktarlarda ve kısa süreli temasla etkili sonuçlar sunar, bu da klor, kloramin veya klor dioksitle kıyaslandığında büyük bir avantajdır. Özellikle Giardia

ve *Cryptosporidium* gibi zararlı mikroorganizmaları etkisiz hale getirme konusundaki başarısı ve sporlarla kistlere karşı olan etkinliği, ozonu ayrıcalıklı bir dezenfektan yapar. Ancak, sudaki ozon konsantrasyonu hızla azaldığından dolayı, arıtılmış su yeniden kirlenmeye açık hale gelir. Bu sebeple, ozon genellikle ana dezenfektan olarak kullanılır ve uzun vadeli koruma sağlamak için ikinci bir dezenfektan ile birlikte uygulanır (Pichel, 2019).

4.3.7 Yan ürün oluşturmama hakkında bilgiler

Dezenfeksiyon yöntemlerinin değerlendirilmesinde yan ürünlerin ortaya çıkması önemli bir rol oynar. Bu yan ürünler, dezenfektanların diğer organik ya da inorganik bileşiklerle reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Yapılan çalışmalar, bu yan ürünlere maruz kalmanın insan sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymuştur. Yan ürünlerin varlığı, farklı dezenfeksiyon yöntemleri arasında seçim yaparken ve karşılaştırırken genellikle göz önünde bulundurulmalıdır (Gelete, 2020).

Yan ürün oluşturmama kriteri için Çizelge 4.27’de yapılan puanlamanın oluşturulmasında her bir dezenfeksiyon yöntemi hakkında dikkat edilen ve puanlamayı oluşturan bazı bilgiler aşağıda özetlenmiştir.

4.3.7.1 UV

Canlı mikroorganizmalar, 200 ile 300 nm arasındaki ultraviyole (UV) ışık dalga boyunda, yüksek enerjiye sahip radyasyonu yoğun şekilde emer. UV dezenfeksiyonu, klorlama gibi zararlı yan ürünlerin oluşumuna yol açmaz. Virüsler UV ışığına maruz bırakıldığında, genetik materyalleri ile fosfat bağları ve kapsid proteinlerindeki bağlantılar parçalanabilir (Chen, 2021).

Dezenfeksiyon yöntemleri, patojenleri etkili şekilde yok ederken aynı zamanda arıtılmış atık suyun su ekosistemlerine veya içme suyu kaynaklarına olabilecek etkilerini dikkate alacak şekilde evrilmektedir.

Geleneksel klorlama gibi kimyasal ekleme gerektiren yöntemlerin aksine, UV ışınları herhangi bir zararlı yan ürün oluşturmaması sağladığı çevresel, sağlık ve ekonomik faydalar ile klor bazlı geleneksel dezenfeksiyon yöntemlerine kıyasla çok daha sürdürülebilir olduğunu göstermektedir (Das, 2002). Ultraviyole dezenfeksiyon yöntemi, en az miktarda dezenfeksiyon yan ürünü oluşumunu sağlayarak gerekli kriterleri karşılamaktadır (Issa, 2019).

4.3.7.2 Klor

Dezenfeksiyon işlemleri, organik ve inorganik türlerde çeşitli yan ürünlerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Klorlamada kullanılan dezenfektanlar genellikle sudaki organik madde veya azot bileşikleriyle etkileşime girerek N-nitrosodimetilamin (NDMA), haloasetonitriller (HAN'lar), trihalometanlar (THM'ler) ve haloasetik asitler (HAA'lar) gibi zararlı ve toksik dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP'ler) oluşumuna yol açmaktadır (Chen, 2021). Ayrıca, klorofenoller, kloral hidrat gibi başka zararlı halojenli organik bileşikler de klorun humik ve fulvik asitler gibi doğal organik maddelerle tepkimeye girmesi sonucu ortaya çıkmaktadır.

Yüksek bromür içeriğine sahip sular klorlandığında bromlu THM'ler büyük miktarlarda üretilebilir, ancak genellikle kloroform en yaygın yan üründür. Diğer dezenfeksiyon yan ürünleri ise çoğunlukla çok düşük seviyelerde bulunmaktadır (Collivignarelli, 2017).

Ayrıca dezenfeksiyon amacıyla kullanılan klor ve diğer kimyasallar, yalnızca doğal organik maddelerle değil, aynı zamanda nitrit, nitrat, bromür ve iyodür gibi inorganik bileşenlerle ve çevresel değişimler sonucunda yüzey sularına karışan çok çeşitli kirleticilerle de reaksiyona girebilir. Bu çeşitli etkileşimler, dezenfeksiyon yan ürünü (DBP) öncülerinin oluşumu için sınırsız yakın bir potansiyel yaratır.

Kaynak sulardaki öncül maddelerin yoğunluğu ve çeşitliliği arttıkça, içme suyu arıtma tesislerinde kullanılan dezenfektanların oksidasyon yükü de artar ve bu durum daha fazla türde ve miktarda DBP oluşumuna neden olur (Benítez, 2021).

4.3.7.3 Kloramin

Kloraminasyon yönteminin en büyük faydalarından biri, organik madde varlığında bile trihalometanlar gibi zararlı yan ürünlerin oluşumunu en aza indirme yeteneğidir. Ek olarak, monokloramin ile işlenen su, genellikle klora kıyasla daha yüksek bir tat eşiğine sahiptir ve bu da tüketicilerin hoş olmayan klor tatları hakkındaki şikayetlerini azaltmaya yardımcı olur (Gelete, 2020).

Kloraminasyon, klorlama yerine kullanılabilecek bir seçenek olarak değerlendirilmiştir. Ancak, n-nitrosodimetilamin (NDMA) gibi zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP'ler) ortaya çıkması nedeniyle sağlık açısından risk taşımaktadır (Issa, 2019).

4.3.7.4 Ozon

Ozonla yapılan dezenfeksiyon, organik bileşikler (örneğin aldehitler, karboksilik asitler ve ketonlar) ve inorganik bileşikler (bromat gibi) gibi çeşitli yan ürünlere yol açabilir. Son araştırmalar ozonun NDMA oluşumuna neden olabileceğini ancak trihalometanlar gibi klorlu yan ürünler üretmediğini ortaya koymuştur (Collivignarelli, 2017).

Ozonlama ise, su kaynaklarında bromür veya iyodür bulunduğunda, bromat ve iyodat gibi zararlı yan ürünlerin oluşmasına sebep olabilir ancak çözünmüş organik maddelerden kaynaklanan yan ürünlerin oluşma riskini klorlamaya göre daha az oluşturmuştur (Issa, 2019).

Giardia'nın azaltılmasında ozonlama oldukça etkili olup %5,5 oranında bir azalma sağlar ve bu alandaki lider yöntemdir. UV ışınlama ise %4,5'lik bir düşüşle ikinci sırada yer alarak başarılı bir alternatif sunar. Ancak ozon hem kararsız bir yapıya sahiptir hem de toksiktir, bu da yüksek konsantrasyonlarının insan tüketimi için uygun olmadığını gösterir. Ayrıca ketoasitler, aldehitler, ketonlar ve bromatlar gibi diğer yan ürünlerin arıtılmış suda oluşma riski, ozonlama yönteminin önemli bir başka dezavantajını oluşturmaktadır (Issa, 2019).

4.3.8 TOPSIS yönteminin uygulanması

Elde edilen veriler ışığında oluşturulan karar matrisi ile en uygun dezenfeksiyon senaryosunun seçimi yapılmış olup TOPSIS uygulamasının anlatıldığı bölümdeki hesaplama yöntemleri kullanılarak Çizelge 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36'da gerçekleştirilen işlem basamakları aşağıda sunulmuştur;

Çizelge 4.28: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

Kriter	Önem Derecesi
Maliyet	0,17
Operasyonel Kolaylık	0,12
Patojen Giderimi	0,21
Güvenlik Riski	0,14
Proses Performansı	0,15
Bakiye Dezenfektan	0,12
Yan Ürün Oluşturmama	0,09

Çizelge 4.29: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.

Dezenfeksiyon Yöntemi	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
UV	0,60648	0,62361	0,50650	0,62361	0,62706	0,12309	0,71796
Klor	0,53067	0,44544	0,43414	0,35635	0,41804	0,73855	0,14359
Kloramin	0,45486	0,35635	0,36179	0,44544	0,34837	0,61546	0,21539
Ozon	0,37905	0,53452	0,65122	0,53452	0,55739	0,24618	0,64616

Çizelge 4.30: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.

Dezenfeksiyon Yöntemi	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
UV	0,10310	0,07483	0,10637	0,08731	0,09406	0,01477	0,06462
Klor	0,09021	0,05345	0,09117	0,04989	0,06271	0,08863	0,01292
Kloramin	0,07733	0,04276	0,07598	0,06236	0,05225	0,07385	0,01938
Ozon	0,06444	0,06414	0,13676	0,07483	0,08361	0,02954	0,05815

Çizelge 4.31: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.

Çözüm Değerleri	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
İdeal Çözüm Değeri	0,10310	0,07483	0,13676	0,08731	0,09406	0,08863	0,06462
Negatif İdeal Çözüm Değeri	0,06444	0,04276	0,07598	0,04989	0,05225	0,01477	0,01292

Çizelge 4.32: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Dezenfeksiyon Yöntemi	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
UV	0,00000	0,00000	0,00092	0,00000	0,00000	0,00545	0,00000
Klor	0,00017	0,00046	0,00208	0,00140	0,00098	0,00000	0,00267
Kloramin	0,00066	0,00103	0,00369	0,00062	0,00175	0,00022	0,00205
Ozon	0,00149	0,00011	0,00000	0,00016	0,00011	0,00349	0,00004

Çizelge 4.33: İdeal Uzaklık Değerleri.

Dezenfeksiyon Yöntemi	S_t^+
UV	0,07986
Klor	0,08807
Kloramin	0,10011
Ozon	0,07353

Çizelge 4.34: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Dezenfeksiyon Yöntemi	Maliyet	Operasyonel Kolaylık	Patojen Giderimi	Güvenlik Riski	Proses Performansı	Bakiye Dezenfektan	Yan Ürün Oluşturmama
UV	0,00149	0,00103	0,00092	0,00140	0,00175	0,00000	0,00267
Klor	0,00066	0,00011	0,00023	0,00000	0,00011	0,00545	0,00000
Kloramin	0,00017	0,00000	0,00000	0,00016	0,00000	0,00349	0,00004
Ozon	0,00000	0,00046	0,00369	0,00062	0,00098	0,00022	0,00205

Çizelge 4.35: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.

Dezenfeksiyon Yöntemi	S_i^-
UV	0,09626
Klor	0,08108
Kloramin	0,06208
Ozon	0,08956

Çizelge 4.36: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.

Dezenfeksiyon Yöntemi	S_i^+	S_i^-	P_i
UV	0,07986	0,09626	0,54656
Klor	0,08807	0,08108	0,47932
Kloramin	0,10011	0,06208	0,38278
Ozon	0,07353	0,08956	0,54914

TOPSIS yöntemine dayalı analiz sonuçları, Ozon ve UV yöntemlerinin birbirine oldukça yakın değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.36'da yer alan P_i değerlerine bakıldığında, Ozon (0.54914) ve UV (0.54656) yöntemlerinin neredeyse aynı düzeyde performans sergilediği görülmektedir. Bu nedenle, sonuçlar yalnızca Ozon yönteminin değil, hem Ozon hem de UV yöntemlerinin tercih edilebileceğini göstermektedir.

Bu durumda, her iki yöntem de farklı koşullar altında avantaj sağlayabilir. Örneğin, UV yöntemi, daha düşük maliyeti ve operasyonel kolaylığı ile ön plana çıkarken, Ozon yöntemi daha yüksek giderim verimi ve daha az yan ürün oluşumu gibi avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle, seçimin yapılacağı durumun gereksinimlerine ve önceliklerine göre her iki yöntem de uygun birer seçenek olarak değerlendirilebilir.

4.4 Çamur Yönetim Senaryosu

İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirilen çamur yönetim sürecinde, arıtma sırasında oluşan çamurun çevreye zarar vermesini engellemek ve uygun şekilde bertaraf edilmesi sağlamak için çamur yoğunlaştırma ve susuzlaştırma işlemlerini takiben susuzlaştırılmış çamur, nihai bertaraf için katı atık depolama sahalarına gönderilmektedir (İSKİ, 2021).

Raporda verilen detaylı bilgide 2019 yılında İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde yıllık 24.043.270 kg çamur oluştuğu belirtilmektedir. Günlük ortalama 65,9-ton çamur üretimi olan tesiste çamur ortalama katı madde oranının %19,01 olduğu ve Seymen Atık Bertaraf tesisine nihai bertaraf için gönderildiği ifade edilmektedir.

Mevcut uygulama sürecinde arıtma sonucunda oluşan çamurun Arıtma Uygulamaları, Yapı Malzemesi Üretimi, Toprak İyileştirici & Tarım Uygulamaları ve Düzenli Depolama yöntemleri değerlendirilerek alternatif çamur yönetimi senaryoları karşılaştırılmış olup en uygun yöntemin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Bu karşılaştırma sürecinde, TOPSIS yöntemi kullanılarak alternatiflerin sıralanması ve karar verilmesi sağlanmıştır. TOPSIS yönteminin uygulanabilmesi için, öncelikle hedef tanımlaması yapılmış ve ardından değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Bu bağlamda, karşılaştırmaya dahil edilen çamur yönetim seçeneklerinin değerlendirilmesinde dört ana kriter belirlenmiştir: Çevresel Etki, Ekonomik Etki, Sosyal Kabul ve Teknik Uygulanabilirlik/Performans.

Belirlenen kriterler doğrultusunda, dört farklı çamur yönetim seçeneği için gerekli literatür araştırmaları gerçekleştirilmiş ve bu araştırmalar sonucunda, Çizelge 4.37'de görülebileceği üzere karar matrisi oluşturulmuştur. Söz konusu karar matrisi, her yönetim süreci için ilgili kriterler açısından sahip olduğu avantaj ve dezavantajları ortaya koyarak, alternatiflerin objektif bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Bu karar matrisi oluşturulurken, kriterler fayda ve maliyet yönlü olarak değerlendirilmiş ve 1 ile 10 arasında bir puanlama yapılmıştır. Fayda yönlü kriterlerde daha yüksek puanlar tercih edilirken, maliyet yönlü kriterlerde daha düşük puanlar tercih edilmiştir. Bu bağlamda, sosyal kabul, teknik uygulanabilirlik/performans gibi kriterler fayda yönlü olup, daha yüksek puanlar bu özelliklerin daha avantajlı olduğunu

göstermektedir. Öte yandan, çevresel etki ve ekonomik etki kriterleri maliyet yönlü olup, düşük puanlar daha avantajlı olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 4.37: Çamur Yönetimi İçin Hazırlanan Karar Matrisi.

Çamur Yönetimi	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
Arıtma Uygulamaları	8	7	8	8
İnşaat Uygulamaları	7	5	7	7
Tarım Uygulamaları	5	4	5	5
Düzenli Depolama	4	3	6	6

4.4.1 Çevresel etki kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında çamur yönetimi süreçlerinde çevresel etki, öncelikli değerlendirme kriterlerinden biridir. Bu kapsamda, seçilen çamur yönetim yönteminin çevreye olan doğrudan ve dolaylı etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Çamurun işlenmesi, taşınması ve nihai bertarafı sırasında ortaya çıkan potansiyel çevresel zararlar; sera gazı emisyonları, su ve toprak kirliliği, sızıntı suyu oluşumu ve kullanılan kimyasalların doğal ekosistem üzerindeki etkileri gibi unsurları içermektedir.

Düzenli depolama gibi yöntemlerde çamurun çevreye olumsuz etkileri, sızıntı suyu yönetimi ve metan salınımı gibi faktörlerle artış gösterebilirken; toprak iyileştirici veya yapı malzemesi üretimi gibi geri kazanım odaklı yöntemlerde bu etkiler minimuma indirgenebilir. Bununla birlikte, çamurun taşınması sırasında ortaya çıkan karbon ayak izi ve enerji tüketimi gibi süreçsel etkiler de dikkate alınmalıdır. Çevresel etkiler, yalnızca kısa vadeli sonuçlarla sınırlı kalmayıp, uzun vadeli ekosistem dengesi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmelidir.

Bunun yanı sıra, kullanılan çamur yönetim teknolojilerinin çevre dostu olup olmaması, atık minimizasyonu sağlama potansiyeli ve doğal kaynakların korunmasına katkı sunup sunmadığı gibi unsurlar kritik öneme sahiptir. Örneğin, çamurun tarımsal alanlarda kullanımı sırasında toprağın yapısına zarar vermemesi veya ağır metaller gibi kirlleticilerin çevreye yayılmasını engellemesi gerekmektedir. Çevreye uyumlu teknolojilerin tercih edilmesi hem çevresel etkilerin azaltılmasını hem de ekonomik ve sosyal faydaların artırılmasını sağlayabilir.

Çamur yönetiminde çevresel etki kriterine ilişkin değerlendirmeler, karbon salınımı, atıkların geri dönüşüm potansiyeli, enerji tüketimi ve çevresel riskler gibi parametrelere dayanarak yapılmaktadır. Bu bağlamda, alternatif çamur yönetim

yöntemlerinin çevresel etkiler açısından karşılaştırılması, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır.

Çizelge 4.37’de yer alan değerlendirmeler, farklı çamur yönetim senaryolarının çevresel etki açısından avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmalı olarak ele almış ve bu bağlamda en uygun yöntemin belirlenmesine katkı sunmuştur.

4.4.1.1 Arıtma uygulamaları

İçme suyu arıtma işlemleri sonucunda ortaya çıkan büyük miktardaki artık çamur, çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi gereken önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hızla büyüyen "atık" akışını etkin bir şekilde değerlendirmek, çözüm bekleyen temel bir mesele olmayı sürdürmektedir. Bu bağlamda, söz konusu yan ürünün faydalı bir kaynak hâline getirilmesini amaçlayan birçok girişim ve araştırma yapılmıştır. Su arıtma tesislerinden kaynaklanan çamur, arıtma süreçlerinin kaçınılmaz bir sonucudur ve genellikle koagülasyon sürecinde kullanılan kimyasalların (çoğunlukla demir veya alüminyum bazlı bileşikler) ve ham sudan ayrıştırılan mineral ile organik maddelerin bir karışımını içerir.

Yapılan bir araştırmada, ferrik klorür ve şap çamurlarının toksisitesi karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, her iki çamur türünün de 48 saatlik bir sürede ani toksik etkiler yaratmadığını ortaya koymuştur. Ancak, ferrik klorür çamuru, uzun süreli maruz kalma durumunda doğurganlık oranını düşürmüş ve bazı ölüm vakalarına neden olmuştur. Şap çamuru ise özellikle atık su arıtma süreçlerinde faydalı bir kaynak olarak kullanılmaktadır ve arıtma süreçlerini çeşitli şekillerde iyileştirebilme potansiyeline sahiptir.

Toprak sağlığını iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntem, gübreler ve biyolojik katıların toprakla karıştırılmasıdır. Ancak, bu maddelerin uzun süreli aşırı kullanımı, topraktaki besin elementleri dengesizliğine yol açarak, fosfor (P) ve azot (N) seviyelerinin bitki ihtiyaçlarını aşmasına neden olabilir. Bu da istenmeyen bir şekilde besin maddelerinin su kaynaklarına karışmasına yol açabilir. Hayvan gübresinin, mahsul üretimi için gerekli olan agronomik oranların üzerinde kullanılması durumunda, yüzeysel akışlar ile daha fazla fosfor kaybı yaşandığı ve bunun da su kütlelerinde ötrofikasyon (aşırı besin maddesi yüklenmesi) riskini artırdığı belirtilmektedir. Ayrıca, kümes hayvanı gübresinin, toprak kalitesini iyileştirmek için ucuz bir gübre kaynağı olarak kullanılmasının, fosfor ile birlikte

yüzey akışlarında amonyum (NH_4) seviyelerini de artırdığı gösterilmiştir. Bu tür etkileri azaltmak için, alüminyum, demir ve kalsiyum tuzları gibi kimyasal maddeler kullanılarak, gübre ve biyolojik katılarla zenginleştirilmiş topraklardaki fosforun çözünürlüğü azaltılmaya çalışılmıştır. Ancak, su arıtma çamurları, özellikle tarım arazilerinden gelen fosforlu suyun kaybını önlemek için maliyet açısından uygun bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Su arıtma çamurları, fosforu bağlama kapasitesi yüksek olan hidroksitleri içerdiği için bu konuda etkili olabilmektedir. Ancak, bu çamurların bitkilerin alabileceği fosforu bağlama yeteneği ve inorganik alüminyumun fitotoksik (bitkilere zarar veren) etkileri konusunda bazı endişeler bulunmaktadır. Bu sebeple, su arıtma çamuru kullanımı ile fosfor kirliliği azaltılmaya çalışıldığında, potansiyel olumsuz etkilerin değerlendirilmesi önemlidir. Tüm bu endişelere rağmen, su arıtma çamurlarıyla yapılan çalışmalar, bu çamurun topraklardan ve yüzeysel akışlardan fosfor kaybını azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Su arıtma çamurları, fosfor kirliliğinden etkilenmiş topraklarda hareketli fosforu azaltmada etkili bir çözüm sunmaktadır ve çamurdaki bağlanmış fosfor, toprak pH seviyelerinden bağımsız olarak uzun süre sabit kalmaktadır. Bu bulgu, su arıtma çamurunun, gübre ile işlenmiş topraklardan fosfor transferinin azalmasına ve topraktaki çıkarılabilir fosfor seviyelerinin düşmesine neden olduğunu gösteren önceki çalışmalarla tutarlıdır. Ayrıca, su arıtma çamurunun, topraktaki fosfor miktarını azaltmaktan ziyade, fosfor kayıplarını engellemeye yönelik daha etkili olabileceği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, büyük miktarda çamurun uygulanması, bu çamurun fosfor bağlama etkinliğini sınırlayabilir ve tüm gübre ile işlenmiş topraklar için uygun olmayabilir. Ayrıca, su arıtma çamurunun fosfor bağlama kapasitesinin uzun vadeli kararlılığı ve dayanıklılığı, pH gibi toprak koşullarındaki değişimlere karşı duyarlı olabilir. Araştırmalar, su arıtma çamurlarının kation değişim kapasitesinin, azot seviyelerinin düşürülmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Babatunde, 2016).

4.4.1.2 Yapı malzemesi üretimi

Suyun ağır metallerle kirlenmesi, insanlara, hayvanlara ve ekosistemlere ciddi zararlar verebilecek önemli bir çevresel tehdittir. Bakır ve çinko gibi ağır metaller, madencilik ve çelik üretimi gibi farklı sektörlerden gelen atık sulara yüksek oranda bulunur. Bunun sonucunda, bu metaller yer altı suyu içinde birikerek, su kaynaklarını birçok

farklı şekilde tehlikeye atmaktadır. Ayrıca, atık suyun doğrudan kanalizasyona deşarj edilmesi, izleyen biyolojik arıtma aşamalarını olumsuz şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, ağır metal kirliliği, hem insan hem de hayvan sağlığına zarar vererek çevresel bir tehdit oluşturmaya devam etmektedir. Ağır metal iyonlarının arıtılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olsa da, bu yöntemlerin çoğu yüksek maliyetler, yetersiz verimlilik ve büyük miktarlarda çamur üretimi gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Özellikle bilimsel veya endüstriyel amaçlarla kullanılan laboratuvarlar, bu tür kirlenmeden büyük ölçüde etkilenmektedir.

Ağır metallerin erken aşamalarda uzaklaştırılması, çevreyi korumak adına hayati bir öneme sahiptir, özellikle Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) çamur bertarafına yönelik yönergeleri göz önünde bulundurulduğunda. Çoğu ağır metalin insan sağlığı üzerinde teratojenik ve kanserojen etkilerinin bulunduğu bilinmektedir (Abba, 2022).

Su arıtma çamuru (WTS), suyun arıtılması sırasında ortaya çıkan önemli bir yan üründür ve artan küresel su ihtiyacını karşılamak için gelişmiş işleme yöntemleri ve sürdürülebilir alternatiflerle yönetilmesi gerekmektedir. Dünya genelindeki araştırmacılar ve sanayi kuruluşları, WTS'yi farklı sektörlerde kullanılan değerli bir ham madde olarak değerlendirmek için çeşitli yöntemler geliştirmektedir. Bu yönetim yaklaşımının benimsenmesi, sera gazı salınımını önemli ölçüde azaltmak amacıyla tüm sektörler için önem taşır, çünkü bu sektörler önemli miktarda emisyon üretmektedir. Özellikle, WTS'nin inşaat sektöründe tamamlayıcı çimento malzemesi (SCM) olarak kullanılması, karbon emisyonlarını azaltma ve çöplüklere atılan atık miktarını düşürme açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada, WTP çamurunun potansiyel yeni kullanım alanları ve inşaat sektöründeki SCM olarak değerli olup olmadığı incelenmektedir. Geri dönüşüm, değer katma ve sürekli olarak sağlanan ham madde temini dikkate alındığında, WTS'nin birçok endüstri için değerli bir kaynak olabileceği görülmektedir. İnşaat sektörü, çimento üretiminin büyük bir kısmını oluşturan bir sektör olarak, doğal kaynakları aşırı derecede kullanan ve çevreye büyük zarar veren bir alandır (Mattoso, 2024).

Su arıtma çamurlarından elde edilecek kaynaklar, kimyasal tasarruf sağlamak ve çamur hacmini azaltmak açısından önemli faydalar sağlayabilir. Ancak bu avantajlar, geri kazanım sürecinin içinde yer alan operasyonel zorluklarla sınırlı olabilir. Bu nedenle, ekonomik açıdan iyi bir analiz yapılması faydalı olacaktır. Çamur geri dönüşümüne yönelik halkın güvenlik, sağlık ve çevresel standartlar konusundaki

endişeleri göz önüne alındığında, yeniden kullanımın etkinliğini artırmak için kapsamlı ve ikna edici bir kamuoyu eğitimi önemli bir gerekliliktir (Babatunde, 2016).

Alümina çamurunun klinker üretiminde kullanımı şu avantajları sağlamaktadır:

-Sürdürülebilir çimento üretimi: Çamurun kullanımı, çevre dostu "eko-çimento" üretimini mümkün kılar.

-Enerji tasarrufu: Alümina çamuru, kilden daha ince bir yapıya sahip olduğundan, öğütme işlemi için daha az enerji gerektirir. Bu da işleme süresinin kısaltmasına ve daha verimli bir üretim sürecine olanak tanır.

-Düşük karbon salınımı: Ham madde karışımında daha az kalsit bulunması, üretim sırasında karbon emisyonlarını azaltır. Ayrıca, çamurun geri dönüştürülmesi, doğal kaynakların tüketimini ve atık depolama ihtiyacını azaltarak çevresel etkileri en aza indirir.

-Ağır metallerin hapsedilmesi: Eko-çimento, çamurun yapısında ağır metallerin hareketsiz hâle getirilmesini sağlayarak çevresel kirlenmeyi önler.

Bu yöntem, alümina çamurunun inşaat sektöründe değerlendirilebilmesi için hem ekonomik hem de çevresel açıdan etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Dahhou, 2023).

4.4.1.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları

Sürdürülebilirliğin korunması ve halk sağlığı ve güvenliğinin riske girmemesi için, su arıtma çamurlarının araziye uygulanması gibi bazı yeniden kullanım seçeneklerinin uzun vadeli etkileri üzerinde ayrıntılı bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. En ideal durumda, bu alternatiflerin çoğunun potansiyel etkileri önceden ölçülmeli ve analiz edilmelidir. Tüm yeniden kullanım seçenekleri teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir olsa da başarılı bir şekilde kabul edilmesi için kamuoyunu bilgilendirmek ve eğitmek adına ciddi bir çaba gereklidir. Su arıtma çamurlarının yeniden kullanımındaki en büyük engel, içerdikleri koagülanlar, organik maddeler, iyonlar ve metallerin oluşturduğu kimyasal bileşimdir. Bu kimyasal bileşenler, hala kapsamlı araştırmalar gerektiren bir alanı oluşturmaktadır (Babatunde, 2016).

Su arıtma çamurunun (WTS) çevre üzerinde çeşitli etkileri vardır, bunlar arasında özellikle alüminyum (Al), demir (Fe) ve askıda katı maddelerin arttığı, besin döngüsünde fosfor (P) gibi maddelerin değiştiği gözlemler yapılmaktadır. Bu etkiler,

durgun veya yavaş akan sularda oksijensiz (anaerobik) koşulların oluşmasına, kimyasal bileşimde değişikliklere, artan bulanıklığa ve renk değişimlerine yol açabilir. WTS birikintileri, alıcı su ortamlarında siltasyona sebep olabilir ve yeraltı suyu kirlenmesi riskini artırabilir. Ayrıca, bazı su organizmaları, örneğin balıklar ve omurgasızlar, WTS'nin bentik tabakada birikmesi nedeniyle gelişimlerinde zorluk yaşayabilirler. On farklı su arıtma tesisinden elde edilen alüminyum çamuru üzerine yapılan bir araştırma, çamurdaki suda çözünebilen bileşenlerin suya bırakıldığında alglerin büyümesini etkileyebileceğini göstermiştir. Bir başka çalışmada, demir ve alüminyum çamurunun *Daphnia similis* üzerindeki etkileri incelenmiş ve alüminyum çamurunun yalnızca üremeyi azalttığı, $FeCl_3$ içeren çamura uzun süre maruz kalmanın ise hem ölüme hem de üreme oranlarının düşmesine yol açtığı bulunmuştur. Su yaşamını tehdit etmenin ötesinde, WTS toprağın tuzluluk oranını artırabilir, metal birikimine ve nitrat sızıntısına neden olabilir. Ayrıca, su kalitesini bozan bulanıklık artışı, fotosentez süreçlerini engelleyebilir ve organik madde seviyelerini yükseltebilir.

Alüminyum (Al), şap çamurunda yüksek miktarda bulunur ve bu elementin sucul yaşam üzerindeki etkileri henüz tam olarak açıklanmamış olsa da, bu konuda bazı kaygılar mevcuttur. Yapılan deneylerde, alabalıklara farklı pH koşullarında çeşitli alüminyum dozları uygulandığında, hayvanlarda dengeyi koruma zorluğu, renk değişimleri, algılama kaybı ve genel tepkisizlik gibi fiziksel bozukluklar gözlemlenmiştir. Alüminyumun sucul ortamda toksik etkisi, suyun pH seviyesi ile organik madde miktarına bağlıdır; pH seviyesi düştükçe toksisite artmaktadır. Başka bir araştırma, alüminyumun farelerin beyin dokusunda serbest radikal üretimini artırarak inflamasyon yarattığını, bunun da alüminyum sülfatın oksitleyici etkisini ortaya koyduğunu göstermiştir. İnsanlar üzerindeki çalışmalarda ise, içme suyunda yüksek alüminyum seviyelerine maruz kalan bireylerde bilişsel gerilemenin daha belirgin olduğu, bu durumun Alzheimer hastalığına zemin hazırlayabileceği öne sürülmüştür (Mattoso, 2024).

Son yıllarda, doğal hammadde kullanımının yerine ekonomik, enerji verimli ve çevresel faydaları olan yenilikçi alternatif malzemelere yönelmek giderek daha büyük bir önem kazanmıştır. Artan su tüketimi, içme suyu arıtma tesislerinin yayılmasına yol açmış ve bunun sonucunda içme suyu çamurunun üretimi artmıştır. Bu araştırma, yüzey suyu arıtma tesislerinden elde edilen içme suyu çamurunun kimyasal bileşenlerini incelemek için yeni bir analiz yöntemini önermektedir. Bu yöntem,

belediye katı atıklarının stabilize edilmiş organik kısmıyla birleştğinde, çöplükler için bariyer katmanları oluşturma ya da "biyo-toprak" üretimi gibi çevresel uygulamalarda bu malzemelerin potansiyel faydalı kullanımını ortaya koymaktadır. Ayrıca, araştırma, çöplüklerin kapatılması gibi büyük ölçekli çevre projelerinde standart malzemelere kıyasla çok daha fazla kullanılan yenilenmiş toprakların ya da "biyo-topraklar"ın kalitesini ve çevresel özelliklerini de incelemektedir. Önerilen malzemelerin yeniden kullanım için uygunluğu, stabilize edilmiş organik fraksiyon üzerinde yapılan sızdırma testleri ve çamurun granülometrik, kimyasal ve fiziksel analizleri ile doğrulanmıştır.

Araştırma, içme suyu çamurunun bariyer katmanları ve "biyo-topraklar" üretimi için geri dönüştürülmesinin, teknik avantajlar sunduğu kadar, depolama alanı gereksinimini ve doğal kaynak tüketimini ciddi şekilde azaltabileceğini vurgulamaktadır. Güney İtalya'da, Avrupa'nın en uzun su şebekesine sahip olan Acquedotto Pugliese, saniyede 11.000 litre yüzey suyu işleyebilen altı arıtma tesisine sahiptir. Bu tesisler günde yaklaşık 70-ton çamur üretmektedir ve yılda 25.200-ton çamur üretilmektedir.

İtalya'nın içme suyu ihtiyacını karşılamak için kullanılan suyun %70'inin arıtıldığı ve çamurun %70 nem içerdiği göz önüne alındığında, yıllık çamur üretimi 270.000 tona ulaşmakta olup, bu miktar, Basilicata bölgesinin yıllık kentsel katı atık üretimine eşdeğerdir. Dünya genelinde içme suyu çamuru üretimi hızla artmakta olup, günde 10.000 tonu aşmaktadır.

Caniani (2013) tarafından yapılan çalışmada şu bulgular elde edilmiştir; "Masseria Romaniello" tesisinin su arıtma kapasitesi 1.050 l/s olup, günlük yaklaşık 3-ton çamur üretmektedir, yıllık üretim ise yaklaşık 1.095-ton civarındadır. Ancak, bu çamurun endüstriyel kullanımlarda değerlendirilmesi, bazı teknolojik ve mali kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Çamurun yüksek nem içeriği (%70 ile %80 arasında) taşımayı zorlaştırmakta ve bu durum, uzak bölgelere taşınarak yeniden kullanılabilirliğini sınırlamaktadır. Çamur arıtma işlemi, bant presleri, filtre presleri ve yerçekimi yoğunlaştırıcıları gibi cihazları kapsamaktadır. Su arıtma sürecinde, yalnızca çamurun susuzlaştırılması aşamasında anyon olarak kullanılan alüminyum, karbondioksit, klor dioksit ve polivinil organik flokülant gibi kimyasallar yer almaktadır. Ayrıca, polivinil alüminyum, çamurun alüminyum içeriğini artırmak amacıyla koagülant olarak kullanılmaktadır. Araştırmalar, içme suyu çamurunun kimyasal bileşenlerinin çevreye zarar vermediğini ve insan sağlığına düşük risk taşıdığını göstermektedir. Çamurda

zararlı bileşikler bulunmaz ve toprağa ya da yeraltı suyuna kirletici madde geçişi minimum düzeydedir, bu da çevresel etkilerinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

4.4.1.4 Düzenli depolama

İçme suyu arıtma tesisleri, oldukça hacimli ve depolanması ile bertarafı maliyetli olan alümina çamuru adı verilen bir atık üretmektedir. Kimyasal bileşimi ağırlıklı olarak alüminyum hidroksit ve silikadan oluşan bu çamur, eser miktarda demir, magnezyum, kalsiyum ve potasyum hidroksit içerir ve bu özellikleri ona farklı fizikokimyasal nitelikler kazandırır.

Araştırma sonuçlarına göre, çamurun yaklaşık %20 oranında kuru olması, öğütme gereksinimini ortadan kaldırmakta ve enerji maliyetlerini düşürmektedir (Dahhou, 2023).

Depolama sızıntıları, yeraltı su kaynaklarına sızarak biyolojik birikime yol açabileceği için tehlikeli kabul edilir ve ciddi toksik riskler taşır. Sızıntı suyu sızıntıları, özellikle açık çöplüklerin ve yarı kontrollü depolama alanlarının yaygın olduğu düşük rakımlı kıyı bölgelerinde büyük bir sorun oluşturur. Soğuk iklimlerde, permafrost çözülmesi ve aşırı yağışlar, depolama alanlarından gelen sızıntıların yeraltı suyuna sızmasına veya yüzey suyuyla karışmasına neden olarak kirlenme riskini artırabilir. Çöp sahalarındaki sızıntılar, insan sağlığı ve çevredeki su ile kara ekosistemleri için ciddi tehlikeler arz eder, çünkü bu sızıntılar yüksek oranda kirletici maddeler içerir. Aşırı seviyelerde toksik ağır metaller, metaloidler ve minerallerin vücuda girmesi, Minamata hastalığı, arsenik zehirlenmesi, akciğer fibrozisi, Wilson hastalığı, karaciğer sirozu, beyin hasarı ve kanser gibi tehlikeli sağlık sorunlarına yol açabilir. Ancak, kısa ve uzun süreli maruziyetler üzerine yeterli araştırmaların yapılmamış olması, bu sağlık risklerinin tam olarak değerlendirilmesini güçleştirmektedir. Sızıntıların yanı sıra, çöp sahalarında termal, kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar da çöp gazlarının oluşumuna yol açar. Belediyelere ait katı atıklarda bulunan alkol ve naftalin gibi uçucu bileşikler, depolama alanlarındaki sıcaklık artışıyla birlikte gaz haline dönüşebilir. Ayrıca, atıkların karıştırılması sırasında kimyasal etkileşimler yaşanabilir, bu da gaz salınımını artırabilir. Çöp sahası gazı, özellikle metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) gibi bileşiklerden oluşur ve her ikisi de küresel ısınmayı önemli ölçüde etkiler. Özellikle metanın, karbondioksitten 25 kat daha güçlü bir küresel ısınma etkisine sahip olduğu ve atmosferde yaklaşık 12 yıl kaldığı unutulmamalıdır. Amerika Birleşik

Devletleri'nde çöp sahası gazı, fosil yakıtlar ve tarım sektörünün, özellikle de hayvancılığın ardından metan emisyonlarının üçüncü büyük kaynağı olarak kabul edilmektedir. Bunun yanında, çöp sahası gazındaki yüksek metan oranı, yangın ve patlama gibi ciddi güvenlik tehditlerine de neden olabilir. Çöp gazı salınımına sürekli maruz kalmak, çöp sahalarına yakın bölgelerde yaşayan kişiler için sağlık sorunlarına yol açabilir. Bu gazların oluşturduğu rahatsız edici kokular çoğu zaman doğrudan bir tehlike olarak görülmesine de uzun süreli maruziyet, hem sakinler hem de çalışanlar için olumsuz sağlık etkilerini beraberinde getirebilir. Çöp gazlarına sık sık maruz kalmak, duygusal stres, kaygı, uyku problemleri, baş ağrıları, mide bulantısı, astım, bronşit, solunum zorlukları, boğulma, KOAH, göz ve cilt tahrişi, doğuştan gelen hastalıklar, sinirsel bozukluklar, karaciğer rahatsızlıkları ve kanser gibi çeşitli sağlık problemleriyle ilişkilendirilmiştir. Ancak, çöp sahası gazlarının sağlık üzerindeki etkileri ve bu etkilerden dolayı ölüm oranları hakkında net ve tutarlı verilerin eksikliği, kesin sonuçlar elde etmeyi zorlaştırmaktadır (Nanda, 2021).

4.4.2 Ekonomik etki kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında çamur yönetimi süreçlerinde ekonomik etki, karar verme sürecinde dikkate alınması gereken temel kriterlerden biridir. Bu kapsamda, çamur yönetim yönteminin toplam maliyeti detaylı bir şekilde değerlendirilmelidir. Çamur yönetimi sırasında ortaya çıkan doğrudan işletme maliyetleri, çamurun işlenmesi ve bertaraf edilmesi için gerekli altyapı yatırımları, enerji tüketimi, bakım ve onarım giderleri ile süreçte kullanılan kimyasallar ve sarf malzemelerinin maliyetleri bu değerlendirme sürecinin önemli unsurlarını oluşturmaktadır.

Ekonomik etki kriteri ayrıca, çamur yönetiminde kullanılan ekipmanların ekonomik ömrünü, yenilenme gereksinimlerini ve olası arıza durumlarında ortaya çıkabilecek ek maliyetleri de kapsar. Öte yandan, düzenli depolama gibi yöntemlerde ilk yatırım maliyetleri düşük olmasına rağmen uzun vadeli depolama giderleri ve çevresel etkiler nedeniyle ek maliyetler oluşabilir.

Bu süreçte, ekonomik etkinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi için çamur yönetim yöntemlerinin birim çamur başına maliyeti, enerji tüketimi, kullanılan altyapının geri dönüş süresi ve bertaraf edilen çamurun geri kazanım potansiyeli gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle, geri kazanım odaklı yöntemlerde çamurun yapı malzemesi üretimi veya toprak iyileştirici olarak kullanılması, ekonomik açıdan fayda

sağlayabilirken; taşıma ve bertaraf maliyetlerinin düşürülmesi de işletme bütçesine katkı sağlayabilir.

Ekonomik etki kriterine yönelik değerlendirmeler, yalnızca kısa vadeli maliyet unsurlarını değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirliği de içermelidir. Bu nedenle, alternatif çamur yönetim yöntemleri arasında en uygun seçeneğin belirlenmesinde, toplam maliyetin yanı sıra sistemin ekonomik verimliliği ve geri dönüş süresi dikkate alınmalıdır.

Çizelge 4.37’de yer alan puanlama, farklı çamur yönetim yöntemlerinin ekonomik etkileri açısından karşılaştırmalı analizine dayanmaktadır. Bu analiz, yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını ortaya koyarak en uygun yöntemin belirlenmesine yardımcı olmuştur.

4.4.2.1 Arıtma uygulamaları

Arıtma çamurunun yeniden kullanımı hem tesislerin işletme maliyetlerini düşürme hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlama açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak, kanalizasyon çamuru gibi faydalı kullanımı üzerine detaylı inceleme ve raporlamaların mevcut olduğu diğer çamur türlerinin aksine, arıtma çamurunun yeniden kullanım olanakları hakkında kapsamlı bir değerlendirme hâlâ eksik kalmaktadır.

Pıhtılaştırıcı çamurlar genellikle demir veya alüminyum esaslı tuzlardan oluşur. İçeriğinde değişen miktarlarda mikroorganizma, organik bileşen, askıda parçacıklar ve kimyasal kalıntılar bulunan bu çamurlar genelde katı parçacıklar ya da jel kıvamında bulunur. Her ne kadar çamurun temel element yapısı farklı numuneler arasında büyük ölçüde benzerlik gösterse de içeriği ve bileşenlerin oranı oldukça değişkenlik gösterebilir. Bu değişiklikler özellikle şu faktörlerden etkilenir:

- (1) kullanılan ham suyun özellikleri,
- (2) uygulanan pıhtılaştırıcı maddenin türü ve miktarı,
- (3) tesisin kendine özgü çalışma koşulları. Örneğin, sudaki yüksek bulanıklık ya da renk yoğunluğu genellikle daha fazla kimyasal kullanımı gerektirir ve bu da üretilen çamurun miktarını ve özelliklerini etkiler. Genel olarak, sudaki kirlilikler iki ana gruba ayrılabilir: organik karbon kaynaklı kirlilikler ve inorganik mineraller. Organik maddeler sudaki bulanıklığın ana kaynağı olurken, inorganik maddeler ise genellikle

renk, tat ve koku gibi problemlere neden olur. Doğada, bitkisel maddelerin toprakta ayrışması ve yeniden oluşumu sırasında meydana gelen humik, fulvik ve himatomelanik asitler, suya genellikle sarı ya da kahverengi bir renk verir ve istenmeyen görüntülere yol açar.

Son yıllarda, endüstriyel yan ürünlerden, özellikle de su arıtma çamurlarından düşük maliyetli kompozit adsorbanlar geliştirme fikrine olan ilgi artış göstermiştir. Bu yöntem, kurşun, bakır ve florür gibi ağır metallerin yanı sıra diğer kirleticilerin gideriminde etkili olabileceğini göstermiştir. Su arıtma çamuru, bu bağlamda ekonomik bir adsorban olarak incelenmiştir. Atık sudaki fosforun uzaklaştırılmasında su arıtma çamurunun adsorban olarak kullanılması da kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu yaklaşım, çamurun yapısında bulunan amorf alüminyum ve ferrik iyonlarının, fosforun kimyasal çökmesini ve adsorpsiyonunu artırdığı gerçeğine dayanmaktadır. Bu mekanizmalar, fosforu etkili bir şekilde hareketsizleştirerek su arıtma çamurunu bu tür uygulamalar için güçlü bir aday haline getirmiştir (Babatunde, 2016).

Su arıtma tesislerinde çamur yönetimi, toplam işletme maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Urban (2023) tarafından yapılan çalışmada bu maliyetlerin etkisini analiz etmek için dört farklı senaryo üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Çamur yönetimi süreci; arıtım, taşıma, depolama ve bertaraf gibi alt aşamaları içermekte olup, her bir adımın toplam işletme giderlerine olan etkisi senaryolar arasında farklılık göstermektedir. Çamur yönetiminin yalnızca arıtma ve bertaraf aşamalarındaki maliyetleri, toplam tesis giderlerinin %12 ila %35 arasında bir kısmını oluşturabilmektedir. Bu oran, seçilen bertaraf yöntemine ve kullanılan koagülant türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, seramik sanayisinde çamurun kullanılması veya düzenli depolama yönteminin tercih edilmesi durumunda maliyetlerin farklı oranlarda değiştiği gözlemlenmiştir. Senaryo karşılaştırmalarında, PAC kullanılarak gerçekleştirilen çamur yönetimi maliyetlerinin, ferrik klorür kullanılan yöntemlere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Özel bir karşılaştırmada, PAC ile yürütülen işlemler, ferrik klorür kullanımı durumuna göre maliyetlerin yaklaşık %35 oranında daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Toplam maliyetlere yönelik ayrıntılı bilgiler ise şu şekildedir:

- Senaryo 1: PAC kullanımı ve seramik endüstrisine yönlendirme yönteminde toplam içme suyu arıtma maliyeti $562,66 \times 10^6$ R\$, çamur yönetimi maliyeti ise $81,66 \times 10^6$ R\$ olarak hesaplanmıştır.
- Senaryo 2: Ferrik klorür kullanımı ve seramik endüstrisine yönlendirme yönteminde toplam maliyet $820,37 \times 10^6$ R\$, çamur yönetimi gideri ise $299,08 \times 10^6$ R\$ olarak belirlenmiştir.
- Senaryo 3: Ferrik klorür kullanımı ve tarımsal toprak uygulama yönteminde içme suyu arıtma maliyeti $817,37 \times 10^6$ R\$, çamur yönetimi maliyeti ise $296,08 \times 10^6$ R\$ seviyesindedir.
- Senaryo 4: PAC kullanımı ve düzenli depolama yönteminde ise toplam arıtma maliyeti $573,50 \times 10^6$ R\$, çamur yönetimi maliyeti $92,49 \times 10^6$ R\$ olarak hesaplanmıştır.

Tüm bu maliyetler, 10 yıllık bir proje dönemi boyunca hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Analizler, farklı bertaraf yöntemlerinin toplam maliyetlere olan etkisini ve çamur yönetimi süreçlerinin optimize edilmesiyle elde edilebilecek tasarrufları açıkça göstermektedir. Elde edilen bulgular, su arıtma tesislerinin maliyet yönetimi için geliştirilen modellemelerin önemini vurgulamaktadır.

4.4.2.2 Yapı malzemesi üretimi

Su arıtma tesislerinden kaynaklanan çamurun büyük ölçekli yönetimi, su arıtma tesislerinin işletme bütçesinin kayda değer bir kısmını oluşturabilmektedir. Daha sıkı düzenlemelerin getirdiği maliyet artışları ise bu yönetim yükünü daha da ağırlaştırmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda arıtma çamurunun ekonomik değere sahip bir hammadde olarak yeniden kullanımına yönelik artan bir ilgi bulunmaktadır. Atık oluşumunu azaltma ve kaynakları geri kazanma odaklı yasal ve ekonomik politikalar doğrultusunda yapılan çalışmalar, arıtma çamurunun farklı alanlarda yeniden değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu çamur için yapılan araştırmalar şu alanlara yoğunlaşmıştır: beton, çimento harcı, kil bazlı ürünler ve seramikler (örneğin tuğla, boru ve karo) gibi yapı malzemelerinin üretiminde kullanım; geoteknik projelerde değerlendirilmesi, demir veya alüminyum esaslı pıhtılaştırıcıların geri kazanımı; atık su arıtımında fosfor giderimi ve tarım ile orman endüstrisinde potansiyel uygulamalar.

Yapılan bir çalışmaya göre, demir içeren su arıtma çamurunun tuğla üretimine dahil edilmesi, özellikle fırınlama sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağlama gibi çeşitli avantajlar sunmuştur. Bu çamurun akışkanlaştırıcı etkisi, sürecin enerji verimliliğini artırmış; ayrıca su ve kil gibi ham maddelerin kullanımını azaltarak nihai ürünün büzülmesini en aza indirip renk tonunu iyileştirmiştir. Ancak, alüminyum ağırlıklı çamurun yüksek oranlarda kullanımı, malzemenin çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Ayrıca kanalizasyon külü ile demir bazlı su arıtma çamurunun bir karışımını %5 kuru ağırlık oranında tuğla formülüne başarılı bir şekilde entegre edildiğinde elde edilen deney tuğlalarının özellikleri, kontrol grubuyla karşılaştırıldığında yalnızca küçük farklılıklar göstermiştir; bu da çamur katkısının genel anlamda ürünün pişirilmiş nitelikleri üzerinde sınırlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, deney tuğlalarının, yasal emisyon sınırlarının altında kalarak herhangi bir çevresel ihlale yol açmadığı gözlemlenmiştir (Babatunde, 2016).

Su arıtma çamuru (WTS), sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikler nedeniyle çeşitli alanlarda hammadde olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çamurun ilginç kullanım alanlarından biri, inşaat sektöründe çimentonun kısmi yerine geçen tamamlayıcı bir çimentolu malzeme (SCM) olarak değerlendirilmesidir. Bunun temel nedeni, WTS'nin SiO_2 ve Al_2O_3 oranlarının yüksek olması, bu da ona puzolanik özellikler kazandırır. Puzolanlar, silika ya da amorf silika-alümina içeren ince maddelerdir ve kalsiyum hidroksit ya da oksit ile reaksiyona girerek çimento benzeri bileşikler oluşturur. Isıl işlemle işlenen WTS, kristalin silika ve alümina yapılarının kırılması sonucu daha reaktif bir faza dönüşür ve bu özellikleri güçlendirir. Ancak, WTS üretim miktarlarıyla ilgili global ölçekte kesin verilere ulaşmak zordur. Bununla birlikte, mevcut verilere göre, ABD'de yılda iki milyon tondan fazla kuru çamur üretilirken, İtalya'da yıllık 750.000 ton susuzlaştırılmış çamur üretilmekte ve bu çamurun taşınması için yaklaşık 50 milyon avro harcamaktadır. Fas'ta yıllık bir milyon ton sıvı çamur üretildiği tahmin edilmekte ve bu miktarın 2030 yılına kadar %20 artması beklenmektedir. Avustralya'da bir su arıtma tesisinin yıllık çamur üretimi 43.500 tona kadar çıkabilmektedir. Portekiz'de Águas de Portugal Group (AdP) tarafından yönetilen tesisler 2022'de 18.076 ton çamur üretirken, Hindistan'daki bir tesisin yıllık çamur üretiminin 29.700 ton olması ve yıllık taşıma ve yönetim maliyetinin 400.000 avro civarında olması öngörülmektedir (Mattoso, 2024).

Çevresel standartların sıkılaştırılması ve kamuoyunun artan farkındalığı, alümina çamurunun sürdürülebilir şekilde yönetilmesini önemli bir konu haline getirmiştir. Bu çamurun alternatif kullanım alanları arasında, beton, klinker, seramik tuğla ve çimento harcı gibi inşaat malzemelerinin üretimi, tarımsal katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, atık su arıtımında koagülant olarak kullanılması veya fosfor gideriminde uygulanması yer almaktadır. Özellikle inşaat malzemelerine geri dönüşüm, çevresel açıdan en umut verici seçeneklerden biri olarak öne çıkmaktadır. Çimento gibi ham maddelerin maliyetlerinin yükselmesi, doğal kaynakların azalması ve taş ocağı açma işlemlerindeki idari zorluklar göz önünde bulundurulduğunda, atık su arıtma tesislerinden elde edilen yan ürünlerin inşaat sektöründe kullanımı giderek daha cazip hale gelmektedir.

Kurutulmuş çamurun yaklaşık beşte biri, hali hazırda toz formunda olduğundan, ekstra öğütme işlemine gerek kalmaz ve bu durum çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlar. Alümina çamurunun çimento sektöründe geri dönüştürülmesi hem atık miktarını azaltmak hem de değerli kaynakları geri kazanmak adına oldukça önemlidir. Çeşitli araştırmalar, bu çamurun hammadde yerine kullanılarak yapı malzemesi üretimindeki olasılıklarını değerlendirmiştir. Çamur kullanım oranının, klinkerin mikro yapısına ve çevre dostu çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine büyük ölçüde etki ettiği tespit edilmiştir. Çimento hammaddelerinin ve klinkerlerin öğütülmesi gibi süreçler yoğun enerji tükettiğinden, ince partiküllü alümina çamuru, Portland ve belit çimentosu üretiminde enerji tüketimini azaltmaya yardımcı olur. Zararsız yapısı ve kimyasal açıdan kile benzerliği sayesinde alümina çamurunun çimento üretim süreçlerine entegrasyonu mümkündür. Bu malzemenin inşaat sektöründe yeniden değerlendirilmesi, hem çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltabilir hem de daha sürdürülebilir beton ürünlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir. Ayrıca, çamur işleme ve bertaraf masraflarının yüksekliği göz önüne alındığında, yeniden kullanımı maliyet açısından avantajlı bir seçenek olarak değerlendirilebilir.

Avustralya'da çamurun depolama alanlarında veya kanalizasyon sistemlerinde bertaraf edilmesi, nakliye masrafları hariç, ton başına 130 ila 200 dolar arasında bir maliyet yaratmaktadır. Sadece Victoria eyaletinde bu durum, yıllık 6,2 milyon dolarlık bir harcamaya yol açmaktadır. Hollanda'da ise çamur bertarafı için yıllık 30 ila 40 milyon sterlin arasında bir bütçe ayrıldığı tahmin edilmektedir. Öte yandan, alümina çamurunun yapı malzemelerine dahil edilmesi, yeni hammaddelere olan ihtiyacı

azaltarak mali kazançlar sağlayabilir. Örneğin, Tayland'da yapılan bir çalışmada, su arıtma çamurunun ince agrega yerine kullanılmasıyla içi boş beton blokların maliyetinin %50'ye kadar düştüğü görülmüştür. Yük taşımayan beton bloklarda %30-50 oranında çamur kullanımı, blok başına 1,48 ila 2,35 Tayland bahtı tasarruf sağlamıştır. Brezilya'nın Cubatão şehrinde, kaldırım yapımında kullanılan betona su arıtma çamuru eklenmesinin ekonomik açıdan mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmaya göre, şehir her yıl 9,4 blok kaldırımı inşa ederek yıllık çamur üretimini tamamen değerlendirebilir (her 39 günde bir şehir bloğu üretilebilir). Ayrıca, çimento yerine alümina çamuru külü kullanılması durumunda, metreküp başına 37 ila 200 kilogram çimento tasarrufu yapılabilir. Benzer şekilde, %60-100 su arıtma çamuru ve %0-40 taban külü içeren karışımlarla üretilen pişmiş tuğlaların maliyetlerinin %20 oranında azalabileceğini hesaplanmıştır. Bu bulgular, alümina çamurunun yapı malzemelerine çevresel sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda dahil edilmesinin, bertaraf ihtiyacını ortadan kaldırmanın yanı sıra çevresel zararları azaltabileceğini ve ekonomik kazançlar sağlayabileceğini göstermektedir (Dahhou, 2023).

4.4.2.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları

Su arıtma çamurunun fiziko-kimyasal yapısı, onu araziye uygulanabilir kılmakta ve alkali özellikleri bazı durumlarda toprak kalitesini iyileştirerek toprak düzenleyici işlevi görmesini sağlayabilir. Bu çamurların toprak yerine kullanılabileceği, çünkü büyük ölçüde humik maddeler ve ham sudan gelen tortulardan oluştuğu, dolayısıyla ince yapılı toprakları andırdığını belirtmektedir. İngiliz standardı BS 3882'ye dayalı bir sınıflandırmaya göre, bu çamurlar "ekonomik sınıf-yüksek kil içeriği" kategorisinde yer alır ve bu da toprak yapımı ya da doğrudan toprak olarak kullanım potansiyelini ortaya koyar. Toprak özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra bitki gelişimini desteklemesiyle, bu tür uygulamalar su arıtma çamurunun daha düşük maliyetle bertaraf edilmesini sağlayabilir. Su arıtma atıklarının biyogübre olarak kullanılması amacıyla yapılan çeşitli girişimlere rağmen, bu çamurun potasyum ve diğer gerekli besin maddelerinden eksik olması, onu ticari gübrelerden daha az etkili kılar. Bununla birlikte, çamurdaki düşük metal içeriği, uzun vadeli uygulamalarda toprakta biriken metal miktarına bağlı olarak uygulama alanlarının verimliliğini belirleyen önemli bir faktördür (Babatunde, 2016).

İçme suyu çamurunun özellikleri, kaynağına ve oluşum sürecine bağlı olarak büyük farklılıklar gösterir. Genellikle sıvı formunda bulunan bu çamurun toplam katı içeriği, çökeltim tanklarından elde edilen çamurda %0,1 ile %4 arasında değişirken, filtre geri yıkama sularında bu oran %0,004 ile %0,1 arasındadır. Su arıtma tesislerinde üretilen çamurun %90'dan fazlası su içerdiği için, bertarafı kolaylaştırmak ve hacmini küçültmek amacıyla koyulaştırma, çöktürme ve kurutma işlemlerinden geçirilir. Santrifüjleme ile nemi uzaklaştırılan alümina çamuru, özel depolama alanlarındaki konteynerlerde muhafaza edilir. Koagülasyon ve flokülasyon süreçleri, ham sudaki organik maddelerin uzaklaştırılmasında kilit bir rol oynar. Bu süreç sayesinde organik parçacıkların negatif yükleri dengelenir ve bu parçacıklar, daha büyük kütleler hâlinde bir araya gelerek sudan kolaylıkla ayrılabilir. Alüminyum bazlı koagülanlar, ekonomik ve etkili olmaları nedeniyle en yaygın kullanılan çözücülerdir. Ancak, bu işlemin etkinliği; suyun kaynağı, mevsimsel değişiklikler ve aktif karbon ya da flokülasyonu destekleyen polimerler gibi kullanılan yardımcı kimyasallar gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Kurutulmuş alümina çamuru pH değerinin 6,8 ile 7,3 arasında olması, bu malzemenin bitki yetiştiriciliği ve toprak iyileştirme açısından uygun olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, çamurun yüksek organik madde ve karbon içeriği, toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirici bir etki sunar (Dahhou, 2023).

4.4.2.4 Düzenli depolama

Alümina çamuru yalnızca içme suyu arıtma işlemleri sırasında değil, aynı zamanda endüstriyel ve kentsel atık suların temizlenmesi esnasında da meydana gelmektedir. Kentsel çamurlar genellikle depolama, deniz ortamına boşaltma ya da tarımsal alanlarda yayılım gibi yöntemlerle bertaraf edilir. Ancak, içme suyu arıtımından kaynaklanan çamur, genellikle "temizleme çamuru" ya da "hidroksit çamuru" olarak adlandırılır ve viskoz yapısı, yüksek su içeriği ve düşük organik madde oranı nedeniyle işlenmesi en zorlu atıklardan biri olarak kabul edilir. Dünya genelinde her gün 10.000 tondan fazla alümina çamuru üretilmekte ve genellikle atık su arıtma tesislerinden tahliye edilmektedir. Bu çamurun özellikleri, arıtılan suyun türü, kullanılan kimyasallar ve uygulanan yöntemler gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Yüksek su içeriği nedeniyle çamurun şartlandırılması ve kurutulması gerekmektedir, bu durum ise geri kazanım sürecinin maliyet ve tasarımını etkileyebilir (Dahhou, 2023).

Belediye katı atıkları, geri dönüşüm, yakma, atıktan enerji üretimi, kompostlama ve depolama gibi farklı yöntemlerle işlenir. Bunlar arasında, dünya genelinde atıkların çoğunlukla depolama alanlarına yönlendirilmesi yaygın bir uygulamadır. Atıklar bu alanlara bırakıldığında, fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimlere uğrayarak, depolama alanları ekolojik sistemler gibi çalışır. Sürdürülebilir atık yönetimi için, depolama alanlarının astarları, toprak örtüsünün kalınlığı, sızıntı suyu toplama sistemleri, gaz toplama ve yakma sistemleri gibi öğeler büyük önem taşır. Dünya Bankası'nın tahminlerine göre, 2050 yılına kadar küresel MSW üretimi 3,4 milyar tona ulaşacak. Depolama hem biyolojik olarak parçalanabilen hem de parçalanamayan atıkların belediye sınırları dışında, belirlenmiş alanlarda bertaraf edilmesidir. Birçok ülke, bu yöntemi atıkların bertarafı için en verimli ve yaygın şekilde kullansa da piroliz, sıvılaştırma, gazlaştırma, anaerobik sindirim ve kompostlama gibi diğer kaynak geri kazanım teknolojileri de büyük yatırımlar ve işletme maliyetleri gerektirir. Özellikle yüksek sıcaklıklar ve büyük altyapılar gerektiren yakma yöntemine kıyasla, depolama daha az iş gücü ve daha düşük maliyetli bir seçenek sunar. Ayrıca, depolama alanları, sızıntı suyu ve gaz üretimi yoluyla enerji elde ederek gelir yaratabilir. Sızıntı suyu geri dönüştürülerek, depolama gazı biyogaza dönüştürülüp yakılabilir ve bu enerji üretimi sağlanabilir.

Enerji harcaması açısından, taşımacılık sektörü depolama sürecinde önemli bir yer tutar ve yakmadan çok daha fazla enerji tüketir. Depolama taşımacılığı için toplam enerji girdisi 21.600 t.km olup, bu toplam enerji tüketiminin %58'ini oluşturur. Oysa yakma sadece %15'ini oluşturur. Taşıma mesafelerinin kısaltılması ve yakıt tasarrufu sağlayan atık toplama araçları veya büyük hacimli kamyonlar kullanımı, bu enerji tüketimini azaltabilir. Ayrıca, uygun atık yönetimi, yangın risklerini, metan gazlarının küresel ısınmaya etkisini ve yeraltı suyu kirlenmesine yol açan sızıntı suyu sızıntılarını engellemek için hayati öneme sahiptir (Nanda, 2021).

4.4.3 Sosyal kabul kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında çamur yönetimi süreçlerinde sosyal kabul, çamur yönetim yöntemlerinin seçilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir kriterdir. Bu kriter, yerel halkın, toplulukların ve ilgili paydaşların çamur yönetim yöntemlerine yönelik tutumlarını ve bu yöntemlere karşı gösterdikleri tepkiyi içermektedir. Sosyal kabul, çamurun işlenmesi, taşınması ve bertaraf edilmesi sırasında halk sağlığına olan etkiler,

çevresel risklerin halk üzerindeki algısı, halkın bilinçlendirilmesi ve bu süreçlere katılım düzeyi gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir.

Çamur yönetim yöntemlerinin toplumsal kabulü, seçilen yöntemlerin potansiyel olarak yerel halkı olumsuz yönde etkilememesi gerektiğini vurgular. Örneğin, düzenli depolama gibi yöntemlerin, çevre kirliliği, sızıntı suyu, kötü koku gibi sorunlara yol açabilmesi nedeniyle sosyal kabulü daha düşük olabilir. Öte yandan, toprak iyileştirici veya yapı malzemesi üretimi gibi geri dönüşüm odaklı yöntemler, toplumun çevre dostu ve sürdürülebilir çözümler olarak görmesi nedeniyle daha yüksek bir sosyal kabul oranına sahip olabilir.

Sosyal kabul ayrıca, halkın bu süreçlere nasıl dahil edildiğini ve sürecin şeffaflığını da kapsar. Çamur yönetimi ile ilgili karar alma süreçlerinde, yerel toplulukların bilgilendirilmesi ve geri bildirimlerinin alınması, sosyal kabulü artırabilir. Halkın katılımını teşvik etmek ve çamur yönetimi sürecine dair eğitimler düzenlemek, toplumsal desteği sağlamak açısından önemlidir.

Bu kriter, çamur yönetim yöntemlerinin halk sağlığına olası etkilerinin yanı sıra, çevresel risklerin toplumsal algısını, toplumun duyarlılığını ve toplumun çevreye karşı sorumluluk duygusunu da içerir. Sosyal kabul, yalnızca toplumun herhangi bir olumsuz etkiden korunmasını sağlamayı değil, aynı zamanda toplumun bu süreçlere olumlu bir şekilde katılımını teşvik etmeyi hedefler.

Çamur yönetim yöntemlerinin sosyal kabul açısından değerlendirilmesi, her bir yöntemin yerel topluluk üzerindeki etkisini anlamak ve en uygun yöntemi seçmek için kritik bir rol oynamaktadır. Çizelge 4.37’de yer alan puanlama, farklı çamur yönetim yöntemlerinin sosyal kabul açısından karşılaştırmalı analizine dayanmaktadır ve bu analiz, en uygun yöntemin belirlenmesinde önemli bir katkı sağlamıştır.

4.4.3.1 Arıtma uygulamaları

Su arıtma çamurlarının üretimi kaçınılmaz bir durum olmaya devam ederken, bunların uygun şekilde bertarafı, su kaynaklarının yönetimi ve planlaması açısından önemli bir konu haline gelmiştir. Mevcut bertaraf yöntemlerinin sosyal, ekonomik ve çevresel sebeplerle bazı sınırlamaları bulunmakta ve bu da alternatif, sürdürülebilir uygulamaların daha fazla ön plana çıkmasını gerektirmektedir. Kısa vadede mevcut yöntemler işlevsel olabilirken, nüfus artışı, çevresel sorumluluk ve ekonomik denetim gibi etkenler, daha verimli yeniden kullanım yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu

kılacaktır. Bu nedenle, su arıtma çamurlarının yeniden kullanımı hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği sağlayacak bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Ayrıca, küresel sürdürülebilir kalkınma projeleri ve araştırmalarının sonucu olarak, yeni ve keşfedilmemiş yeniden kullanım yollarının ortaya çıkması beklenmektedir.

Her açıdan değerlendirildiğinde, su arıtma tesislerinden çıkan çamurların çeşitli yöntemlerle, hatta henüz keşfedilmemiş yöntemlerle değerli bir kaynağa dönüştürülmesi, onları "atık" olmaktan çıkarıp sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir hale getirebilir.

Su arıtma çamurlarının yeniden kullanımı, farklı alanlarda çeşitli avantajlar ve zorluklar sunmaktadır. Atıksu arıtma sürecinde, kimyasal koagülant olarak kullanılabilmesi önemli bir fırsat yaratır. Bu kullanım çamur hacmini ve bertaraf maliyetlerini azaltarak ekonomik fayda sağlar. Ancak, geri kazanım süreci karmaşık, maliyetli ve bazen saflık sorunları nedeniyle sınırlı kalabilir. Teknik, ekonomik ve saflıkla ilgili zorluklar nedeniyle, bu uygulamanın yaygınlaşması sorgulanmaktadır.

Koagülant veya adsorban olarak kullanıldığında, çamur çeşitli atıksu kirleticilerinin gideriminde etkili bir seçenek sunar. Özellikle fosfor gibi maddelerin uzaklaştırılmasında başarılıdır ve metal kirliliklerini de azaltabilir. Bununla birlikte, kullanım sırasında tıkanma ve kirletici salınımı riski bulunmaktadır. Ayrıca taşıma maliyetleri bu yöntemin uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Bu nedenle, mekanizma ve adsorpsiyon süreçlerinin daha fazla araştırılması gereklidir (Babatunde, 2016).

4.4.3.2 Yapı malzemesi üretimi

Su arıtma tesislerinden elde edilen çamurların yapı malzemesi üretiminde değerlendirilmesi üzerine yapılan ön çalışmalar, bu malzemelerin kullanım potansiyelini ortaya koymuştur. Ancak, tüm avantajlarına ve bu konuda artan bilimsel araştırmalara rağmen, bu çamurlar henüz geniş çaplı bir endüstriyel uygulama alanı bulamamıştır. Bunun temel nedenlerinden biri, çamurun kimyasal bileşimi, nem oranı ve organik madde içeriği gibi özelliklerinde gözlenen değişkenliktir. Bu durum, ürünlerin güvenilirliği ve performansı açısından endişelere yol açmaktadır. Endüstriyel kullanımın önünü açmak için, çamur tabanlı malzemelerin sabit bir bileşim sergilemesi ve sürekli olarak tutarlı performans göstermesi gerekmektedir.

"Çamur çimentosu"nın basınç dayanımı üzerine yapılan geniş çaplı araştırmalar, pratikte kullanılabilir sonuçlar üretmede yetersiz kalmış ve bu durum daha fazla

araştırma yapılması gerektiğini göstermektedir. Çamur bazlı çimento üzerine yapılan incelemede, çamur külü oranının artırılmasının, çimentonun basınç dayanımını azalttığı gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada ise, hammadde temini ve taşıma maliyetlerinin, çamur çimentosunun ticari açıdan uygulanabilirliğini belirleyen önemli unsurlar olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, geri dönüşüm potansiyelinin, mevcut çamur miktarı ve üretim tesislerine olan uzaklıkla doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Demir gibi zararlı bileşenlerin, pas lekesi, hidrojen gazı üretimi ve alüminyum genişlemesi gibi olumsuz etkiler yaratabileceği konusunda endişeler bulunmaktadır. Ayrıca, yüksek pH seviyelerinde (12-14) çinko ve kurşunun harekete geçmesi ve çamur içindeki camdan kaynaklanan alkali-silika reaksiyonları nedeniyle betonun genişmesi ve sertleşme sürecinde gecikmeler yaşanabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte, çamurdaki sorunlu maddelerin, diğer hammaddelerle karıştırılarak etkilerinin azaltılabileceği savunulmaktadır. Şap çamurunun estetik açıdan daha cazip olabileceği ve bu nedenle yeniden kullanım için daha çekici bir seçenek olabileceği de öne sürülmüştür. Ancak, tüm bu faktörler, su tesisatı çamurunun çimento üretiminde kullanılmasının uygulanabilirliğine dair önemli şüpheler uyandırmıştır. Bununla birlikte, yapılan literatür taramaları, "çamur tuğlaları"nın uygun şekilde geliştirilmesi halinde ekonomik ve çevresel açıdan faydalı bir şekilde üretilebileceğini göstermektedir. Mevcut teknolojik bilgi göz önüne alındığında, özellikle kanalizasyon çamuru başarılı bir şekilde benzer uygulamalarda kullanıldığı için, su arıtma çamurundan tuğla üretimi konusunda teknik bir engel bulunmamaktadır.

Bina ve inşaat sektöründe çamurun çimento üretiminde veya tuğla yapımında değerlendirilmesi, güvenli bir geri dönüşüm yöntemidir. Çimento üretiminde, çamur yüksek katı madde içeriği ile korozyon önleyici özellikler sunar ve çevre dostu bir çözüm olabilir. Ancak organik içerik, mekanik özelliklerde bozulmaya yol açabileceği gibi, çimento üretimi sırasında istenmeyen yan etkilere de neden olabilir. Süreçte kalite kontrolü ve düzenli izleme gereklidir (Babatunde, 2016).

4.4.3.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları

Su arıtma çamuru genellikle, toprağa yayılır veya üst toprağa karıştırılarak arazide kullanılır. Bu çamurun en yaygın kullanım alanlarından biri, tarımsal kireç taşının yerine kireç yumuşatma işlemlerinde kullanılmaktadır. Su arıtma çamuru, giderek daha fazla bir şekilde, araziye uygulanarak bertaraf edilmesi gereken bir madde olarak

kullanılmaktadır. Bu yöntem, toprakların çamuru emme ve bozma kapasitesinden yararlanarak toprağa zarar vermeden ya da toprağın kalitesini arttırarak işlemektedir. Bir miktar arazi alanı gerekse de bu yaklaşımın, çöp depolama alanlarına kıyasla daha ekonomik ve çevre dostu olduğu düşünülmektedir ve genellikle herhangi bir düzenleyici izin gerektirmez. Bu tür kullanım biçimleri, su tesisatı çamurunun bertaraf edilmesi, toprak kalitesinin iyileştirilmesi veya tarım için ortam sağlanması gibi sürdürülebilir çözümler olarak değerlendirilir. Ancak toprak ve tarım ürünleri üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği endişelerini de beraberinde getirmiştir. Araştırmalar, arazi tabanlı uygulamaların başarısının üç ana faktöre bağlı olduğunu ortaya koymaktadır:

- (1) en düşük olumsuz etkiyle en uygun uygulama oranını belirleme,
- (2) çamurun özellikleri
- (3) uygulamanın hedeflenen amacı.

Yapılan bir çalışmada normal saha pH seviyelerinde alüminyum ve demir oksitlerin zıt yüklü kolloidal parçacıklarının, toprakta silikatlarla birleşme eğiliminde olduğu ifade edilmektedir. Toprak kurduğunda, bu oksitler toprak parçacıkları arasında bağlayıcı olarak işlev görerek, toprağın yapısal özelliklerini iyileştirir, örneğin şişmeyi engeller ve agregat stabilitesini artırır. Su arıtma çamurları, toprakların pH'ını ve su tutma kapasitesini artırsa da genellikle gübre işlevi sınırlıdır. Bu tür uygulamalar tarımsal faaliyetlerde, maden alanlarının iyileştirilmesinde ve çöplük örtüsü olarak kullanılmıştır.

Ancak, bu arazi uygulamalarının uygun şekilde değiştirilmesi, çamurun değerli bileşenlerinin geri kazanılması ve toprak kalitesinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşır. Aksi takdirde, denetimsiz uygulamalar toprak özelliklerinde olumsuz ve istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Dolayısıyla, bu tür yöntemlerin faydalı olduğundan emin olmak için, su arıtma çamurunun toprak kalitesi üzerindeki kısa ve uzun vadeli etkilerinin detaylı bir şekilde, fiziko-kimyasal ve biyolojik açıdan incelenmesi gerekmektedir. Bazı araştırmalar, bu tür uygulamaların olumsuz etkilerini vurgularken, diğerleri pH ve su tutma gibi temel toprak özelliklerinde önemli gelişmeler gözlemlemiş ve bu iyileşmelerin optimum bitki büyümesine katkı sağladığını belirtmiştir. Bununla birlikte, yüksek uygulama oranlarının ürün verimliliğini ve bitkilerdeki fosfor kullanılabilirliğini belirgin şekilde azalttığı

saptanmıştır. Uygulama oranı %10'u geçtiğinde, toprakta fosforun kullanılabilirliği büyük ölçüde azalır. Bu nedenle, alkali ile stabilize edilmiş biosolidler ve şap bazlı su arıtma çamuru gibi malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre karıştırılması, bu olumsuz etkileri hafifletebilir.

Su arıtma çamurlarının bertarafı, çevre kuruluşları ve halk için önemli bir endişe kaynağı olup, çevresel toksisite riski ön plana çıkmaktadır. Yapılan araştırmalar, bu çamurların belirli bir seviyeye kadar toksik olabileceğini ve su kütlelerine salındıklarında su kalitesini olumsuz yönde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, su tesisatı çamurlarının toksisite analizlerinin çoğu, bu çamurların arıtılmadan doğrudan su kaynaklarına salınacağı varsayımına dayanmaktadır. Arıtılmış veya susuzlaştırılmış çamurların yeniden kullanımı ya da çöplüklere gönderilmesi ile oluşan potansiyel toksik bileşikler hakkında ise yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu eksiklik, daha fazla araştırma gerektiren bir alan olarak öne çıkmaktadır. Buna rağmen, su tesisatı çamurlarının toksik etkileri, onların yeniden kullanım potansiyelinin araştırılmasına engel teşkil etmemektedir.

Ayrıca, birçok kişi su tesisatı çamurlarının, kanalizasyon çamurları ile aynı şekilde işlenip bertaraf edilebileceğini yanlışlıkla varsaymaktadır. Bu yanlış anlayış, gereksiz yere katı ve kısıtlayıcı düzenlemelere yol açmaktadır. Ancak, su tesisatı çamurları için yeniden kullanım yöntemleri ve süreçleri, özellikle bertaraf teknikleri açısından, kanalizasyon çamurlarından farklıdır çünkü her iki çamurun özellikleri ve yeniden kullanım olanakları önemli ölçüde farklılık gösterir. Bunun yanı sıra, yasal düzenlemeler, su tesisatı çamurlarının faydalı bir şekilde yeniden kullanılmasını sağlayacak uygulamaların geliştirilmesi ve uygulanmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Arazi tabanlı uygulamalar, çamurun dolgu malzemesi, zemin stabilizasyonu ve toprak tamponlama gibi alanlarda kullanımını içerir. Bu yöntemler, maliyet tasarrufu ve toprak stabilitesinde iyileşme gibi avantajlar sağlar. Ancak metallerin birikimi ve fosforun sabitlenmesi gibi dezavantajlar, tarımsal verimi olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, bu uygulamalarda potansiyel etkiler dikkatlice değerlendirilmeli ve kontrollü bir şekilde kullanılmalıdır (Babatunde, 2006).

4.4.3.4 Düzenli depolama

İçme suyu ve atık su arıtma işlemleri, dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gereken giderek artan miktarlarda çamur oluşumuna neden olmaktadır. Çamur işleme süreci bir dizi aşamayı kapsamaktadır: çamurun toplanması ve depolanması, yoğunlaştırma alanına taşınması, yoğunlaştırma işlemi, yoğunlaştırılmış çamurun muhafaza edilmesi, dehidrasyon bölgesine sevk edilmesi, susuzlaştırma işlemi, atomizasyon ve nihai ürünün depolanması (Rodriguez, 2010).

İçme suyu arıtımı sırasında, sedimentasyon ve filtrasyon işlemlerinin bir sonucu olarak içme suyu arıtma çamuru adı verilen bir atık madde ortaya çıkar. Artan içme suyu talebiyle birlikte, içme suyu arıtma çamuru üretiminde de belirgin bir artış yaşanmıştır. Örneğin, Avustralya'da 2017-2018 yılları arasında 342 bin tondan fazla içme suyu arıtma çamuru üretildiği tahmin edilmektedir. Bu atıkların büyük bir kısmı, çöplüklere gönderilmeden önce mekanik olarak susuzlaştırılmaktadır. İçme suyu arıtma çamuru her ne kadar tehlikesiz atık kategorisinde yer alsada bertaraf süreci oldukça maliyetlidir. Sadece Victoria eyaletinde, DWTS bertarafı yılda 6,2 milyon Avustralya doları gibi ciddi bir maliyeti beraberinde getirmektedir (Duan, 2020).

4.4.4 Teknik uygulanabilirlik/performans kriteri hakkında bilgiler

İçme suyu arıtımında çamur yönetimi süreçlerinde teknik uygulanabilirlik ve performans, seçilecek yöntemlerin etkinliğini ve operasyonel verimliliğini değerlendirmede önemli bir kriterdir. Bu kriter, çamur yönetim sistemlerinin tasarımı, uygulanabilirliği ve sistemin verimli bir şekilde çalışabilmesi için gereken teknik gereksinimleri içerir. Çamur yönetim yöntemlerinin teknik olarak uygulanabilirliği, seçilen yöntemin mevcut altyapıya entegrasyonu, sistemin bakım gereksinimleri, performans göstergeleri ve operasyonel sürdürülebilirliği ile doğrudan ilişkilidir.

Teknik uygulanabilirlik, her bir yöntemin saha koşullarına uygunluğunu ve kullanılan ekipmanların mevcut teknolojiyle uyumlu olup olmadığını değerlendirmeyi kapsar. Örneğin, ileri teknolojilere dayalı çamur yönetim yöntemleri, yüksek performans sağlasada daha kompleks bir kurulum ve bakım gerektirebilirken, daha basit sistemler daha az teknik bilgi ve bakım gereksinimi ile uygulanabilir. Bu nedenle, seçilen çamur yönetim yönteminin sistemin uzun vadeli performansını ve verimliliğini artıracak şekilde tasarlanması önemlidir.

Performans, çamur yönetim sürecinin etkinliği ile ilgilidir ve yöntemlerin ne kadar verimli çalıştığına odaklanır. Çamur yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve bertaraf gibi işlemlerin her biri, belirli bir performans seviyesine sahip olmalı ve bu süreçlerin istenen sonuçları sağlaması beklenmelidir. Teknik açıdan uygun olmayan yöntemler, istenilen performans seviyesini sağlayamayarak sistemin verimliliğini düşürebilir ve operasyonel maliyetleri artırabilir.

Bu kriter ayrıca, kullanılan teknoloji ve ekipmanların bakım ve onarım süreçlerini de içerir. Çamur yönetim sistemlerinin sürekli izlenmesi, sistemde oluşabilecek arızaların erken tespiti ve giderilmesi, sistemin yüksek performansta çalışabilmesi için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, teknik uygulanabilirlik/performans kriteri, sistemin uzun vadeli başarısını etkileyebilecek potansiyel riskleri ve zorlukları da göz önünde bulundurulur.

Çamur yönetim sistemlerinin teknik uygulanabilirlik ve performans açısından değerlendirilmesi, her bir yöntemin saha koşullarına, mevcut altyapıya ve operasyonel gereksinimlere uygunluğunu analiz etmeyi gerektirir. Çizelge 4.37’de yer alan değerlendirmeler, farklı çamur yönetim yöntemlerinin teknik performans açısından karşılaştırılmasına dayanmaktadır ve bu analiz, en uygun yöntemin belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır.

4.4.4.1 Arıtma uygulamaları

Su arıtma tesislerinde oluşan çamurdan koagülanların geri kazanılması ve yeniden değerlendirilmesi, birçok avantaj sunabilir:

- (1) su ve atık su arıtımında kullanılan koagülanların maliyetlerini ciddi şekilde düşürebilir;
- (2) belirli durumlarda daha düşük maliyetle deşarj standartlarına uyumu sağlayabilir;
- (3) çamur hacmini azaltarak bertaraf maliyetlerinde düşüşe yol açar;
- (4) metal birikimi ve sızıntı risklerini minimize ederek çamurun depolama sahalarında güvenli bir şekilde bertaraf edilmesine olanak tanır;
- (5) çamurun susuzlaştırılabilirliğini iyileştirir;
- (6) atık depolama sahalarının kullanım ömrünü uzatır. Bununla birlikte, çamurdan koagülanların en verimli şekilde geri kazanımı için gereken koşullar günlük olarak değişkenlik gösterebilir.

Su arıtma işlemlerinde kritik bir adım, çözünmüş ve askıda kalan kirliliklerin pıhtılaşmasını sağlayan metal bazlı çözeltiler ve organik polimerlerin kullanılmasıdır. Ancak, bu kimyasal maddeler genellikle arıtma maliyetlerinin büyük bir kısmını oluşturur ve aynı zamanda üretilen çamurun ana bileşenlerinden biridir. Çamur içerisinde sıkışmış pıhtılaştırıcı maddelerin geri kazanımı ve yeniden kullanımı ise 19. yüzyılda araştırılmaya başlanmış ve özellikle atık su arıtımında çeşitli kirlleticilerin giderilmesinde umut vadeden bir yöntem olarak dikkat çekmiştir. Daha sonraki dönemlerde, bu geri kazanım işlemlerinde asit uygulamaları ve membran ayırma gibi yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin, alkali yıkama yöntemiyle susuzlaştırılmış şap çamurundan elde edilen alüminyum, atık suyun fosfor seviyelerini 9 mg/L'den 1 mg/L'nin altına düşürmeyi başarmıştır.

Birçok araştırma, su arıtma çamurunun koagülant olarak doğrudan atık su arıtımında kullanılabilirliğini incelemiştir; ancak saflık ve maliyetle ilgili kısıtlamalar, bu yöntemin geniş çapta uygulanmasını sınırlamıştır. Örneğin, alüminyum içeren su arıtma çamurunun bir atık su arıtma tesisine eklenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirdi. Sonuçlar, belirli optimum koşullarda, alüminyum bazlı çamurun arıtma tesisinin performansını ve çamurun nihai özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini ortaya koydu. Başka bir örnek, bir Fransız atık su arıtma tesisinde, kanalizasyona yaklaşık 3,5 mmol/L alüminyuma denk gelen bir dozda alüminyum hidroksit çamuru ilavesiyle fosfat gideriminde %94'e varan başarı sağlandı. Bunun yanında, başka bir çalışmada, bitkisel yağ rafinerilerinden kaynaklanan atık suların arıtılmasında demir bazlı su arıtma çamurunun etkili bir çözüm olduğunu gösterdi. pH seviyesi 6'ya ayarlandığında ve 1100 mg/L askıda katı madde çamur dozu uygulandığında, yağ, gres, kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) ve toplam askıda katı madde (TSS) için yüksek giderim verimleri gözlemlendi. Demir bazlı çamurun, şap ve ferrik klorür kadar etkili olduğu; hatta farklı oranlarda ferrik klorür ile birleştirildiğinde performansın daha da arttığı saptandı. Ayrıca kanalizasyon arıtımında partiküler kirleticilerin giderimini artırmak amacıyla alüminyum içeren su arıtma çamurunun yeniden kullanımını araştırılmıştır. Bulgular, alum çamurundaki çözünmeyen alüminyum hidroksitlerin etkili koagülantlar olarak işlev gördüğünü ortaya koydu. 18-20 mg/L alüminyum dozu uygulandığında, COD giderim oranlarının %15 oranında iyileştiği gözlemlendi (Babatunde, 2016).

Abba (2022) tarafından Cezayir’de yapılan bir incelemede, Bakır ve çinkoyu etkili şekilde uzaklaştırılması hakkında yaklaşık 2000 mg/L şap çamuru ve 75 ile 180 dakika arasında bir temas süresi altında çalışılmıştır. Şap çamurunun sıcaklığı 17,20°C olarak ölçülmüş ve ortam sıcaklığı da hesaba katılmıştır. Kullanılan suyun türü ve kalitesiyle birlikte işleme dahil edilen malzemeler, numunenin pH değerinin 7.12 olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, Cezayir’den gelen şap çamuru amorf bir yapıya sahip olarak değerlendirilebilir. Elde edilen bulgulara; çözeltinin pH’ını artırmak, şap çamuru miktarının yaklaşık 480 mg olduğu durumda çinko uzaklaştırma verimliliğini iyileştirmektedir. En yüksek verimlilik için ideal pH değerinin 8 olduğu ve bu pH seviyesinde çinkonun %94,6’sının giderildiği tespit edilmiştir. Çamurun amorf yapısı SEM analiziyle doğrulanmış, FTIR sonuçları ise çeşitli fonksiyonel grupların ve bağların varlığını ortaya koymuştur. Çamurun organik madde açısından oldukça zengin olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek gözenekliliği sayesinde, bu çamur, sentetik atık sudaki bakır ve çinko seviyelerini düşürmek için etkili ve düşük maliyetli bir adsorban olarak kullanılabilir. Atık sudan bakır ve çinko giderme işlemi, pH değeri ile şap çamuru miktarına bağlıdır. Araştırma bulgularına dayanarak, en yüksek uzaklaştırma verimliliği için üç koşul önerilmiştir:

- pH 4’teki şap çamuru, küçük ölçekli sanayi atık suyu arıtımı için uygundur.
- pH 6’daki şap çamuru, içme suyu arıtımı için kullanılır.
- pH 8’deki atık su arıtımı için daha büyük miktarda şap çamuru gerekmektedir.

Cezayir su arıtma tesisinden elde edilen, çinko için %97,4 ve bakır için %96,6 verimlilikle şap çamuru, mükemmel bir sorbent olarak ortaya çıkmış ve bu çamur, yeniden kullanım ve bertaraf için değerli bir endüstriyel atık malzeme olarak umut vaat etmektedir. Düşük maliyeti ve geniş bulunabilirliği nedeniyle, yetkililer şap çamurunun ticari kullanımını araştırmakta ve bunun atık su arıtma uygulamalarında benimsenmesini desteklemeyi hedeflemektedir. Suyun bakır ve çinko ile kirlenmesi, özellikle Cezayir’de, kentsel atık suyun doğaya deşarj edilmesi sonucu ciddi çevresel tehditler oluşturur. Gelecekteki çalışmalar, uzaklaştırma verimliliğini artırmak için temas süresinin rolünü incelemelidir.

Atık suyun (WW) verimli bir şekilde arıtılması, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya ve su ekosistemlerini ve insan sağlığını korumaya büyük katkı sağlar. Bu alanda umut verici bir yöntem, içme suyu arıtma çamurlarının (WTS) koagülant olarak

kullanılmasıdır; bu yöntem, atıkların sürdürülebilir bir biçimde yönetilmesini de mümkün kılar. Castro-Jiménez (2022) tarafından yapılan çalışmada gerçek evsel atık suyun arıtılmasında koagülant olarak değiştirilmemiş WTS ile hidroklorik ve sülfürik asitler ile modifiye edilmiş WTS'nin (reaktif çamurlar veya RS'ler) etkinliğini incelemiştir. İncelenen WTS, çoğunlukla amorf yapıda olup daha fazla inorganik katı içeriyordu. Kuru WTS (D-WTS) ile ıslak WTS (W-WTS) karşılaştırıldığında, ıslak çamur çok daha iyi sonuçlar göstererek, atık suyun berraklığını %76 oranında artırmıştır. Çeşitli reaktif çamurlar arasında, sülfürik asit ile modifiye edilen W-WTS (SRS-W), en düşük aktivasyon maliyetlerine sahip olmuştur. Küçük farklarla SRS-W, özellikle fosfor bileşenlerinin giderilmesinde belirgin bir üstünlük sergilemiştir. W-WTS ve SRS-W ile yapılan en iyi işlemler, doğal sedimentasyon yöntemlerine kıyasla katıların (%90'dan fazla askıda katı, %80'den fazla uçucu askıda katı), organik maddenin (%50'den fazla biyokimyasal oksijen ihtiyacı, %55'ten fazla kimyasal oksijen ihtiyacı) ve toplam fosforun (%75'ten fazla) giderilmesinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. WTS'yi atık suyun ilk aşama arıtımında kullanmak, su sektörü için değerli bir dairesel ekonomi modeli oluşturur ve içme suyu arıtma süreçlerinden çıkan atıkların yeniden kullanılmasıyla Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 6 (Temiz Su ve Sanitasyon) için katkı sağlar.

Keeley (2016) tarafından yapılan çalışmada ise çalışmada kullanılan çamur, demir içeriği %25 olan bir su arıtma tesisinden elde edilmiştir ve bu çamurun işlenmesi için özel bir işlem uygulanmıştır. Çamur, ilk olarak alkali bir ortamda (pH 12) 24 saat süreyle bekletilmiş ve ardından asidik (pH 2) bir ortamda süzülerek demir ve organik bileşiklerin ayrılması sağlanmıştır. Elde edilen bu çözeltiden, ultrafiltrasyon (UF) yöntemi ile büyük moleküllü organik bileşikler uzaklaştırılmış, donnan diyaliz (DD) kullanılarak ise demir çözeltiden çekilerek geri kazanılmıştır. Son aşamada, toz aktif karbon (PAC) ile saflaştırma yapılmıştır, ancak PAC işleminin maliyetinin yüksek olduğu belirtilmiştir. Elde edilen koagülantın performansı, saf ferrik sülfat (VFS) ile karşılaştırıldığında aynı ya da daha iyi sonuçlar vermiştir. Özellikle alkali ortamda ve PAC ile işlenmiş çamur, %77 oranında çözünmüş organik karbon (DOC) giderimi sağlamıştır. Bu koagülantlar, su arıtma süreçlerinde oldukça etkili olmuş, ancak kimyasal maliyetlerin düşürülmesi konusunda önemli bir tasarruf sağlanmış olsa da bu tasarrufun oranı tam olarak netleşmemiştir. Çamurun işlenmesi sırasında kullanılan

yöntemler, saflaştırma sürecinde organik maddelerin giderilmesini sağlarken, aynı zamanda kullanılan koagülant miktarını azaltarak sürdürülebilir bir çözüm sunmuştur. Çalışmada kullanılan çamur, %14 kuru madde içeriği ve %25 demir oranına sahip, 1 kg susuzlaştırılmış çamur olarak alınmıştır. Bu çamur, işlenerek geri kazanılmış koagülant üretimi için kullanılmaktadır. Uygulanan işlem yöntemlerine bağlı olarak, çamurdaki demir miktarının %53 ile %82'si arasında bir geri kazanım sağlanmıştır. Arıtma sürecine dahil edilen geri kazanılmış koagülant, ticari ferrik sülfat (VFS) ile aynı dozajda, yani 24 mg/L demir (Fe) konsantrasyonunda kullanılmıştır. Donnan Diyaliz yöntemiyle elde edilen koagülantın Fe konsantrasyonu ise 2555 mg/L gibi oldukça yüksek bir değeri ulaşmıştır. Bu, saf ferrik sülfat (VFS) ile karşılaştırıldığında önemli bir farktır, çünkü VFS'nin demir içeriği genellikle bu seviyelere ulaşmaz. Geri kazanılmış koagülantın kullanımı, ticari kimyasalların kullanımını azaltarak kimyasal maliyetlerin düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, PAC (toz aktif karbon) kullanımı ile elde edilen en yüksek saflık, ekonomik açıdan sınırlayıcı bir faktördür çünkü PAC'nin maliyeti oldukça yüksektir. Ayrıca, çamurun yeniden kullanımı, bertaraf maliyetlerini düşürme potansiyeli taşırken, Donnan Diyaliz işlemi sırasında elde edilen koagülantın pH'ını yükseltmek için kullanılan NaOH, önemli bir maliyet unsuru oluşturmıştır.

4.4.4.2 Yapı malzemesi üretimi

Çamurun yapı malzemelerine entegrasyonu için yürütülen çalışmalarda, çamurda üretim sürecini etkileyebilecek unsurların, örneğin su ve organik madde oranlarının incelenmesi ilk adım olarak öne çıkmaktadır. Ardından, çamur farklı oranlarda tuğla veya diğer yapı malzemelerine eklenerek en uygun kombinasyon belirlenmeye çalışılır. Örneğin, kil ile 80:20 oranında su arıtma çamuru karıştırılarak üretilen tuğlalarla ilgili bir araştırma, olumlu sonuçlar vermiştir. Yapılan deneyler, özellikle demir bazlı çamurların, içerdiği yüksek demir ve organik madde miktarından dolayı alüminyum bazlı çamurlardan daha uygun olduğunu göstermiştir. Ferrik çamurun, %5 ila %10'luk bir oranda kullanıldığında tuğlaların özelliklerini geliştirdiği, ancak bu oranın üzerine çıkıldığında mekanik dayanıklılık ve donma dayanımı gibi özelliklerin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Daha düşük oranlarda bile (%1, %1,04 ve %5) çamur eklenmesiyle artan su emilimi, özellikle çamurdaki yüksek kireç içeriğinden dolayı yapı malzemelerinin dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir.

Buna ek olarak Çin’de yapılan bir çalışmada, sinterleme yöntemiyle üretilen tuğlalar üzerinde yapılan testler, baraj tortusuyla karıştırılmış %0-20 oranındaki su arıtma çamuru içeren karışımların, 1050–1100°C sıcaklıklarında pişirildiğinde Çin ulusal standartlarına uygun birinci veya ikinci sınıf tuğla kriterlerini karşıladığını ortaya koymuştur. Pişirme işlemi sırasında çamurun %40-50 oranında büzülme gösterdiği ancak sinterlenmiş yüzeyde herhangi bir çatlama veya deformasyon oluşmadığı rapor edilmiştir. Bu sonuçlar, su arıtma çamurunun yapı sektörü için umut vadeden bir malzeme olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, farklı uygulama alanlarında bu malzemelerin kararlılığını ve güvenilirliğini artırmak için daha fazla geliştirme çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Babatunde, 2016).

WTS, çimento, harç ve beton üretiminde, tuğla, fayans ve seramik malzemelerinin imalatında, gübre olarak kullanımı, toprak iyileştirme ve su ve topraktan kirleticilerin temizlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, atık su arıtımı alanında, WTS koagülant, flokülasyon yardımcı maddesi ve biyolojik katıları susuzlaştırmada eş koşullandırıcı madde olarak da işlev görmektedir. WTS'nin, yukarı akışlı anaerobik çamur örtüsü reaktörlerinden çıkan atıkların son arıtımında askıda katıların %84, kimyasal oksijen ihtiyacının (COD) %74 ve biyokimyasal oksijen ihtiyacının (BOD) %78 oranında giderildiği gibi yüksek verimlilik sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, WTS beton üretiminde Portland çimentosu yerine kullanıldığında, %15 WTS ve %7,5 kırılmış kireçtaşı karışımı ile çimento tüketimi %34,7 ile %38,4 arasında azalmakta ve 45 ila 60 MPa arasında dayanım değerleri elde edilmektedir.

Seramik sektöründe, WTS, önemli miktarda silisyum, alüminyum ve demir hidroksit ve oksit içermesi nedeniyle, tuğla ve fayans üretiminde kili kısmi olarak ikame etmek için kullanılmaktadır. Bir örnek olarak, Barselona’daki en büyük atık su arıtma tesisinden elde edilen şap çamuru, seramik kaplama malzemesi olarak kullanılmak üzere bir kompozit olarak incelenmiştir. Şap çamuru kurutulup atomize edilerek, kil ile belirli oranlarda karıştırılmış ve bu karışım, seramik karoların üretimi için kullanılabilir, yüksek kalsiyum oksit içeren ve düşük organik madde içeren bir toz haline getirilmiştir. Başarılı laboratuvar sonuçları doğrultusunda, tesis şimdi bu atomize kurutma yöntemini büyük ölçekte uygulayarak günde 30 ton kuru çamur işlemekte ve bu, ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır. Çimento sektöründe de klinker üretiminde kil yerine püskürtmeli kurutulmuş çamur kullanılmaktadır. Yapısal seramiklerin üretiminde WTS kullanımıyla ilgili yapılan bir diğer çalışmada,

kullanılan atık miktarının ve uygulanan kurutma yöntemlerinin seramik tuğlaların özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Kilin %5 ila %20'sinin kurutulmuş şap çamuru ile değiştirilmesi, kilin kuruma hassasiyetini azaltmış, seramiğin yoğunluğunu %20 oranında düşürmüş ve %20 oranında donma-çözülme yöntemiyle kurutulmuş şap çamuru eklenmesiyle basınç dayanımını 7,0 MPa'dan 10,2 MPa'ya yükseltmiştir. Bu bulgular, WTS'nin seramik tuğlalar üretmek için başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle, yüksek Fe_2O_3 içeren ferrik çamur, seramik üretiminde daha umut verici sonuçlar göstermektedir. Bu çamur, tuğlaların mekanik özelliklerini ve pişirme sıcaklıklarını artırmanın yanı sıra, doğal bir pigment olarak tuğlalara kırmızımsı bir renk de kazandırmaktadır.

Ortalama bir su arıtma tesisi, yılda yaklaşık 100.000-ton inorganik çamur üretmekte olup, bu çamurun temel bileşenleri arasında SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, bu çamur, çevresel faydalar sağlayarak maliyetleri düşürmek, enerji tüketimini azaltmak ve çevre kirliliğini en aza indirmek amacıyla çimento ve hafif yapı malzemelerinin üretiminde hammadde olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.

Dahhou (2016) tarafından yapılan çalışma, termal işlem görmüş çamurun, çimento üretiminde kullanılan mineral bileşenlerin %20'sinden fazlasının yerine geçebileceğini ortaya koymaktadır. İçme suyu arıtma tesislerinden elde edilen çamur, çimento üretimi için gereken ana inorganik bileşenlerle büyük oranda uyumludur. Ayrıca, pek çok çalışma, atık su arıtımından elde edilen çamurun yapı malzemelerinde geleneksel hammaddelere alternatif olarak kullanımını incelemiştir. Bulgular, çamur miktarının çimento klinkerinin mikro yapısını ve çevreci çimentoların nihai fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Bu çalışmada kullanılan çamur, Fas'ın Bouregreg su arıtma tesisinden elde edilmiştir. Söz konusu tesis, iki ana birimden oluşmaktadır: biri atık suyun geri dönüşümüne, diğeri ise arıtma süreçlerinden kaynaklanan çamurun işlenmesine ve arıtılmasına ayrılmıştır. Çalışmada, bu ikinci birimden elde edilen çamur kullanılmıştır. Su arıtma süreci genellikle şu adımlardan oluşmaktadır:

- Ön eleme ve dezenfeksiyon; klor gazı eklenerek oksidasyon işlemi yapılır.
- Koagülasyon; alüminyum sülfat eklenmesiyle gerçekleştirilir.

- Çökeltme; ardından polielektrolitler ve/veya aljinatlar kullanılarak flokülasyon yapılır.

Yapılan çalışmada bu tesisten elde edilen çamur için yoğunlaştırma işleminde 20 g/L su uzaklaştırma oranına ulaşıldıktan sonra, toplanan çamur hava depolama birimine aktarılmıştır. Yağışların neden olabileceği sulandırıcı etkileri önlemek için, çalışmada kullanılan çamur kurak sezonda toplanmıştır. Kurutulan çamur, belirli sıcaklıklarda yakılarak değerlendirilmiştir.

Rodriguez (2010) tarafından yapılan çalışmada ise atomizasyon işlemi, 3000 kg/saat'e kadar buharlaştırma kapasitesine sahip döner eş akışlı bir sistem kullanılarak gerçekleştirilmekte olup, %5'in altında kalan nem oranıyla yarı akışkan, ince bir madde elde edilmiştir. İspanya'da, içme suyu arıtma tesislerinde atıklarının önemli bir bölümü çöp sahalarına gönderilmektedir. Ancak püskürtme kurutma yöntemiyle çamurun hacmi %75 oranında azaltılabilir ve bu işlem, taşınması ve kullanımı daha pratik olan kuru bir malzeme elde edilmesini sağlar. Bu araştırmada, işlenen bu çamurun çimento sektöründe kullanım potansiyeli değerlendirilmektedir. Atomize edilen çamur, %35 oranında amorf madde, %12-14 arasında organik içerik, %2-4 nem oranı ve çeşitli mineralleri içermektedir: muskovit (%25,9), kuvars (%11,6), kalsit (%16,7), dolomit (%3,1), serafinit (%4,6) ve anortoklaz (%2,3).

4.4.4.3 Toprak iyileştirici & tarım uygulamaları

Su arıtma çamurunun toprak üzerinde kullanımına dair yapılan araştırmalar, bazı olumlu bulgulara ulaşmıştır. Örneğin, tarım arazisine ferrik çamur uygulaması ile yapılan bir testte, uygulama oranlarının belirli kurallara uyulması koşuluyla ferrik çamurun, tarımsal otlaklar ve hayvancılık üretimi için faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır. Araştırma, çamurdaki metallerin toprak ve bitkiler üzerinde yaratabileceği olumsuz etkilerin, özellikle pH'ı orta derecede nötrden alkaliye kayan topraklarda minimum seviyelere indiğini belirtmiştir. Güney Afrika'da yapılan bir çalışmada, su arıtma çamurunun dört farklı toprak türüne uygulanmasının ardından toprakların doymuş hidrolik iletkenliğinin uygulama oranları arttıkça doğrusal bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu artış, toprak yoğunluğundaki azalma ile birlikte gözenekliliğin artmasına yol açmıştır. Yüksek oranlarda yapılan uygulamalarda bazı olumsuz etkiler görülse de bunlar yalnızca çok yüksek miktarda çamur uygulandığında belirginleşmiştir. Çamurdaki polimerlerin silt ve kili çakıl büyüklüğünde agregalar

halinde bağlama yeteneği, toprağın su tutma kapasitesini uzun vadede artırmaya katkı sağlamıştır. Başka bir çalışmada, su tesisatı çamurunun toprak yapısına etkisi incelenmiş ve belirli oranlarda uygulama yapıldığında toprak bazal solunum ve mikrobiyal topluluk yapısında önemli değişiklikler olduğu bulunmuştur. Ancak, bu değişikliklerin toprak mikrobiyal çeşitliliğini olumsuz yönde etkilemediği ve çamurun neden olduğu pH artışlarının toprak sağlığına zarar vermediği, aksine normal pH seviyelerinde kaldığı için faydalı olduğu değerlendirilmiştir. Bu bulgular, başka bir çalışmada şap çamuru uygulamasıyla su tutma kapasitesinin arttığını gözlemlediği çalışmalarıyla tutarlıdır. Ancak, bu tür testlerden elde edilen uzun vadeli etkileri genellemekte dikkatli olunmalıdır, çünkü çoğu araştırma kısa süreli verilere dayanmaktadır. Ayrıca, su tesisatı çamurlarının bileşimi, aynı kaynaktan gelse bile büyük farklılıklar gösterebilir, bu yüzden araziye uygulanmalarının etkileri konusunda genellemeler yapmak yanıltıcı olabilir. Uygulama oranlarının da her duruma özgü olarak dikkatlice değerlendirilmesi gerekmektedir, çünkü yüksek oranlar bitkiler için erişilebilir fosforun sabitlenmesine yol açabilir, bu da bazı durumlarda faydalı olabilir. Araştırmalar, su tesisatı çamuruna fosfor eklemenin bitkilerdeki fosfor eksikliklerini giderebileceğini göstermektedir. Bir araştırma, su arıtma çamuruna 0 ile 77,4 g P/kg arasında fosfor eklenerek yapılan uygulamanın, eşdeğer gübre uygulaması ile karşılaştırıldığında, su tesisatı çamurunun 14,6 ila 19,4 g P/kg fosfor eklediği ve toprağa eklenen fosforun miktarının laboratuvar ölçümlerine göre beklenenden daha düşük olduğu sonucuna varmıştır. Bu durum, kullanılan koagülanttaki katyonik polimerin fosfor salınımını tetiklemesi ile açıklanmıştır (Babatunde, 2016).

4.4.4.4 Düzenli depolama

Su arıtma çamuru (WTS), içme suyu arıtma sürecinde oluşan bir atıktır. Bu atık, arıtma için kullanılan kimyasalların yanı sıra su kaynağındaki askıda katı maddelerden ve suyun kendisinden gelen bileşiklerden oluşur. Su arıtma tesislerinde (WTP) yaygın olarak kullanılan kimyasal maddeler arasında alüminyum sülfat, ferrik klorür, klorlu ferröz sülfat, ferrik sülfat, alüminyum hidroksi klorür, sentetik polimerler (katyonik, anyonik ve iyonik olmayan) ve doğal polimerler (örneğin, manyok ve patates nişastası) yer alır. WTS, doğal yollarla lagünlerde veya kurutma yataklarında veya santrifüj, vakum filtresi, filtre presleri ve torba gibi mekanik yöntemlerle susuzlaştırılabilir.

En uygun yöntem, alanın büyüklüğü, iklim koşulları, ekipman maliyetleri ve sistemin bakım ve işletme gereksinimlerine göre değişiklik gösterir.

Bu faktörlerin yanı sıra, düzenleyici otoritelerin belirlediği katı madde içeriği standartları da dikkate alınmalıdır. Çamurun genellikle çöplüğe gönderilmeden önce en az %20 katı madde içeriğine ulaşacak şekilde susuzlaştırılması gerekir. Bu hedefe ulaşmak için filtre presleri veya santrifüjler kullanılabilir. Verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla, pek çok firma mekanik susuzlaştırma işleminin ardından son kurutma adımını güneş enerjili seralarla tamamlamaktadır. Bu yöntem, ürünün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirerek endüstriyel alanda daha fazla değer kazanmasını sağlar (Mattoso, 2024).

Arıtma çamurlarının düzenli depolanmasına ilişkin yönetmelikler, belirli parametreleri sağlamak kaydıyla atıkların depolanmasını düzenler. 26 Aralık 2019 tarihli değişiklikle, tehlikesiz olarak sınıflandırılan arıtma çamurlarının, belirtilen parametreleri karşılaması, sınır değerlerde artış yapılmaması ve en az %50 kuru madde içermesi koşuluyla II. sınıf düzenli depolama tesislerinde depolanabilmesi için 1 Ocak 2025 tarihine kadar çözünmüş organik karbon (ÇOK) limit değeri aranmamaktadır. Bunun yanı sıra, arıtma çamurlarının belirli sınır değerler altında yer alan toplam organik karbon (TOK) değerleri de dikkate alınarak, belirli sınıflarda depolama yapılması gerekmektedir. Bu çerçevede, TOK değeri 250.000 mg/kg'ı geçmemeli ve bu düzenleme 1 Ocak 2025 tarihine kadar geçerli olacaktır. Ayrıca, atık yönetimi yönetmeliği gereğince, yıldız (*) işareti bulunmayan tehlikesiz atıklar, ek-4 listesinde belirtilen kriterlere uygun olarak değerlendirilmektedir. Örnek olarak, insan tüketimi ve endüstriyel kullanım için gerekli suyun hazırlanmasından kaynaklanan atıklar arasında yer alan su berraklaştırılmasından elde edilen çamurlar, karbonat gideriminden kaynaklanan çamurlar ve iyon değiştirici rejenerasyonundan elde edilen çözeltiler de bu kapsamda değerlendirilmektedir (Atık Yönetimi Yönetmeliği & Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik). İstanbul'da son bertaraf işlemleriyle ilgili olarak, 2022 yılı itibarıyla karışık evsel atıkların yaklaşık %70'i doğrudan düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmiştir. İstanbul'da, Odayeri (260 ha), Kömürcüoda (233 ha) ve Seymen (234 ha) olmak üzere üç adet düzenli depolama alanı bulunmaktadır (İBB, 2022).

1995 yılından itibaren İstanbul'daki belediye atıkları, şehre ait Avrupa ve Asya yakalarında kurulan Atık Bertaraf Tesisleri'nde bertaraf edilmeye başlanmıştır.

Avrupa Yakasında Eyüpsultan, Göktürk, Odayeri ve Silivri Seymen tesisleri yer alırken, Asya Yakasında Şile, Karakiraz ve Kömürcüoda bölgeleri atık bertarafını gerçekleştiren alanlardır. Bu tesislerdeki bertaraf süreçleri, yerel ve küresel yönetmeliklere uygun şekilde planlanıp yürütülmektedir. Atıkların bertarafı sırasında gerçekleştirilen işlemler, sızıntı suyunun arıtılması, depo gazlarının yönetilmesi ve atıkların doğru bir şekilde depolanıp izlenmesini kapsamaktadır. Çevresel olumsuz etkilerin minimize edilmesi adına çeşitli önlemler alınmaktadır. Örneğin, geçirimsiz tabakaların yerleştirilmesi, atıkların düzgün şekilde sıkıştırılması ve ara örtülerin uygulanması gibi işlemler bu önlemler arasında yer almaktadır. Odayeri Düzenli Depolama Sahası'nda, depo gazı ile enerji sağlanarak yaklaşık 4.000 m²'lik alanda bir sera kurulmuş ve burada üretilen sebze fideleri, çiftçilere ücretsiz olarak dağıtılmaktadır. Kömürcüoda Atık Bertaraf Tesisi'nde ise 2023 yılının haziran ayında tamamlanan Lot-4 sahası, 12,39 hektarlık bir alanı kapsamakta ve 7.498.015 m³ kapasiteli bir depolama alanına sahiptir. Seymen Atık Bertaraf Tesisi'nde ise Lot-6 ve Lot-13 sahalarına ait projeler, Bakanlık onayı için beklemektedir. 2023 yılı itibarıyla, İstanbul'un Asya ve Avrupa Yakasındaki Odayeri, Seymen ve Kömürcüoda tesislerinde toplamda 5.424.841 ton atık depolanmıştır (İSTAÇ, 2023). 2023 yılı itibarıyla İstanbul'daki arıtma tesislerinde kullanılan kimyasal maddelerin toplam miktarı yıllık 123.093.656 kilogram olarak kaydedilmiştir. Aynı dönem içinde tesislerden uzaklaştırılan çamur miktarının ise yıllık 147.434.230 kilogram olduğu belirtilmiştir (İSKİ, 2023).

4.4.5 TOPSIS yönteminin uygulanması

Elde edilen veriler ışığında oluşturulan karar matrisi ile en uygun filtrasyon senaryosunun seçimi yapılmış olup TOPSIS uygulamasının anlatıldığı bölümdeki hesaplama yöntemleri kullanılarak Çizelge 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45, 4.46'da gerçekleştirilen işlem basamakları aşağıda sunulmuştur;

Çizelge 4.38: Kriterler İçin Belirlenen Önem Dereceleri.

Kriter	Önem Derecesi
Çevresel Etki	0,20
Ekonomik Etki	0,30
Sosyal Kabul	0,20
Teknik	0,30
Uygulanabilirlik/Performans	

Çizelge 4.39: Karar Matrisinin Normalize Edilmesi.

Çamur Yönetimi	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
Aritma Uygulamaları	0,64466	0,70353	0,60648	0,60648
İnşaat Uygulamaları	0,56408	0,50252	0,53067	0,53067
Tarım Uygulamaları	0,40291	0,40202	0,37905	0,37905
Düzenli Depolama	0,32233	0,30151	0,45486	0,45486

Çizelge 4.40: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisin Elde Edilmesi.

Çamur Yönetimi	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
Aritma Uygulamaları	0,12893	0,21106	0,12130	0,18194
İnşaat Uygulamaları	0,11282	0,15076	0,10613	0,15920
Tarım Uygulamaları	0,08058	0,12060	0,07581	0,11371
Düzenli Depolama	0,06447	0,09045	0,09097	0,13646

Çizelge 4.41: İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Değerlerinin Eldesi.

Çözüm Değerleri	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
İdeal Çözüm Değeri	0,12893	0,21106	0,12130	0,18194
Negatif İdeal Çözüm Değeri	0,06447	0,09045	0,07581	0,11371

Çizelge 4.42: İdeal Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Çamur Yönetimi	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
Aritma Uygulamaları	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
İnşaat Uygulamaları	0,00026	0,00364	0,00023	0,00052
Tarım Uygulamaları	0,00234	0,00818	0,00207	0,00466
Düzenli Depolama	0,00416	0,01455	0,00092	0,00207

Çizelge 4.43: İdeal Uzaklık Değerleri.

Çamur Yönetimi	S_i^+
Aritma Uygulamaları	0,00000
İnşaat Uygulamaları	0,06814
Tarım Uygulamaları	0,13131
Düzenli Depolama	0,14727

Çizelge 4.44: İdeal Olmayan Noktalara Olan Uzaklık Değerlerinin Eldesi.

Çamur Yönetimi	Çevresel Etki	Ekonomik Etki	Sosyal Kabul	Teknik Uygulanabilirlik/Performans
Aritma Uygulamaları	0,00416	0,01455	0,00207	0,00466
İnşaat Uygulamaları	0,00234	0,00364	0,00092	0,00207
Tarım Uygulamaları	0,00026	0,00091	0,00000	0,00000
Düzenli Depolama	0,00000	0,00000	0,00023	0,00052

Çizelge 4.45: İdeal Olmayan Uzaklık Değerleri.

Çamur Yönetimi	S_i^-
Aritma Uygulamaları	0,15945
İnşaat Uygulamaları	0,09467
Tarım Uygulamaları	0,03419
Düzenli Depolama	0,02733

Çizelge 4.46: İdeal Çözüme Göreli Yakınlığın Hesaplanması.

Çamur Yönetimi	S_i^+	S_i^-	P_i
Aritma Uygulamaları	0,00000	0,15945	1,00000
İnşaat Uygulamaları	0,06814	0,09467	0,58147
Tarım Uygulamaları	0,13131	0,03419	0,20657
Düzenli Depolama	0,14727	0,02733	0,15654

Bu çalışma, farklı değerlendirme kriterleri kullanarak içme suyu arıtımında çamur yönetimi için en uygun yöntemin seçimini belirlemek amacıyla TOPSIS yönteminin uygulanmasını göstermektedir. Çalışma, çamur yönetimi yöntemlerinin çevresel etki, ekonomik etki, sosyal kabul ve teknik uygulanabilirlik/performans gibi kriterler açısından değerlendirilmesini içermektedir. Arıtma Uygulamaları, İnşaat Uygulamaları, Tarım Uygulamaları ve Düzenli Depolama olmak üzere dört farklı çamur yönetimi yöntemi, TOPSIS yöntemiyle analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, Arıtma Uygulamaları yönteminin özellikle çevresel etki, ekonomik etki, sosyal kabul ve teknik uygulanabilirlik/performans kriterlerinde diğer yöntemlere kıyasla öne çıktığını göstermektedir. Bu üstün özellikler, Arıtma Uygulamalarının çamurdan değerli yan ürünler üretme potansiyeli, çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirmesi, düşük maliyetlerle verimli çalışabilmesi ve topluluklar tarafından kabul görmesi ile ilişkilidir. Arıtma Uygulamaları, aynı zamanda ileri teknoloji kullanımı ve otomatikleştirilmiş süreçlerle bakım ve işletme kolaylığı sağlamakta, farklı su kalitesi koşullarında yüksek performans sergileyebilmesi nedeniyle esnek bir kullanım sunmaktadır.

Bununla birlikte, Arıtma Uygulamaları, maliyet kriterinde bazı sınırlamalar göstermiştir. Yüksek başlangıç yatırım maliyetleri ve karmaşık altyapı gereksinimleri, bu yöntemin ekonomik açıdan dikkatlice değerlendirilmesini gerektirmektedir. Ancak, bu yöntem, uzun vadeli işletme giderlerini minimize etme potansiyeline sahip olup, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Diğer yöntemler incelendiğinde, İnşaat Uygulamaları ekonomik avantajları ve bazı temel teknik özellikleriyle dikkat çekerken Tarım Uygulamaları, çevresel etkiler ve sosyal kabul açısından bazı avantajlar sağlamıştır. Düzenli Depolama ise özellikle çevresel etki ve sosyal kabul açısından önemli dezavantajlara sahiptir.

TOPSIS modelinden elde edilen sonuçlara göre, tüm kriterlerin değerlendirilmesi sonucunda Arıtma Uygulamaları, çamur yönetimi için en çok tercih edilen yöntem olarak belirlenmiştir. Özellikle çevresel etki, ekonomik etki, sosyal kabul ve teknik uygulanabilirlik/performans konularında sağladığı üstünlükler, bu yöntemi çamur yönetimi için ideal bir seçenek haline getirmiştir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İstanbul İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirilen içme suyu arıtma süreçlerinin değerlendirilmesi yapılmış ve TOPSIS yöntemi kullanılarak en uygun koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon, dezenfeksiyon ve çamur yönetimi yöntemleri belirlenmiştir. Çalışma, her bir süreç için çeşitli değerlendirme kriterlerine dayanarak karar verme sürecine katkı sağlamış ve yöntemlerin performansını objektif bir şekilde karşılaştırmıştır.

İlk olarak Koagülasyon-flokülasyon sürecinde, dört farklı koagülant arasında yapılan karşılaştırmada Demir (III) Klorür, özellikle arıtma verimi, doz-maliyet ilişkisi ve pH uyumu açısından öne çıkmıştır. Demir (III) Klorür, düşük dozajlarda bile yüksek arıtma performansı sağlaması, geniş pH aralığında etkili olması ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunmasıyla diğer koagülantlara kıyasla daha avantajlı bulunmuştur. Diğer koagülantlar ise çevresel etkiler, işletme kolaylığı ve kullanım kolaylığı gibi alanlarda farklı avantajlar sunmuş ancak Demir (III) Klorür'ün üstün özelliklerine kıyasla daha sınırlı kalmıştır.

Filtrasyon yöntemleri arasında yapılan karşılaştırmada ise Ultrafiltrasyon, özellikle performans ve işletme kolaylığı kriterlerinde öne çıkmıştır. Ultrafiltrasyon, küçük partikülleri ve mikroorganizmaları etkili bir şekilde giderme, yüksek su kalitesi sağlama ve gelişmiş otomasyon sistemleri ile işletme süreçlerini kolaylaştırma özellikleri ile diğer yöntemlere göre avantaj sağlamıştır. Ancak, yüksek enerji tüketimi ve yatırım maliyetleri nedeniyle ekonomik açıdan dikkatli bir değerlendirme gerektirmiştir. Sonuç olarak, tüm kriterler değerlendirildiğinde Ultrafiltrasyon, içme suyu arıtımı için en uygun filtrasyon yöntemi olarak belirlenmiştir.

İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde yapılan değerlendirmeler ve TOPSIS yöntemine dayalı analizler, Ozon tekniğinin yüksek giderim verimi, daha az yan ürün üretimi ve üstün proses performansı gibi avantajlarıyla öne çıktığını göstermiştir. Bununla birlikte, Ozon'un yüksek maliyeti ve bakiye dezenfektan bulundurmaması gibi dezavantajları olduğu da belirtilmiştir.

Ancak, Çizelge 4.36'daki P_i değerlerine bakıldığında, Ozon (0.54914) ve UV (0.54656) yöntemlerinin performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, yalnızca Ozon'un değil hem Ozon'un hem de UV'nin koşullara bağlı olarak tercih edilebileceğini ortaya koymaktadır.

UV yöntemi, daha düşük maliyet ve operasyonel kolaylık avantajlarıyla dikkat çekerken, Ozon yöntemi daha yüksek giderim verimi ve yan ürün oluşumundaki avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu nedenle, tesisin ihtiyaçlarına, maliyet değerlendirmelerine ve çevresel gerekliliklere göre her iki yöntemin de uygun seçenekler olduğu söylenebilir. Bu yaklaşım, TOPSIS sonuçlarını daha dengeli bir şekilde yorumlamayı mümkün kılmaktadır.

Son olarak, çamur yönetimi sürecinde, farklı yönetim seçenekleri arasında yapılan değerlendirmede Arıtma Uygulamaları, çevresel etki, ekonomik etki, sosyal kabul ve teknik uygulanabilirlik/performans kriterlerinde en yüksek puanı alarak en uygun yöntem olarak belirlenmiştir. Arıtma Uygulamaları, çamurdan değerli yan ürünler üretme potansiyeli, çevreye olan olumsuz etkileri minimize etme ve düşük maliyetlerle verimli çalışma gibi avantajlar sunarken, topluluklar tarafından da kabul görmektedir. Diğer yöntemler, özellikle düzenli depolama gibi seçenekler, çevresel etki ve sosyal kabul açısından dezavantajlı bulunmuş, inşaat uygulamaları ve tarım uygulamaları ise belirli avantajlar sağlamış olsa da Arıtma Uygulamalarının üstünlüklerine ulaşamamıştır.

Sonuç olarak, İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirilen içme suyu arıtma süreçlerinde, dezenfeksiyon, koagülasyon-flokülasyon, filtrasyon ve çamur yönetimi yöntemlerinin her biri için yapılan TOPSIS analizi, en uygun yöntemlerin belirlenmesinde etkili bir araç olmuştur. Bu analizler, tesisin verimliliğini artıracak, çevresel sürdürülebilirliği sağlayacak ve ekonomik açıdan daha uygun alternatiflerin seçilmesine olanak tanıyacaktır. Elde edilen bulgular, arıtma süreçlerinin optimize edilmesi ve daha verimli hale getirilmesi için önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Abba, A. B., Saggai, S., Touil, Y., Al-Ansari, N., Kouadri S., Nouasria, F. Z., Najm, H. M., Mashaan, N. S., Eldirderi, M. M. A. & Khedher, K. M.** (2022). Copper and Zinc Removal from Wastewater Using Alum Sludge Recovered from Water Treatment Plant, *Sustainability*, 14, 9806.
- Abubakar, U. I., Ibrahim, N. A. & Bobi, A. S.** (2022). Comparative Studies on the Performance Evaluation of Slow and Rapid Sand Filters in Potable Water Purification and Production – A Case Study of Chanchaga Water Works, *Arabian Journal of Chemical and Environmental Research*, Vol. 09 Issue 2, 257–269.
- Akgül, S., Bekaroğlu, Ş. Ş. & Yiğit, N. Ö.** (2020). Zenginleştirilmiş koagülasyon prosesiyle içme sularından doğal organik madde giderimi, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(6), 1138-1147.
- Al-Sahari, M.** (2020). Prospects of Fresh Market Wastes Management in Developing Countries, *Water Science and Technology Library*, 92.
- Alavijeh, H. N., Sadeghi, M., Kashani, M. R. K. & Moheb, A.** (2022). Efficient Chemical Coagulation-Electrocoagulation-Membrane Filtration Integrated Systems for Baker's Yeast Wastewater Treatment: Experimental and Economic Evaluation, *Cleaner Chemical Engineering*, 3, 100032.
- Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Nassani, D. E., Maskari, T. A., Amr, S. S. A. & Abujazar, M. S. S.** (2022). Application of Natural Coagulants for Pharmaceutical Removal from Water and Wastewater: A Review, *Water*, 14, 140.
- Anh, N. V., Tran, H. H. T.** (2020). Evaluation Of Performance Indicators of Selected Water Companies in Vietnam, *Vietnam Journal of Science and Technology*, 58 (5A), 42-53.
- Atık Yönetimi Yönetmeliği.** (2015). T.C. Resmi Gazete, 29314, 2 Nisan 2015.
- Atıkların Düzenli Depolanması Dair Yönetmelik.** (2010). T.C. Resmi Gazete, 27533, 26 Mart 2010.
- Aziz, S., Mazhar, A. R., Ubaid, A., Shah, S. M. H., Riaz, Y., Talha, T. & Jung, D.** (2024). A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques, *Applied Water Science*, 14:169.
- Babatunde, A. O. & Zhao, Y. Q.** (2007). Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37:129–164.

- Bahrodin, M. B., Zaidi, N. S., Hussein, N., Sillanpää, M., Prasetyo, D. D. & Syafiuddin, A.** (2021). Recent Advances on Coagulation-Based Treatment of Wastewater: Transition from Chemical to Natural Coagulant, *Current Pollution Reports*, 7:379–391.
- Balioti, V., Tzimopoulos, C. & Evangelides, C.** (2018). Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection, *Proceedings*, 2, 637.
- Berktaş, A., Aydın, M. E. & Pektaş, M.** (1997). İçme Suyu Aritiminda Kimyasal Madde Kullanimi Ve Optimizasyonu, *Journal of Engineering Sciences*, 3, 1, 255-260.
- Caniani, D., Masi, S., Mancini, I.M. & Trulli, E.** (2013). Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications, *Waste Management*, 1461–1468.
- Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., García, E. F. & Correa-Ochoa, M. A.** (2022). Primary Treatment of Domestic Wastewater with the Use of Unmodified and Chemically Modified Drinking Water Treatment Sludge, *Sustainability*, 14, 9827.
- Cescon, A. & Jiang, J. Q.** (2020). Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment, *Water*, 12, 3377.
- Chen, C., Guo, G., Yang, Y., Oguma, K., Hou, L.** (2021). Comparative effectiveness of membrane technologies and disinfection methods for virus elimination in water: A review, *Science of the Total Environment*, 801, 149678.
- Chen, F., Zhu, L., Tang, J., Li, D., Yu, F., Bai, F., Ye, Z., Cao, L. & Geng, N.** (2023), A Pilot-Scale Nanofiltration–Ultrafiltration Integrated System for Advanced Drinking Water Treatment: Process Performance and Economic Analysis, *Processes*, 11, 1300.
- Chew, C. M., Aroua, M. K., Hussain, M. A. & Ismail, W. M. Z. W.** (2016). Evaluation of ultrafiltration and conventional water treatment systems for sustainable development: an industrial scale case study, *Journal of Cleaner Production*, 3152-3163.
- Chowdhury, S. & Champagne, P.** (2008). Selecting Water Disinfection Processes using Fuzzy Synthetic Evaluation Technique, *Water Quality Research Journal of Canada*, Volume 43, No. 1, 1–10.
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S. & Torretta, V.** (2017). Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants, *Sustainability*, 10, 86.
- Cuartucci, M.** (2020). Ultrafiltration, a cost-effective solution for treating surface water to potable standard, *Water Practice & Technology*, Vol 15 No 2.
- Dahhou, M., El Hamidi, A. & El Hamidi M.** (2023). Reusing Drinking Water Sludge: Physicochemical Features, Environmental Impact and Applications in Building Materials: A Mini Review, *Chemistry Africa*, 6:1145–1161.
- Dahhou, M., El Moussaouiti, M., Benlalla, A., El Hamidi, A., Taibi, M. & Arshad, M. A.** (2016). Structural Aspects and Thermal Degradation Kinetics of

Water Treatment Plant Sludge of Moroccan Capital, *Waste Biomass Valor*, 7:1177–1187.

- Das, T. K.** (2002). Evaluating the life cycle environmental performance of chlorine disinfection and ultraviolet technologies, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 4, 32–43.
- Demirbas, E. & Kobya, M.** (2017). Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes, *Process Safety and Environmental Protection* 105, 79–90.
- Devanathan, R., Babu, R. S. & Prasanna, K.** (2024). A conceptual review on performance and environmental impact of current and ensuing coagulants used in treatment facilities, *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Divakaran, R. & Pillai, V. N. S.** (2001). Flocculation Of Kaolinite Suspensions in Water by Chitosan, *Water Research*, Vol. 35, No. 16.
- Dore, M. H.** (2014). Global Drinking Water Management and Conservation Optimal Decision-Making, *Springer International Publishing Switzerland*, ISBN 978-3-319-11032-5.
- Duan, W., Zhuge, Y., Pham, P. N., Chow, C. W. K., Keegan, A. & Liu, Y.** (2020). Utilization of Drinking Water Treatment Sludge as Cement Replacement to Mitigate Alkali–Silica Reaction in Cement Composites, *Journal of Composites Science*, 4, 171.
- Fujioka, T., Ngo, M. T. T., Makabe, R., Ueyama, T., Takeuchi, H., Nga, T. T. V., Bui, X. & Tanaka, H.** (2021). Submerged nanofiltration without pre-treatment for direct advanced drinking water treatment, *Chemosphere*, 265, 129056.
- Geletea, G., Gokcekusa, H., Ozsahinc, D. U., Uzun, B. Gichamoa, T.** (2020). Evaluating disinfection techniques of water treatment, *Desalination and Water Treatment*, 177, 408–415.
- Greco, S.** (2016). Multiple Criteria Decision Analysis, *International Series in Operations Research & Management Science*, ISSN 2214-7934.
- Guo, H., Li, X., Yang, W., Yao, Z., Mei, Y., Peng, L. E., Yang, L. E., Shao, S. & Tang, C. Y.** (2022). Nanofiltration for drinking water treatment: a review, *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 681-698.
- Haute, S., Sampers, I., Jacxsens, L. & Uyttendaele, M.** (2015). Selection Criteria for Water Disinfection Techniques in Agricultural Practices, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1549-7852.
- İBB.** (2022). İstanbul Atık Yönetim Planı, İstanbul Büyükşehir Belediyesi.
- İSKİ.** (2021). Taslak Kapsam Belirleme Raporu, *İSKİ Master Plan Ortak Girişimi*, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi.
- İSKİ.** (2023). 2023 Faaliyet Raporu, İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi.
- Issa, H. M.** (2019). Comparative Analysis of Different Disinfection Techniques Performances in Drinking Water Treatment Plant Using a Process Simulation Software, *Journal of Pure and Applied Sciences*.

- İSTAÇ.** (2023). 2023 Yılı Faaliyet Raporu, İstanbul Çevre Yönetimi Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi.
- Jabehdari, M., Mosleh, L., Hashemi, S. H. & Moghadam, M. S.** (2019). Mathematical Modeling to Evaluate and Select the Best Coagulant in Drinking Water Treatment, using Multi-Attribute Group Decision Making, *Journal of Waste Management & Xenobiotics*, Volume 2 Issue 1.
- Jachimowski, A. & Nitkiewicz, T.** (2019). Comparative analysis of selected water disinfection technologies with the use of life cycle assessment, *Archives of Environmental Protection*, Vol. 45 no. 3 pp. 3–10.
- Jafari, M., Vanoppen, M., van Agtmaal, J. M. C., Cornelissen, E. R., Vrouwenvelder, S., Verliefde, A., van Loosdrecht, M. C. M. & Picioreanu, C.** (2021). Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands, *Desalination*, 114865.
- Jones, J. H., Meyer, J., Cornejo, P. K., Hogrewe, W., Seidel, C. J., Cook, S. M.** (2019). A new framework for small drinking water plant sustainability support and decision-making, *Science of the Total Environment*, 695, 133899.
- Katrivesis, F. K., Sygouni, V., Paraskeva, C. A. & Papadakis, V. G.** (2021). A Performance Comparison of Pilot-Scale Sand Filtration and Membrane Filtration of Glafkos River Water, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 203.
- Keeley, J., Jarvis, P., Smith, A. D. & Judd, S. J.** (2016). Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment, *Water Research*, 502-509.
- Kerwick, M., Reddy, S., Holt, D. & and Chamberlain, A.** (2005). A methodology for the evaluation of disinfection technologies, *Journal of Water and Health*, 03.4.
- Kim, H., Shim, I. & Zhan, M.** (2021). Chemical Enhanced Backwashing for Controlling Organic Fouling in Drinking Water Treatment Using a Novel Hollow-Fiber Polyacrylonitrile Nanofiltration Membrane, *Applied Sciences*, 11, 6764.
- Lanrewaju, A. A., Enitan-Folami, A. M., Sabiu, S. & Swalaha, F. M.** (2022). A review on disinfection methods for inactivation of waterborne viruses, *Frontiers in Microbiology*, 13:991856.
- Lazarova, V., Sturny, V & Sang, G. T.** (2012). Relevance and Benefits of Urban Water Reuse in Tourist Areas, *Water*, 4, 107-122.
- Leiknes, T., Ødegaard, H. & Myklebust, H.** (2004). Removal of natural organic matter (NOM) in drinking water treatment by coagulation–microfiltration using metal membranes, *Journal of Membrane Science*, 47–55.
- Lichtfouse, E.** (2020). Chitin and Chitosan: Applications in Food, Agriculture, Pharmacy, Medicine and Wastewater Treatment, *Sustainable Agriculture Reviews*, 36.

- Lipp, P., Baldauf, G., Schick, R., Elsenhans, K. & Stabel, H. H.** (1998). Integration of ultrafiltration to conventional drinking water treatment for a better particle removal - efficiency and costs?, *Desalination*, 133-142.
- Liu, B., Qu, F., Guo, S., Yu, H., Li, G., Liang, H. & Van der Bruggen, B.** (2017). A Pilot Study of the Sludge Recycling Enhanced Coagulation–Ultrafiltration Process for Drinking Water: The Effects of Sludge Recycling Ratio and Coagulation Stirring Strategy, *Water*, 9, 183.
- Liu, M., Wang, S., Wang, T., Duan, M., Su, Y., Han, H., Lin, X. & Li, Z.** (2021). Application of microfiltration–nanofiltration combined technology for drinking water advanced treatment in a large-scale engineering project, *Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70.4.
- Majumder, M.** (2015). Impact of Urbanization on Water Shortage in Face of Climatic Aberrations, *SpringerBriefs in Water Science and Technology*, ISSN 2194-7252.
- Marsono, B. D., Yuniarto, A., Purnomo, A. & Soedjono, E.** (2022). Comparison Performances of Microfiltration and Rapid Sand Filter Operated in Water Treatment Plant, *Earth and Environmental Science*, 012048.
- Mattoso, A. P., Cunha, S., Aguiar, J., Duarte, A. & Lemos, H.** (2024). Valorization of Water Treatment Sludge for Applications in the Construction Industry: A Review, *Materials*, 17, 1824.
- Moghadam, A. K. & Dore, M.** (2012). Cost and Efficacy of Water Disinfection Practices: Evidence from Canada, *Review of Economic Analysis*, 4, 209-223.
- Nanda, S. & Berruti, F.** (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 19:1433–1456.
- Nouj, N., Majbarc, Z., Abelouah, M. R. & Hamou, A. B.** (2024). Eco-friendly wastewater treatment using a crab shell-based liquid bio-coagulant: Multi-criteria decision analysis related to different pollutants separation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 112318.
- Nti, S. O., Buamah, R. & Atebiya, J.** (2021). Polyaluminium chloride dosing effects on coagulation performance: case study, Barekese, Ghana, *Water Practice & Technology*, Vol 16- No 4, 1215.
- Okour, Y. O. & Ahmed, S. S.** (2019). An effective method of wastewater treatment using titanium salt and a coagulant aid of chitosan, *Water and Environment Journal*, ISSN 1747-6585.
- Oliveira, M., Leonardo, I. C., Silva, A. F., Crespo, J. G., Nunes, M. & Crespo, M. T. B.** (2022). Nanofiltration as an Efficient Tertiary Wastewater Treatment: Elimination of Total Bacteria and Antibiotic Resistance Genes from the Discharged Effluent of a Full-Scale Wastewater Treatment Plant, *Antibiotics*, 11, 630.
- Oubahman, L., Duleba, S.** (2021). Review of PROMETHEE method in transportation, *Production Engineering Archives*, 27(1), 69-74.

- Pichel, N., Vivar, M. & Fuentes, M.** (2019). The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods, *Chemosphere*, 218, 1014-1030.
- Pivokonsky, M., Novotna, K., Petricek, R., Cermakova, L., Prokopova, M. & Naceradska, J.** (2024). Fundamental chemical aspects of coagulation in drinking water treatment – Back to basics, *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104660.
- Rodríguez, N. H., Ramírez, S. M., Varela, M. T. B., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., Flores, J.** (2010). Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions, *Cement and Concrete Research*, 778–786.
- Shirafkan, A., Nowee, S. M., Ramezani, N., Etemadi, M. M.** (2016). Hybrid coagulation/ozonation treatment of pharmaceutical wastewater using ferric chloride, polyaluminum chloride and ozone, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13:1443–1452.
- Shukla, A., Agarwal, P., Rana, R. S. & Purohit, R.** (2017). Applications of TOPSIS Algorithm on various Manufacturing Processes: A Review, *Materials Today: Proceedings*, 4, 5320–5329.
- Stone, W., Lukash, N. S., Blake, L. I., Gwandu, T., Hardie, A. G., Quinton, J., Johnson, K., Clarke, C. E.** (2021). The microbiology of rebuilding soils with water treatment residual co-amendments: Risks and benefits, *Journal of Environmental Quality*, 50:1381–1394.
- Urban, R. C., Nakada, L. Y. K., Isaac, R. L.** (2023). A system dynamics approach for large-scale water treatment plant sludge management: A case study in Brazil, *Journal of Cleaner Production*, 138105.
- Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P., Marechal, F.** (2008). LCA tool for the environmental evaluation of potable water production, *Desalination*, 37-56.
- Vrouwenvelde, H. S., Beerendonk, E. F., Verdouw, J. & van der Kooij, D.** (2004). Removal of AOC and NOM from water with Nanofiltration, *2nd IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Treatment Technologies*, IWA.
- Wafi, M. K., Hussain, N., Abdalla, O. E., Al-Far, M. D., Al-Hajaj, N. A., Alzonnikah, K. F.** (2019). Nanofiltration as a cost-saving desalination process, *SN Applied Sciences*, 1:751.
- Xia, S., Lib, X., Liua, R. & Li, G.** (2005). Pilot study of drinking water production with ultrafiltration of water from the Songhuajiang River (China), *Desalination*, 369-374.
- Yang, Z., Zhou, Y., Feng, Z., Rui, X., Zhang, T. & Zhang, Z.** (2019). A Review on Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Water Purification, *Polymers*, 11, 1252.
- Yateh, M., Li, F., Tang, Y., Li, C. & Xu, B.** (2024). Energy consumption and carbon emissions management in drinking water treatment plants: A systematic review, *Journal of Cleaner Production*, 140688.

- Yavaş, Ö.** (2021). Otomotiv Endüstrisi Kaynaklı Atıksuların PAC ve Demir Koagülantı ile Arıtılabilirlik ve İşletme Giderleri Bakımından Karşılaştırılması, *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, Sayı 4(1): 33-40.
- Yonge, D.** (2012). A Comparison of Aluminum and Iron-Based Coagulants for Treatment of Surface Water in Sarasota County, Florida. (Master's Thesis) University of Central Florida, Orlando, Florida.
- Zagklis, D. P. & Bamos, G.** (2022). Tertiary Wastewater Treatment Technologies: A Review of Technical, Economic, and Life Cycle Aspects, *Processes*, 10, 2304.
- Zhou, P., Ang, B. W. & Poh, K. L.** (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: An update, *Energy*, 31, 2604–2622.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad :Tuba AĞUN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, İstanbul Üniversitesi, Çevre Mühendisliği

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Ağun, T., Doğruel, S. (2024). İçme Suyu Arıtımında Uygulanan Proseslerin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi, *4th International Graduate Studies Congress (IGSCONG'24)*.