
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

İÇME SUYU ARITMA TESİSLERİNDE OZON KULLANIMININ ORGANİK KİRLETİCİLER ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Erdinç DUMLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Erdinç DUMLU
28/01/2022

İÇME SUYU ARITMA TESİSLERİNDE OZON KULLANIMININ ORGANİK KİRLETİCİLER ÜZERİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Erdinç DUMLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Bu çalışmada, ozonun içme suyu olarak barajlarda biriktirilen suyun biyo-bozunur çözünmüş organik kirleticileri artırma potansiyeli ile bağlantılı olarak dezenfeksiyon parametrelerinden asitlik derecesi, bulanıklık, KOİ, için oksidasyon süreçlerinde ozonun etkinliğini incelemeyi amaçlamıştır. Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bileşik Isıl Güç Laboratuvarında kurulu olan deney düzeneğinde, 1000 ml kapasiteli yarı kesikli bir reaktörde, Ankara Kesikköprü ve Çamlıdere Barajlarına ait olan ham su numuneleri üzerinde, içme suyu arıtma performansının belirlenmesi üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Baraj sularından alınan örneklerin karşılaştırılması amacıyla kirlilik derecesi yüksek bir kuyu suyu örneği aynı deneylere tabi tutularak kıyaslama yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda uygulama parametreleri literatür taraması sonuçlarına göre belirlenmiş olup, her bir parametre sıra ile sabit tutularak verimsel değerlendirmeler ve karşılaştırma metodu kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda ozonun su arıtma performansı üzerindeki etkileri zaman sabit tutularak 1 dakikalık temas süresine bağlı olarak 0,36, 0,54 ve 0,72 µg/L ozon konsantrasyonları uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen su numuneleri KOİ, Asitlik Derecesi (pH), iletkenlik, renk, bulanıklık, ve sertlik ve diğer bazı içme suyu uygunluk parametreleri ASKİ Laboratuvarında analiz edilmiş ve TSE 266 İçme Suyu Standardına göre değerlendirilmiş ve literatürde yapılan çalışma sonuçları ile sürecin parametrik değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), iletkenlik, pH, renk, bulanıklık, sertlik miktarı ve diğer bazı parametrelerinin ozonlama ile uygun konsantrasyonlarda olduğunu göstermiştir. Deneyler sonucunda ayrıca, aldehitlerin ve karboksilik asit oluşumunun ozon konsantrasyonu ve maruz kalma süresi ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu ve ozonun içme suyu arıtma verimliliğini artırabileceğini ortaya koymuştur.

Bilim Kodu : 90322
Anahtar Kelimeler : Ozonlama, su arıtma, içme suyu
Sayfa Adedi : 87
Danışman : Prof. Dr. Hüseyin TOPAL

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE REMOVAL OF ORGANIC POLLUTANTS BY USING OZONE IN DRINKING WATER TREATMENT FACILITIES

(M. Sc. Thesis)

Erdinç DUMLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

In this study, it is aimed to investigate the effectiveness of ozone in oxidation processes for disinfection parameters such as acidity degree, turbidity, COD, in connection with the potential of ozone to increase the biodegradable dissolved organic pollutants of water accumulated in dams as drinking water. In order to determine the drinking water treatment performance, raw water samples was taken from Ankara Kesikköprü and Çamlıdere Dams. Experimental studies were carried out by using a 1000 ml capacity semi-batch reactor in the experimental setup established in the Mechanical Engineering Combined Heat Power Laboratory at Gazi University Faculty of Engineering. In experimental studies, application parameters were determined according to the results of the literature review and each parameter was kept constant in order to make evaluations in terms of efficiency. For this purpose, 0.36, 0.54 and 0.72 μg/L O_3 ozone concentrations were applied depending on the 1 minute contact times on the effects of ozone on water treatment performance. The water samples obtained at the end of the experimental studies were evaluated with parameters such as COD, Total Nitrogen Amount, Acidity Degree (pH), conductivity, color, turbidity, Sulfate Amount. It was made in accordance with TSE 266 Drinking Water Standard and the results of the studies in the literature were compared with the results of the process. As a result of the study, The experiment's results show that the most suitable time and concentration were found as concentration for the highest degradation of chemical oxygen demand (COD), conductivity, pH, color, turbidity, hardibility amount. The experiment also revealed that aldehydes and carboxylic acid formation were significantly correlated with ozone concentration and exposure time, and ozone could improve drinking water treatment efficiency.

Science Code : 90322
Key Words : Ozonation, water treatment, drinking water
Page Number : 87
Supervisor : Prof. Dr. Hüseyin TOPAL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana desteklerini ve katkılarını eksik etmeyen ve bu tezin başarıyla neticelenmesine vesile olan başta çok kıymetli Danışman Hocam Prof. Dr. Hüseyin TOPAL olmak üzere, deney çalışmalarında su numelerinin analizlerinin yapılması ve sonuçları üzerinde tecrübelerinden istifade ettiğim ASKİ Su Arıtma Dairesi Başkanı Nuri KALİ' ye, literatür araştırma çalışmalarımda bilgi birikimlerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Okan KOMESLİ ve Dr. Yelda ALTINSOY'a, Prof. Dr. Mehmet KABAK'a, makine ekipman konusunda bilgi birikimlerini paylaşan değerli meslekdaşım Erdinç ÇİFTÇİ'ye, tezin metinsel kısımlarını okuyarak bana yardımcı olan mesai arkadaşlarım Ali ÇAĞLAR'a, Raziye ÖRKÜN'e ve tez çalışmam boyunca beni motive ederek manevi desteklerini eksik etmeyen değerli eşim Sonay DUMLU'ya, çocuklarım Ümit Mert ve Elif Duru' ya, kardeşim Erol DUMLU' ya ve bugünlere gelmemde emeği geçen biricik Annem Ruşen DUMLU'ya şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca bu tez çalışmamı, ebediyete intikal eden abim Ümit DUMLU ve Babam İsmail Hakkı DUMLU anısına atfediyorum. Saygıyla ve hürmetle.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR 5

3. TEORİ 23

3.1. İçme Suyu Tanımı ve Genel Özellikleri 23

3.1.1. İçme suyu kalitesi ve sınıflandırılması 25

3.1.2. Arıtılmamış (Ham su) kalitesi 25

3.1.3. Arıtılmış içme suyu kalitesi 30

3.2. İçme Suyu Arıtımında Kullanılan Metotlar ve Prosesler 30

3.2.1. İçme suyu arıtma prosesleri 32

3.2.2. Havalandırma işlemi 34

3.2.3. Hızlı karıştırma ve yumaklaştırma işlemi 34

3.2.4. Çöktürme işlemi 35

3.2.5. Filtrasyon 36

3.2.6. Dezenfeksiyon 36

3.3. İçme Suyu Dezenfeksiyon Yöntemleri 36

3.3.1. Klorlama ile dezenfeksiyon 37

Sayfa

3.3.2. Ultraviyole (UV) ile dezenfeksiyon 38

3.3.3. İçme suyu arıtımında ozonlama prosesi 39

3.4. Ozonlama İşleminde Etki Eden Parametreler 44

3.4.1. pH faktörü 44

3.4.2. Sıcaklık faktörü 45

3.4.3. Mekanik karıştırmanın etkisi 45

3.4.4. Ozon dozajı etkisi 45

3.4.5. Ozonlama süresi etkisi 46

4. İÇME SUYU ARITMADA OZON GAZI KULLANIMININ DENEYSEL UYGULAMASI 47

4.1. Deneysel Çalışmalar 47

4.2. Deneysel Altyapı 49

4.3. Deney Programı 50

4.4. Deney Analiz Sonuçları 57

4.5. Ozonlama Süreci ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi 71

5. SONUÇ VE ÖNERİLER 75

KAYNAKLAR 79

ÖZGEÇMİŞ 87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Kişi başına kullanılabilir su potansiyelinin yıllara göre dağılımı 24

Çizelge 3.2. Su kaynaklarının sektörel bazda dağılımı (%) 24

Çizelge 3.3. Kent nüfusuna bağlı evsel su ihtiyacı 25

Çizelge 3.4. Su kalite standartları ve sınıflandırması 27

Çizelge 3.5. Küçük yerleşim yerleri içme suyu arıtılmasında kullanılan yöntemler 32

Çizelge 3.6. Hızlı karıştırma ve yumaklaştırma proseslerinde kullanılan kimyasallar... 35

Çizelge 4.1. Çamlıdere barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri 50

Çizelge 4.2. Kesikköprü barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri 52

Çizelge 4.3. Kuyu suyu numunesi fizikokimyasal özellikleri 54

Çizelge 4.4. Kesikköprü baraj suyu deney parametreleri 55

Çizelge 4.5. Çamlıdere baraj suyu deney parametreleri 56

Çizelge 4.6. Kuyu suyu deney parametreleri 57

Çizelge 4.7. Çamlıdere baraj suyu analiz sonuçları 58

Çizelge 4.8. Kesikköprü baraj suyu analiz sonuçları 59

Çizelge 4.9. Kuyu suyu analiz sonuçları 60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Deney düzeneği şematik gösterimi 11

Şekil 2.2. Artan ozon konsantrasyonlarına karşı farmasötiklerin uzaklaştırılma oranı .. 13

Şekil 2.3. Katalitik ozonlama işleminde uygulanan çeşitli homojen ve heterojen katalizörler 15

Şekil 2.4. Ozonlama sırasında kimyasal bromat oluşum yolu 17

Şekil 2.5. EB sistemi, kimyasal koagülasyon, biyolojik sistem ve iyon değiştirici dâhil EB-Tech pilot tesisinin şematik çizimi. T1:rezervuar; T2-T5: tutma tankı; P1-P5: su pompası 19

Şekil 2.6. Ozon oksidasyonunun şematik diyagramı 20

Şekil 2.7. O_3-BAC (Ozon biyolojik aktif karbon) sisteminin şematik diyagramı 22

Şekil 3.1. Konvansiyonel bir su arıtma tesisinin şeması 26

Şekil 3.2. Örnek su arıtma prosesleri 33

Şekil 3.3. Dezenfeksiyon için kullanılan kimyasallar 37

Şekil 3.4. Su dezenfektanı olarak kullanılan bir UV cihazı 39

Şekil 3.5. Ozonun rezonans yapısı 40

Şekil 3.6. Korona deşarj metoduyla ozon üretimi 41

Şekil 3.7. Ozon ile su arıtma sistemi 44

Şekil 4.1. Ozon jeneartörü içeren su arıtma deney düzeneği 48

Şekil 4.2. Kesikköprü barajı su numunesi bulanıklık analiz sonuçları 62

Şekil 4.3. Çamlıdere barajı su numunesi bulanıklık analiz sonuçları 62

Şekil 4.4. Kuyu suyu numunesinin bulanıklık analiz sonuçları 63

Şekil 4.5. Kesikköprü barajı su numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları 63

Şekil 4.6. Çamlıdere barajı su numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları 64

Şekil 4.7. Kuyu suyu numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları 64

Şekil 4.8. Kesikköprü barajı su numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları 65

Şekil 4.9. Çamlıdere barajı su numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları 65

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.10. Kuyu suyu numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları 66

Şekil 4.11. Kesikköprü barajı su numunesinin pH analiz sonuçları 66

Şekil 4.12. Çamlıdere barajı su numunesinin pH analiz sonuçları 67

Şekil 4.13. Kuyu suyu numunesinin pH analiz sonuçları 67

Şekil 4.14. Kesikköprü barajı su numunesinin renk analiz sonuçları 68

Şekil 4.15. Çamlıdere barajı su numunesinin renk analiz sonuçları 68

Şekil 4.16. Kuyu suyu numunesinin renk analiz sonuçları 69

Şekil 4.17. Kesikköprü barajı su numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları 69

Şekil 4.18. Çamlıdere barajı su numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları 70

Şekil 4.19. Kuyu suyu numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları 70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Ozon ile su arıtma deney düzeneği 48

Resim 4.2. Çamlıdere ve Kesikköprü barajlarından alınan ham su ile kuyu suyu numuneleri 49

Resim 4.3. Deneylerde kullanılan malzemeler 50

Resim 4.4. Deney numunelerinin ASKİ Laboratuvarlarında analizleri 57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
CFU	Koloni Oluşturan Bakteri Sayısı
L	Litre
m^3	Hacim Birimi
ºC	Sıcaklık Birimi
pH	Asitlik Oranı
ppbv	Çözelti Derişim Birimi
Pt-Co	Platin-Kobalt renk Birimi
Re	Reynolds sayısı
V	Volt
µg	Mikrogram
µS	Zaman Birimi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AAT	Atık Su Arıtma Tesisi
AMB	Aerobik Mezofilik Bakteri
AOP	İleri Oksidasyon Prosesi
BDOC	Biyobozunur Çözünmüş Organik Karbon
CT	Konsantrasyon Zamanı
DBP	Dezenfeksiyon Yan Ürünleri
DOC	Çözünmüş Organik Karbon
DSİ	Devlet Su İşleri
EB	Elektron Işını
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IOA	Ortalama Anlaşma İndeksi
İTASHY	İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı

Kısaltmalar	Açıklamalar
NTU	Nefelometrik Bulanıklık Birimi
O_3-BAC	Ozon Biyolojik Aktif Karbon
OFP	Ozon Oluşum Potansiyeli
PAC	Toz Aktif Karbon
PDMS	Polidimetilsiloksan
TOC	Toplam Organik Karbon
TS 266	Türk Standartları 266
UV	Ultraviyole
VOC	Uçucu Organik Bileşikleri
WWTP	Atık Su Arıtma Tesisleri

1. GİRİŞ

Bu tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci ve ikinci bölümde çalışma konusu ile ilgili çevresel ve ekonomik göstergeleri içeren giriş bölümü ve literatür taraması yer almaktadır. Bölüm 3'te ise dünya genelinde yoğun olarak su arıtma sistemlerinde ozonun kullanımı, kullanım metodları, ozonlama mekanizma ve teorisi verilmektedir. Deneysel altyapı ve deney çalışmaları Bölüm 4'te, sonuçlar ve öneriler ise Bölüm 5'te verilmektedir.

Özellikle son yıllarda küresel iklim değişikliğinin yaşandığı dünyamızda, kuraklığa bağlı olarak gelişen su kıtlığı çok ciddi boyutlara ulaşmakta ve hayatı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle ülkemizi de içine alan bu büyük sorun karşısında mevcut kaynakların tasarruflu kullanılması oldukça önemli hale gelmiştir. Su kaynakları üzerinde yapılan çalışmalar küresel ölçekte artan nüfusunda etkisi ile birlikte alternatif çözüm yollarının bulunmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Yeryüzünde yaşamın var olmasının en temel etkeni suyun gezegenimizde bulunmasıdır. Hali hazırda dünyanın %25'i kara yapılarından % 75'i ise sudan oluşmuştur. Yerkürede bulunan suyun % 97'si deniz ve okyanus gibi büyük su kütlelerinde ve içilmesi mümkün olmayan tuzlu formdadır. Kalan %3'ü ise tatlı su olmakla birlikte oldukça büyük bir oranı kutuplarda buzul olarak ve yeraltında kaynak suyundan oluşmaktadır. Kara coğrafyası üzerinde bulunan ve ulaşımı insanlar için kolay olan içilebilir su kaynakları ise dere, ırmak, göl gibi su kütleleri olarak bulunur. Toplamda tatlı su kaynaklarının binde 10'luk kısmı insanoğlu tarafından ulaşılabilir durumda ve oldukça hoyrat şekilde kullanılmaktadır.

Medeniyetlerin gelişmesinde etkili bir rol oynayan su konusunda, endüstriyel gelişmelerin hızlandığı 21. yüzyıl başlarına kadar depolama, filtre edilme ya da tasarruflu kullanılması konularında herhangi bir aşama kaydedilmemiştir. İlerleyen süreçte dünya çapında artan nüfus ile birlikte, temiz suya ulaşım özellikle bazı coğrafyalarda oldukça zorlu bir duruma gelecektir. Su tasarruflu kullanılmaması halinde iklim değişikliğine bağlı olarak yaşanan kuraklık sebebiyle oluşan temiz su kaynaklarına ulaşmadaki zorluk, dünya genelinde su kaynaklı hastalıklara hatta ölümlere sebep olacaktır. Su kaynaklı ölümlerdeki ana etken kirli sularda oluşan bakteri ve virüs gibi patojenlere bağlı hastalıklardır.

Gelişmemiş ülkelerde su arıtma sistemlerinin yokluğunun yanı sıra birde üzerine gelişmemiş sağlık sistemleri ölümler üzerinde etkili olmaktadır. Ancak Avrupa ve Kuzey Amerika'da yerleşik gelişmiş ülkelerde su arıtma sistemlerinin kullanımı sudan kaynaklı olması ihtimal hastalıkların önlenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bilhassa içme suyunda kullanılan filtrasyon ve dezenfeksiyon süreçlerinin uygulanması dizanteri, hepatit, tifo gibi hastalıkları ortadan kaldırmıştır.

Dünya Kaynakları Enstitüsüne göre, dünyanın tüketim, tarım ve sanayileşme için temiz suya olan talebi, hızla artan dünya nüfusu nedeniyle önümüzdeki süreçte büyük ölçüde artacaktır [1]. Ayrıca dünyada yaklaşık 1 milyar insan su tedarikinin sorun olduğu bölgelerde yaşamaktadır. Son yıllarda başlayan iklim değişikliğinin yol açtığı kuraklık nedeniyle 2025 yılına kadar dünya nüfusunun yarısının su kaynaklarında düşüş yaşanabileceği tahmin edilmektedir. İklim değişikliği, artan su kıtlığı, nüfus artışı, kentleşme, su tedariği anlamında birçok zorluk yaşanmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle suyu, besinleri ve enerjiyi geri kazanmak için atık suyun yeniden kullanımı önemli bir strateji haline gelmektedir. Giderek artan oranda ülkeler sulama için atık su kullanmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde bu oran sulanan arazinin %7'sini temsil etmektedir. Suyun arıtılarak sulamada kullanılmasında sağlık risklerinin giderilmesi en önemli husustur. Bu uygulama sağlık açısından gerekli tedbirleri ve kriterleri sağladığı takdirde suyun güvenli yönetimi, artan gıda üretimi alanında olmak üzere birçok fayda sağlayacaktır.

İçme suyu ve sulama için kullanılan su kaynağı ihtiyacı, yeraltı suyuna ve atık su da dahil olmak üzere alternatif kaynaklara artan bağımlılıkla birlikte artmaya devam edecektir. İklim değişikliği, yağmur suyu rejiminde büyük dalgalanmalara yol açacaktır. Tedarik ve kaliteyi sağlamak için tüm su kaynaklarının yönetiminin iyileştirilmesi gerekecektir. Bu kadar önemli bir maddenin kuraklıkla birlikte azalmasının yanında mevcut bu su kaynaklarının kirlenmesinden de insanoğlu sorumludur. Nüfus artışı, endüstriyel yoğunluk, tarımsal gübre pestisitlerinin kullanımı, atık suları arıtılmadan doğaya bırakılması su kaynaklarına verilen en büyük zararlardır. Doğaya arıtılmadan salınan başlıca kirleticiler, mikro kirleticiler ve patojenler esas olarak su kütlelerini tahmin edilemez ölçüde kirletmektedir [2]. Buna bağlı sebepler dolayısı ile oluşan su kirliliğinin bertarafı için dünyada kullanılan yöntem ise kimyasal oksidasyondur ve su ve atıksu arıtımında dezenfeksiyon için kullanılmaktadır [3]. Pestisitler zararlılarla savaşmak ve tarımsal üretimi geliştirmek için kullanılan yapay olarak

sentezlenmiş bir grup maddedir. Genellikle canlı organizmalar için toksiktirler ve kalıcı biyo-birikimli etkileri olan toksik ajanlar oldukları için parçalanmaları oldukça zordur [4].

Yapılan araştırmalara göre susuzluk, bilinçsiz tarımsal uygulamalar ve yine insan kaynaklı su kirliliği nedeniyle meydana gelecektir. Bu durum su temini sıkıntısının hem dünyada hem de Türkiye'de ciddi sorunların ortaya çıkacağının göstergelerinden biridir. Türkiye'de kişi başına düşen su tüketimi miktarı yıllık yaklaşık 1400 m3'tür. Mevcut tüketim ile her ne kadar Türkiye su sıkıntısı yaşayan ortadoğu ülkelerine göre iyi bir durumda olsa bile su zengini ülke durumunda da değildir.

Ülkemizin su zengini bir ülke olmadığı mevcut kaynaklardan elde edilen ve kişi başına düşen yıllık ortalama su potansiyeli miktarına bağlı olarak söylenebilir çünkü su zengini olabilmek için gereken yıllık kişi başı ortalama su potansiyeli 10.000 m^3'ten az olmaması gerekmektedir. Ülkemizin toplam su kaynakları 112 milyar m^3 potansiyele sahiptir. Her ne kadar mevcut durumda su kaynakları kişi başı tüketim için yeterli olsa da, su fakiri olmaya aday olduğu gerçeğini değiştirmemektedir.

Nüfus artışında hala oldukça yüksek bir orana sahip olan ülkemiz su sıkıntısını daha da derinden yaşamaya aday ülkelerden biridir. Bu nedenle mevcut su potansiyellerinin etkin şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ülkemizin su kıtlığı sorunundan çok daha ciddi boyutta etkilenmemesi adına içme suyu ve sulama projelerinde üzerinde hassasiyetle durulmalı ve uygulamalar ve planlamalar bu perspektifte gerçekleştirilmelidir. Ülkemizde DSİ başta olmak üzere su ile ilgili kurumlar tarafından gerçekleştirilen projeler ile yaşanabilecek su sıkıntılarının önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Artan nüfus ile birlikte büyükşehirlerde oluşan yeni yerleşim alanları alt yapı ihtiyacının yanında temiz suya ulaşım ve arıtma tesislerinin planlanması ve uygulanmasındaki sıkıntılar, geliştirilen baraj ve gölet projeleri ile asgari seviyeye çekilmesi planlanmaktadır.

Bu noktada en önemli olan değiştirilebilir parametre mevcut suyun en uygun şekilde ve tasarruflu kullanılabilmesidir. Bu sayede kaynakların yeterliliğini sağlamak mümkün olabilir. Aynı zamanda tarımda ilaçlama uygulamaları ve endüstride uygulanan su kaynaklı teknolojik uygulamalar hali hazırda zaten yetersiz olan su kaynaklarının üzerinde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Yani kentsel, endüstriyel ve tarımsal atık suların yetersiz yönetimi, içme ve kullanma suyunun tehlikeli şekilde fiziksel ve kimyasal olarak kirlendiği

anlamına gelmektedir. Bu nedenle temiz suya ulaşımda yaşanacak olan sorunların önüne geçilebilmesi için modern su arıtma tekniklerinin en uygun maliyetle hızlı şekilde insan hayatına ve şehirlere adapte edilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Güvenli olmayan içme suyu, sanitasyon ve el hijyeni nedeniyle her yıl birçok insanın ishalden öldüğü tahmin edilmektedir. İshale sebep olan mikroorganizmaların ve bakterilerin bertaraf edilmesi ile her yıl özellikle gelişmemiş ülkelerdeki çocukların ölümü önlenebilir. Günümüzde yaşanan ve hızla felaket senaryolarının gerçekleştiğine şahit olduğumuz küresel kuraklık nedeni ile su yönetiminin ve su yönetimi teknolojilerinin güncel hayata hem kırsal hem de kentsel anlamda uygulanabilir hale getirilmesi belki de şu anda acil uygulanması gereken eylem planlarının en başında gelmesi gerekmektedir.

Bu deneysel çalışmada, yukarıda açıklanan su potansiyellerinin etkin ve tasarruflu kullanılması amacıyla su tedariğinde dezenfeksiyon metodolojilerinden biri olarak kullanılan ozonlamanın içme suyu üzerinde etkinliği araştırılacaktır. Deneysel çalışmalara ışık tutması amacıyla Ankara iline içme suyu sağlayan Çamlıdere ve Kesikköprü Barajlarından alınan ham su örnekleri deney düzeneğinden arıtılarak ulusal ve uluslararası parametrelere göre içme suyu olarak kullanılıp kullanılamayacağı analiz edilecektir. Bu çalışma ile Ozon jeneratörü kullanılarak elde edilen suyun, su kalitesinin belirlenmesi ve kullanım açısından değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kirlilik derecesi yüksek bir kuyu suyu örneği ile de deney yapılarak kirli bir su için ozonlamanın dezenfektan özelliği araştırılmıştır. Böylelikle ozonlamanın içme suyu parametrelerinin yanında kullanma suyu için nasıl tepkime verdiği incelenmiştir. Bu amaçla içme suyu arıtma teknolojilerinde uygulaması muhtemel diğer teknolojilerde ekonomik ve verim açısından değerlendirilmiştir. Ham su ve ozon jeneratörü ile elde edilmiş arıtılmış su kalite parametreleri olan pH, bulanıklık, çözünmüş oksijen, demir, KOİ, toplam nitrojen miktarı, toplam organik madde gibi sonuçlar İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik Standartlarına ve TS 266 standartları ile karşılaştırılmıştır.

Bu nedenle bu tez çalışmasında, su arıtma teknolojilerinden ozon'un kullanılması ile su arıtma verimleri üzerindeki performans kriterleri araştırılacak ve değerlendirilecektir. Aynı zamanda, uygulama süresi ve uygulama konsantrasyonlarına bağlı olarak elde edilen sonuçlar ile optimum parametreler teknolojinin endüstriye uygulamalarında bilimsel veri olarak çalışmaların temelini oluşturabilmesi amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR

Barry vd. [5] tarafından yapılan çalışmada ozon ve oksijenin gözeneksiz membranlar yoluyla suya kütle transferi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesi ve temel konveksiyon-difüzyon teorisi kullanılarak incelenmiştir. Ozon, içme suyu arıtımında yaygın olarak uygulanan gaz halinde bir oksidandır. Membran kontaktörler, ozon gazı karışımlarının suya enjeksiyonu için geleneksel gaz dispersiyon yöntemlerine bir alternatiftir. Az sayıda çalışma, zar bazlı ozon taşınması için hesaplama yaklaşımlarını araştırmıştır. Bu araştırmada, dış gaz akışı ve iç sıvı akışı olan tek bir polidimetilsiloksan (PDMS) kılcal membran tüpü boyunca kantitatif konsantrasyon profilleri elde edilmiştir. Profiller, değişen membran uzunlukları ve membran kalınlıkları kullanılarak ozon ve oksijen için tek kütle transfer dirençlerini ve toplam kütle transfer katsayılarını içerir ve ayrıca yanal hızların profiller üzerindeki laminer akış etkisi de araştırılmıştır. Uygulanan model ile membrandaki gazların hem difüzyonunun hem de çözünürlüğünün etkisi göz önünde bulundurulmuştur [5].

Literatürde yapılan diğer çalışmalarda, ozon ve oksijen gazı akışlarının analizinde membranlardaki gazların çözünürlüğünü ihmal etmiştir. Bu çalışma, çözünürlüğün, özellikle oksijen için, toplam kütle transfer katsayıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ozon için ana direnç sıvı tarafında, oksijen için ise zarda bulunmuştur. Isı transferi analojilerine dayanan kütle transferi korelasyonları, ozon ve oksijen için Sherwood (Sh) korelasyonlarını literatür verileriyle iyi bir uyum gösterdiği belirlenmiştir, bu da uygulanan hesaplama modelinin mantıklı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu, farklı membran malzemeleri, akış koşulları ve reaktör tasarımları için ozon ve oksijen kütle transferinin hesaplamalı tahminleri için bir iyi bir başlangıç temeli sağlamaktadır [5].

Camel vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, içme suyu üretimi için doğal suların (yüzey ve yeraltı suları) arıtılmasında ozonlamanın ve ilgili oksidasyon işlemlerinin ana uygulamalarını özetlemektedir. Aslında, oksidanlar işlem boyunca ön oksidasyon, ara oksidasyon veya son dezenfeksiyon gibi birkaç noktada eklenebilir. Bu nedenle, su arıtımı boyunca kimyasal oksidasyonun sayısız etkisi tartışılmaktadır: inorganik türlerin uzaklaştırılması, koagülasyon-flokülasyon sürecine, organik maddenin bozulmasına ve dezenfeksiyona yardımcı olur. İçilebilir su üretiminde birinci derecede önemli olan, dağıtılan

suyun bozulmasını önlemek için organik maddelerin (doğal hümik maddeler ve mikro kirleticiler, özellikle pestisitler) uzaklaştırılmasıdır. (esas olarak kötü kokular ve tatlar; trihalometanlar gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu; dağıtım sisteminde mikrobiyal yeniden büyüme). Sonuç olarak, bu nokta bu makalede özellikle ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Nitekim, işlem sırasında tam mineralizasyon hemen hemen hiç gerçekleşmez; sonuç olarak, dağıtılan su kalitesini iyileştirmek ve içme suyu düzenlemelerini karşılamak için daha fazla arıtma (yani kum veya granül aktif karbon filtrasyonu) gereklidir [6].

Zorlugenc vd. [7] tarafından yapılan deneysel çalışmada, gaz halindeki ozon ve ozonlanmış suyun kuru incirlerin mikrobiyal florası ve aflatoksin B1 içeriği üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Bu çalışmada kuru incir 13,8 mg/L ozon gazına ve 1,7 mg/L ozonlu suya 7,5, 15 ve 30 dakika süre ile maruz bırakıldıktan sonra aerobik mezofilik bakteri (AMB), E. koli, koliform, maya ve küf sayılarının değişimi araştırılmıştır. Ozon işlemlerinden önce ve sonra kuru incirlerdeki küfler de izole edilmiş ve tanımlanmıştır. Her iki ozon uygulamasında da AMB tam olarak inaktive edilmemişken, E. coli 7,5 dakikada tamamen yok edilmiştir. Koliform ve maya da ozonlu suda sırasıyla 7,5 ve 15. dakikada yok edilmiştir [7].

Tüm kalıpların inaktivasyonu için 15 dakikadaki ozon uygulamalarının yeterli olduğu belinmeiş ve kuru incirlerden aflatoksin oluşumuna neden olan Aspergillus flavus ve Aspergillus parasiticus izole edilmiştir. Aflatoksin B1 ile yapay olarak kontamine olmuş numuneler de sırasıyla 30, 60 ve 180 dakika gazlı ozon ve ozonlu su ile muamele edilmiştir. Her iki uygulamada da ozonlama süresinin artması nedeniyle aflatoksin B1'in parçalanması arttığı belirlenmiştir. Sonuçlar, gaz halindeki ozonun, aflatoksin B1'in azaltılmasında ozonlu sudan daha etkili olduğunu, ozonlu suyun ise mikrobiyal sayıların azaltılmasında etkili olduğunu göstermiştir [7].

Bidhendi vd [8] tarafından yapılan bu çalışma dezenfeksiyon işlemi içme suyu arıtımında en önemli adımlardan biri olarak kabul edilmiştir ve bu sürece dikkat edilmemesi sosyal bir felakete neden olabileceği üzerinde durulmuştur. Dünya çapında şimdiye kadar, içme suyu dezenfeksiyonu için ultraviyole ışığı kullanmak ve ozon veya klorür eklemek gibi farklı yöntemler kullanılmıştır. Su kaynaklarının kirlenmesi nedeniyle, özellikle farklı kirleticilerle daha yakın temas halinde olan yüzey sularında, genellikle tüm dünyada uygulanan suya klorür eklenmesi süreci, klorlu kimyasallar ve klorlu kimyasalların insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Ayrıca yine sağlık üzerinde toksik etkilere sahip

ikincil ürünler olarak trihalometanlar oluşmaktadır. Yüksek düzeyde elektrik enerjisi tüketimi ve ortaya çıkan maliyetler göz önüne alındığında, İran'da bu yöntem geliştirilmemiştir. Bu çalışmada içme suyu ozonlama proses fırsatlarının ve sıkıntılarının açıklanması amaçlamıştır [8].

Ozon kullanımı yararlı ve etkili bir yöntemdir ve yüksek oksitleyici özelliği, kanserojen üretmemesi ve bakteri, virüs ve diğer hastalık yapıcı unsurları ortadan kaldırması ile sonuçlanabilir. Öte yandan bahsedilen yöntem, diğer su arıtma yöntemlerine göre daha kısa sürede işlem görecektir. İlgili çevre yönetim planını yürütmek için uygun bir araç olarak stratejik yönetim için farklı teknikler vardır. Çalışma yönetimi metodolojisi SWOT'a dayanmaktadır; bu nedenle uygun bir içme suyu arıtma yöntemi olarak ozonlama için yönetim fonksiyonel stratejilerini açıklamaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, QSPM matrisi kullanılarak bu stratejilerin hiyerarşik önceliği tanımlanmış ve bu işlemin uygulanması için içme suyunun dezenfekte edilmesinde yapılan çalışmalar incelenerek uygun işgücünün yetiştirilmesinin oldukça önemli olduğu belirlenmiştir [8].

Liang vd [9] tarafından yapılan çalışmada, toplam hava kirliliği modeli ile Tayvan'ın batı kıyısı hava havzasının okyanus bölgesi dahil 196 km x 196 km'lik karmaşık arazisinde ortam ozonunun yayılması olgusunu araştırmak için kullanılmıştır. Hava havzasındaki yükseklik 0 m deniz seviyesi ile 3000+ m (yüksek dağ) arasında değişmektedir. 21 hava kalitesi izleme istasyonundan alınan 2010 ve 2014 verileri, simülasyon sonuçlarının ortalama anlaşma indeksi (IOA) > 0,61'e göre doğruluğunu sağlamak için kullanılmıştır. Hava havzası arasında açık denizde kuzey-güney yayılımı, kıyı çevresinde kuzey-güney doğru yayılım, okyanustan doğu batı yayılma ve doğubatı dağ cephesi çevresinde yayılma olmak üzere dört ozon yayılma olayı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, iki hâkim akışın sınırlarında buluşup etkileşime girdiğinde, bir yakınsama bölgesi oluşturduklarını göstermektedir. Yakınsama bölgesi, belirgin hava koşulları sunar ve hava kirleticilerini biriktirmektedir [9].

Rüzgâr yönünden ozon konsantrasyonu yoğunluğu topografyaya ve çevre koşullarına bağlı olmakla birlikte sonuçlar, ozon yayılma olayının belirli kurallara uyduğunu açıkça göstermektedir. Bu olaylar sırasıyla kuzeydoğu, güneybatı öncesi, güneybatı ve kuzeydoğu muson öncesi ayları sırasında olmaktadır. Bu çalışma ile rüzgâr alanları, özellikle aşağı yönlü ve kara rüzgârları olmak üzere, yüksek ozon ve ozon yayılımı konsantrasyonunda önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Nehir vadilerinin sapması ve havza/tepe ile dağlar

arasındaki dağlık bariyer, yerel rüzgar alanı üzerinde belirgin etkiler yaparak ozon yayma fenomenini güçlü bir şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır [9].

Ribeiro da Silva vd. [10] tarafından yapılan bu araştırma, sıhhi atık kontamine sularda indikatör bakterilerin inaktivasyonu ve ozon dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu açısından sıralı ozon ve klor prosesleri incelemiştir. Uygulanan ozon konsantrasyonları sırasıyla 5, 8 ve 10 mg.O_3/L, ardından sırasıyla 10, 20 ve 30 mg/L klor konsantrasyonları maruziyeti sağlanmıştır. Sıralı ozon/klor işleminden sonra kimyasal oksijen talebindeki ortalama azalma %9 ila %37 arasında değişmiştir. Toplam koliform inaktivasyonu 1,59 ile 3,73 log10 arasında değişmekte ve E. coli her zaman <1 CFU 100 mL^{-1} kalmakla birlikte, ozonlama, sonraki klor dozundan önemli ölçüde etkilenmeyen aldehitlerin oluşumu meydana gelmiştir [10].

Bu çalışma ile Andreadakis [11] , uygun bir Toz Aktif Karbon (PAC) türünün seçilmesi ve eklenmesi ve alternatif olarak veya kombinasyon halinde suyun ozonlanmasının, içme suyu temini amaçlı yüzey sularından hem geosmin hem de 2-MIB'nin giderilmesinde çok etkili olabileceğine dair deneysel kanıtlar üzerine çalışmıştır. Deneysel sonuçlara göre, geosmin durumunda karbonun adsorpsiyon kapasitesinin yaklaşık beş kat daha fazla olduğu gösterilmiştir. 2-MIB ile karşılaştırıldığında. Ayrıca, 5-10 dakikalık bir süre boyunca 1-3 mg/L aralığındaki konsantrasyonlarda ozon ilavesinin kokuyu eşik koku değerinin altındaki seviyelere indirebileceği kanıtlanmıştır [11].

Lee vd [12] bu çalışma ile metilparaben ve halojenli ürünleri (Cl-, Br-, Cl,Cl-, Br,Cl- ve Br,Br-metilparabenler) ozonlama ve UV254/H_2O_2 işlemi sırasında reaksiyon kinetiğini ve bozunma etkinliğini araştırmıştır [12]. Parabenlerin ozon ve •OH ile reaksiyonları için ikinci dereceden hız sabitleri pH 7'de $kO_3 = 10^7 – 10^8$ M^{-1} s^{-1} ve k• OH = (2,3–4,3)× 10^9 M^{-1} s^{-1} olmuştur. Türler protonlanmış ve protonu giderilmiş parabenlerin spesifik kO_3 değerleri, diğer sübstitüe edilmiş fenollerle nicel yapı-aktivite ilişkileri yoluyla fenol halkası sübstitüent etkileri ile yakından ilişkilidir. Parabenlerin UV fotoliz hızı [kUV = (2,4-7,2)× 10^{-4} cm^2 mJ^{-1}] parabenin halojenasyon durumuna ve türe özgü kuantum verimlerinin de belirlendiği çözelti pH'ına bağlı olduğu belirlenmiştir. İçme suyu ve atık su atıklarının simüle edilmiş işlemlerinde, parabenler ozonlama sırasında verimli bir şekilde elimine edilmiş ve > %97 bozunma için > 0,26 g O_3/g DOC'lik bir spesifik ozon konsantrasyonu gerekliliği ortaya konulmuştur.10 mg L^{-1} H_2O_2 ile UV/H2O2 uygulaması sırasında, Cl,Cl-metilparaben hariç

2000 mJ cm^{-2} UV akışında bozunma seviyeleri > %90 olmuştur. Elde edilen reaksiyon kinetik parametrelerine dayanan kinetik modeller, parabenlerin bozunma seviyelerini başarılı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Genel olarak, Lee vd. tarafından yapılan bu çalışma ile ozonlama ve UV/H_2O_2, gelişmiş su arıtımı sırasında parabenleri ve bunların halojenli ürünlerini kontrol etmede etkili olduğu belirlemiştir [12].

Figueredo vd. [13] tarafından yapılan çalışmada ozonlama ve fotokatalitik oksidasyon (TiO_2/UVA) arasındaki sinerji hakkında çok sayıda çalışma, su arıtımında fotokatalitik ozonlamanın (PCOz) uygulanmasının yolunu açabileceği bildirilmektedir. Bu sinerjinin varlığını ve kaynağını tespit etmek amacıyla bu çalışmada TiO_2 P25, 365 nm UVA LED'ler ve 5 mg (mg DOC0)-1 (DOC0 7–10 mg L^{-1})'e kadar ozon transferli dozlar kullanılmıştır. PCOz'da yer alan sistemlerin her birinde pH, alkalinite ve su matrisinin etkisini gösteren sistematik bir çalışma gerçekleştirilmiştir ve organiklerin TiO_2 üzerindeki adsorpsiyonunun rolüne özellikle dikkat çekilmiştir [13].

Ultra saf suda, pH ve karbonat içeriğindeki artış, primidonun fotokatalitik bozunması üzerinde hafif bir olumsuz etki yaparken (TiO_2 üzerine düşük adsorpsiyon ve esas olarak serbest HO• tarafından azaltılır), bu etkinin mineralizasyonun üzerinde çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. pH ve alkaliliğin olumsuz etkisi oksalik asit için çok daha güçlü olduğu sonucuna varılmıştır (yüksek adsorpsiyon eğilimi ve esas olarak pozitif delikler tarafından oksitlenir). Buna göre, ultra saf su içinde pH < pHpzc'de (katalizörün sıfır şarj noktası) elde edilen sonuçlar, bileşimleri fotokatalitik performansı olumsuz etkilediğinden, ikincil atıklara hiç tahmin edilemez duruma geldiği görülmüştür.

Uygulanan deneysel koşullarda, sadece ikincil atık su için O_3/UVA ve TiO_2/UVA sistemleri arasında bir sinerji gözlenmiştir. Bu sinerji, bir yandan, matrisin kendisinden ozonun H2O•'ya ayrışmasını destekleyen reaktif varlıkların veya ara maddelerin üretilmesiyle ilgili olurken; ve diğer yandan, her iki sistem arasındaki doğrudan etkileşimlerden ziyade matris UVA absorpsiyonu azaldıkça katalizör aktivitesinde bir artışa sebep olmuştur. Bütün sebeplere rağmen, DOC'de önemli bir azalma sağlamak için ozon gereksinimi yükselmektedir ve ozona dirençli mikro kirleticilerin ortadan kaldırılması için yalnızca ilginç bir strateji olduğunu ortaya koymuştur [13].

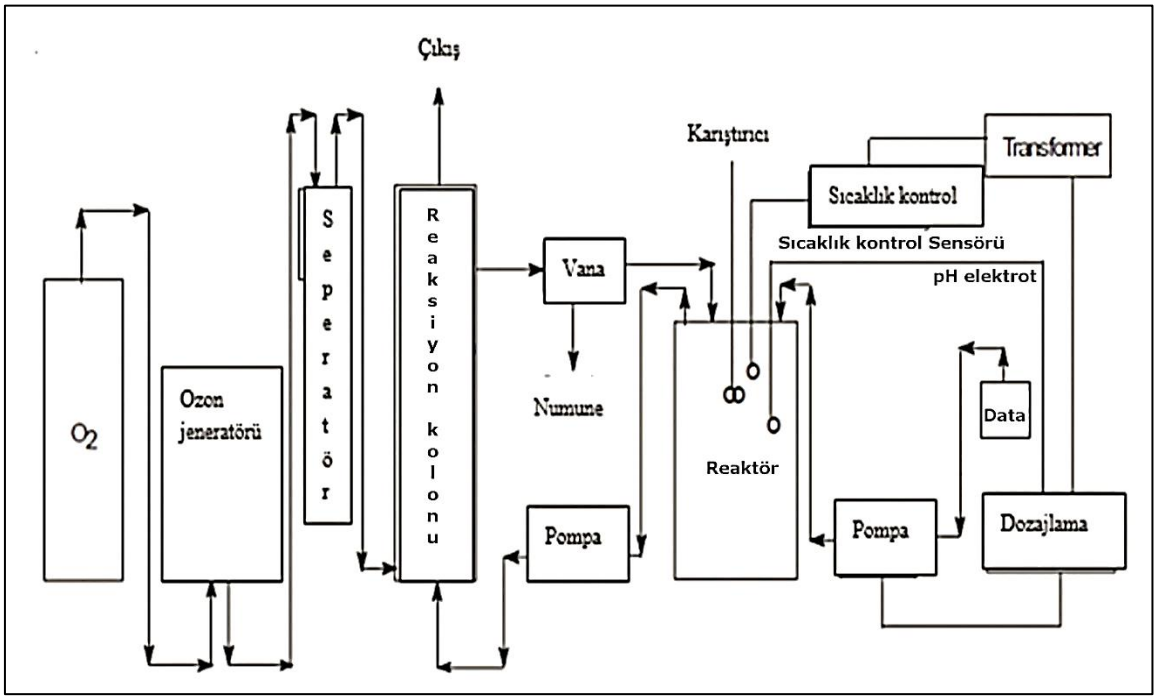
Ormad vd. [14] tarafından yapılan bu çalışmada, İspanya'daki içme suyu tesislerinde yaygın olarak kullanılan tedavilerin etkinliğini araştırmaktır. Ebro Nehri Havzasında sistematik olarak tespit edilen 44 pestisiti bozunma mekanizması araştırılmıştır. İncelenen pestisitler şunlardır: alachlor, aldrin, ametrin, atrazin, chlorfenvinfos, chlorpyrifos, pp0-DDD, op0-DDE, op0-DDT, pp0-DDT, desetilatrazin, 3,4-dikloroanilin, 4,40-diklorobenzofenon, dikofol, dieldrin, dimetoat, diuron, a-endosülfan, endosülfansülfat, endrin, a-HCH, b-HCH, c-HCH, d-HCH, heptaklor, heptaklor epoksit A, heptaklor epoksit B, heksaklorobenzen, isodrin, 4-izopropilanilin, izoproturon, metolaklor, metoksiklor, molinat, parathion metil, parathion etil, prometon, prometrin, propazin, simazin, terbutilazin, terbutrinural, tetradifon ve triflnural. Uygulanan teknikler ise şu şekilde özetlenebilir: klor veya ozon ile ön oksidasyon, alüminyum sülfat ile kimyasal çökeltme ve aktif karbon adsorpsiyonu. Klor ile oksidasyon, çalışılan pestisitlerin %60'ını ortadan kaldırmaktadır, ancak bu tekniği bir koagülasyon-flokülasyon-boşaltma işlemi ile birleştirmenin daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bu uygulamanın dezavantajı trihalometan oluşumudur. Ozon ile oksidasyon, incelenen pestisitlerin %70'ini ortadan kaldırmıştır. Müteakip bir koagülasyon-flokülasyon-boşaltma işlemi ile kombinasyon işlemin verimliliğini arttırmasa da, aktif karbon absorpsiyon işlemi ile kombinasyon, çalışılan pestisitlerin %90 oranında uzaklaştırılmasına neden olmuştur. Sonuç olarak bu tekniğin, çalışılan pestisitlerin çoğunu parçalamak için çalışılan teknikler arasında en etkili olduğu ispatlanmıştır [14].

Rodríguez vd. [15] tarafından yapılan çalışma ile Ozon, mikroorganizmaları, inorganik iyonları ve organik kirleticileri uzaklaştırmak için atık su arıtımında olduğu kadar yüzey veya yeraltı sularının içilebilir hale getirilmesinde de kullanılabilen güçlü bir oksidan olduğu tespit edilmiştir. Ozonun en eski kullanımı içme suyunun potabilizasyonunda biyosit olarak kullanılmasıdır. Belirli bir dezenfeksiyon derecesi için gereken bütünleşik ozon maruziyeti, mikroorganizmanın deaktivasyon kinetik sabitinden hesaplanabilir. Ozon, oksidasyon yoluyla sudaki demir, manganez ve arseniği süzülerek daha da ayrılan çözünmeyen bir forma çıkarır.

Her iki işlem de moleküler formda ozona ihtiyaç duyar, ancak diğer işlemlere dirençli olan organik kirleticilerin uzaklaştırılması ancak ozonlama sırasında meydana gelen dolaylı radikal reaksiyonların kullanılmasıyla mümkün olabilir Ozon, özellikle hidrojen peroksit mevcut olduğunda, su arıtımında mevcut olan en güçlü oksitleyici olan hidroksil radikalini vermek üzere suda ayrışır. Ozonlama prosesi modelleri, belirli bir kirleticinin istenen

uzaklaştırma derecesine veya toplam kirlilik ölçüsüne göre ozon dozunu ayarlamak için gereklidir. Organik karbonun uzaklaştırılması olarak tanımlanan mineralizasyon, kentsel ve evsel arıtma tesislerinden gelen atıksularda gerçekleştirilmiştir. Entegre ozon maruziyetinin bir fonksiyonu olarak TOC'nin logaritmik azalmasının, genellikle farklı kinetik parametrelere sahip iki bölge sunduğu sonuçlar belirlenmiştir. Gelişmiş oksidasyon süreçleri arasında, şu anda geliştirilmekte olan umut verici bir alternatif, ozonun katı katalizörlerle kombinasyon halinde kullanılmasıdır. Katalitik ozonlamanın mekanizmasının net olmadığı belirlenmiş, ancak metal oksitler söz konusu olduğunda, ozon veya organik bileşiklerin Lewis asit bölgelerine adsorpsiyonunun yalnızca yüzeyin sıfır yük noktası yakınında mümkün olduğu görülmüştür. Aktif karbon, diğer katalizör türlerinde de meydana gelebilecek bir rol olan ozon ayrışmasının bir başlatıcısı gibi davranırken Titanyum dioksit katalizör olarak kullanılarak naproksen (steroidal olmayan antienflamatuar) ve karbamazepin (antikonvülzan) ilaçları ile suyun mineralizasyonuna ilişkin olumlu sonuçları göstermektedir [15].

Turhan vd. [16] tarafından yapılan bu çalışmada, aromatik bileşiklerin su kaynaklarında kirliliğe neden olduğu ve birlikte birçok endüstride yaygın olarak kullanıldığına değinilmektedir.



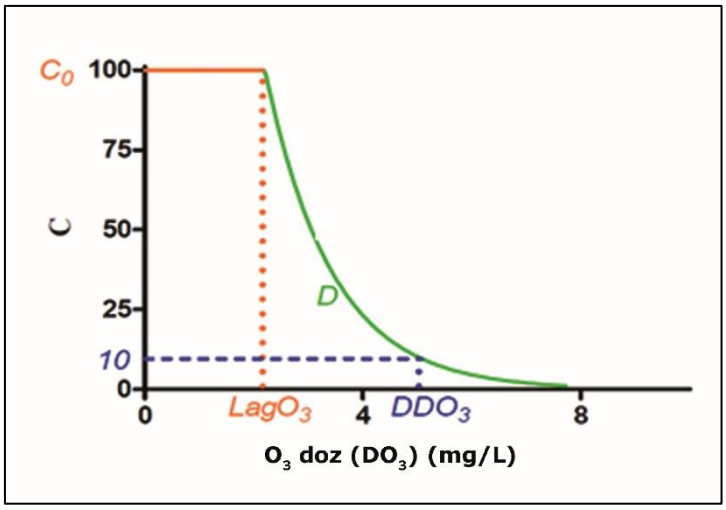
Şekil 2.1. Deney düzeneği şematik gösterimi [16]

Bu çalışmada ozon kullanılarak sulu çözeltilerde halka bölünmesi ile fenolün bozunabilirliğini incelemeyi ve kinetiğini belirlemeyi amaçlamaktadır. Deneysel yapılan çalışma içinde yarı kesikli bir reaktör kullanılmıştır. Deneysel düzenek şematik gösterimi Şekil 2.1.'de verilmektedir. Deney çalışmalarında belirli zaman aralıklarında reaksiyon ortamından numuneler alınmış ve bir UV/VIS spektrofotometresi kullanılarak fenol konsantrasyonları belirlenmiştir. Numuneler ayrıca fenolün konsantrasyon değişikliklerini izlemek için toplam organik karbon (TOC) analizine tabi tutulmuş ve ozonlama sırasında oluşan ara ürünler GC/MS olarak belirlenmiştir.

Antoniou vd. [17] tarafından yapılan bu çalışmanın amacı, farklı ham atık su ve atık su arıtma proseslerinden kaynaklanan, biyolojik olarak arıtılmış, değişen kalitedeki atık sulardan aktif farmasötik bileşenlerin (API'ler) uzaklaştırılması için gereken ozon konsantrasyonu araştırılmıştır. İsveç atık su arıtma tesislerinden (WWTP) gelen ikincil atık sulara 42 API (nominal konsantrasyon 1μg/L) eklenmiş ve tezgah ölçekli deneylerde farklı O_3 dozları (0,5-12,0 mg/L ozon) ile arıtılmıştır.

Her bir matristeki API'lerin duyarlılığını karşılaştırmak için, araştırılan her API'nin (DDO_3) on yılda bir azaltılmasını sağlamak için gereken spesifik ozon dozu, her birinde kalan API konsantrasyonuna uygulanan ozon dozu birinci dereceden bir denklem uydurularak her atık için belirlenmiştir. Ozon konsantrasyon gereksinimlerinin, matris özelliklerine bağlı olarak atık sular arasında önemli ölçüde değiştiği bulunmuştur. Spesifik ozon dozu daha sonra her bir atık suyun çözünmüş organik karbonuna (DOC) göre normalleştirilmiş ve DDO_3/DOC oranları, atık sular arasındaki her bir API için karşılaştırılmıştır.

Araştırılan 42 ilaç etkeninin 15'i kolay bozunabilir ($DDO_3/DOC \leq 0,7$), 19'u orta derecede bozunabilir ($0,7 < DDO_3/DOC \leq 1,4$) ve 8'i O_3 tedavisine karşı inatçı ($DDO_3/DOC > 1.4$) olarak sınıflandırılabilirliği belirlenmiştir. Ayrıca, araştırılan API'lerden herhangi birini çıkarmak için gereken ozon dozunun makul bir tahmininin, elde edilen deneysel ortalama DDO_3/DOC'nin herhangi bir atık suyun gerçek DOC'si ile çarpılmasıyla elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan çalışma ile ilgili ozon konsantrasyonuna göre elde edilen bertaraf konsantrasyonları Şekil 2.2.'de verilmektedir [17].



Şekil 2.2. Artan ozon konsantrasyonlarına karşı farmasötiklerin uzaklaştırılma oranı [17]

Amini vd. [18] tarafından yapılan bu çalışma, Su arıtma altyapısı, dünyanın çoğu bölgesinde çok sayıda operasyonel ve finansal zorlukla karşı karşıya olduğu gösterir. İyon değişimi, içme suyundaki çeşitli kirleticileri gidermek için kullanılabilen ve operasyonel avantajları nedeniyle son yıllarda artan oranda benimsenen bir su arıtma teknolojisidir; ancak iyon değişim sistemlerinin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği konusunda sınırlı araştırma yapılmıştır. Florida'daki sekiz içme suyu arıtma tesisinde organiklerin uzaklaştırılması yoluyla dezenfeksiyon yan ürünlerinin azaltılması için kullanılan iyon değiştirme teknolojisinin çevresel ve ekonomik etkilerini bütünsel olarak değerlendirmek için yaşam döngüsü değerlendirmesi ve maliyet analizini kullanmaktadır.

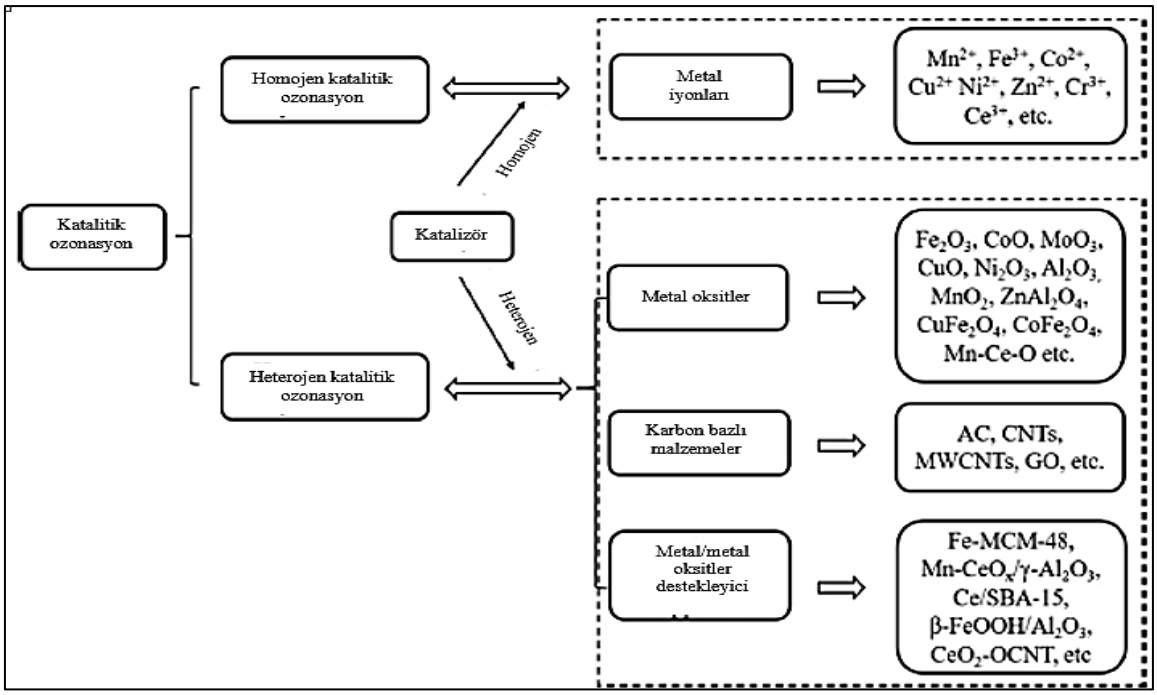
Çalışmada hem su miktarını hem de kalitesini hesaba katan fonksiyonel bir birim kullanılmış ve değerlendirme sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Etki değerlendirme sonuçları, inşaat aşamasının işletme aşamasına kıyasla ihmal edilebilir çevresel etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Geleneksel reçineli sabit yataklı reaktörler kullanan sistemler, tamamen manyetik iyon değişim reçinesine sahip karışık akışlı reaktörler kullanan sistemlerle karşılaştırılmıştır. Değerlendirilen sabit yatak sistemleri, daha yüksek tuz kullanımına ve tuzlu su atığı üretimine sahiptir, ancak daha az elektrik, reçine kullanır ve daha az malzeme taşınmasını gerektirir. Bu değişim, sabit yataklı sistemlerin ötrofikasyon, kanserojen, kanserojen olmayan ve ekotoksisite kategorilerinde daha yüksek çevresel etkiye, ancak diğer kategorilerde daha düşük etkiye sahip olmasına neden olmaktadır. Ayrıca sabit yataklı sistemlerin tamamen karma sistemlere göre daha düşük işletme maliyetine sahip olmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışma sonuçları ayrıca, ölçek

etkileri ekonomilerine benzer şekilde, hem çevresel etkilerin hem de işlevsel birim başına işletme maliyetlerinin ölçekle birlikte azaldığını göstermektedir [18].

Wang vd. [19] tarafından yapılan çalışmada, Ozon, içme suyu arıtımında dezenfeksiyon için yaygın olarak uygulanır ve bromür içeren suyun ozonlanması sırasında dezenfeksiyon yan ürünü bromat oluşur. Hidrojen peroksit (H_2O_2) ilavesi bromat oluşumunu etkili bir şekilde kontrol edebilir. Bununla birlikte, bromat depresyon performansı su kalitelerinden etkilenecektir. H_2O_2-O_3 prosesi sırasında farklı organik madde, amonyak ve bromür konsantrasyonları altında bromat depresyonu etkisini araştırmak için doğu Çin'deki bromür içeren tipik kaynak suyu seçilmiştir. Sonuçlar, organik madde, amonyak ve bromür konsantrasyonunun bromat oluşumunu önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Kaynak suyun çözünmüş organik karbon (DOC) konsantrasyonunu 2,0 ve 3,0 mg/L arttırmak için tirozin uygulandığında, üretilen toplam bromat konsantrasyonu, H_2O_2/O_3 (g/g) dozları 0'dan 1,0'a yükseldikçe kademeli olarak azalmış ve H_2O_2/O_3 (g/g) 0,5 ve 1,0 olduğundan bromat konsantrasyonu 10 µg/L'nin altında kontrol edilebilmektedir. Amonyak konsantrasyonu 0,1 ve 0,5 mg/L arttıkça, daha düşük H_2O_2/O_3 (g/g) dozları bromat oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Suya daha fazla H_2O_2 eklendikçe bromat oluşumu baskılanacaktır. Brom konsantrasyonunun artması, daha yüksek bromat oluşumuna neden olmuştur. Bromür konsantrasyonu 50 ve 200 µg/L arttığında, bromat konsantrasyonu standart seviyenin üzerinde olan 1,0 H_2O_2/O_3 (g/g) değerinde sırasıyla 10,7 µg/L ve 41,2 µg/L olmuştur. Suya 200 µg/L bromür ilave edildiğinden, bromat konsantrasyonu önemli ölçüde artmış ve ardından H_2O_2/O_3 (g/g) arttıkça, azalmış bromat kontrolü için daha fazla H_2O_2 gerektiği sonucuna varılmıştır [19].

Glaze vd. [20] tarafından yapılan çalışmada, ozon ve ultraviyole radyasyonun aynı anda uygulanmasının, ABD yüzey suyu kaynağından gelen iki farklı numune su üzerinde yapılan deneyler ile THM öncüllerinin yok edilmesi için tek başına ozondan kayda değer ölçüde daha etkili olduğunu ispatlamıştır. Başlangıçta mevcut olan bir öncünün yok edilmesini ve doğal organik matristen ikincil bir öncünün paralel oluşumunu ve ardından yok edilmesini içeren bir mekanizma önerilmektedir. Her kaynak sudan ikincil öncü, tek başına ozonla oksidasyona karşı görünüşte dirençlidir, ancak O_3/UV işlemi ile daha kolay yok edilmektedir [20].

Wang vd. [21] tarafından yapılan çalışmalarında Ozonlama işleminin, toksik organik kirleticilerin bozunması için dezenfeksiyon gibi su ve atık su arıtımında yaygın olarak uygulandığı görülmektedir. Ancak ozonun kullanım etkinliği düşüktür ve organik kirleticilerin ozon oksidasyonu ile mineralizasyonu etkisizdir ve ozonlama işlemi sırasında bazı toksik dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) oluşabilir. Son yıllarda artan ilgi gören katalitik ozonlama işlemi bu sorunların bir nebze de olsa üstesinden gelebilmektedir. Katalitik ozonlama sırasında, katalizörler O3 ayrışmasını destekleyebilir ve organik kirleticilerin bozunmasını ve mineralleşmesini artırabilen aktif serbest radikaller oluşturabilir. Bu çalışmada, su arıtımında ozonlama uygulamasının tarihçesi kısaca gözden geçirilmiştir [21].



Şekil 2.3. Katalitik ozonlama işleminde uygulanan çeşitli homojen ve heterojen katalizörler [21]

Yapılan çalışmada uygulanan metal bazlı katalizörler ve uygulama aşamaları şematik olarak Şekil 2.3.'de verilmektedir. Ozon molekülünün özellikleri, ozonlama türleri ve çeşitli ozon bazlı su arıtma prosesleri kısaca tanıtılmıştır. Katalitik için çeşitli katalizörler metal iyonları, metal oksitler, karbon bazlı malzemeler gibi homojen ve heterojen katalizörleri içeren ozonlama ve bunların olası katalitik mekanizmaları detaylı olarak analiz edilmiş ve özetlenmiştir. Ayrıca, katalitik ozonlama üzerine önceki araştırmaların bazı tutarsız sonuçları analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Toksik organik kirleticilerin bozunması için

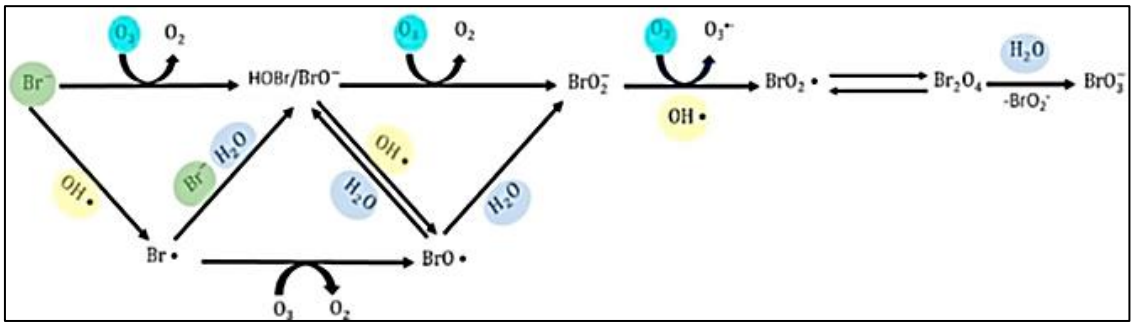
katalitik oksidasyon uygulaması, fenoller, pestisitler, boyalar, ilaçlar ve diğerleri dâhil olmak üzere özetlenmiştir. Son olarak, pH etkisi, katalizör performansı, katalitik mekanizma gibi katalitik ozonlamanın gelecekteki çalışmalarda daha fazla dikkat edilmesi gereken birkaç anahtar yönü önerilmiştir [21].

Soltermann vd. [22] tarafından yapılan çalışma ile başlıca İsviçre nehirlerinin havzalarındaki bromür ölçümleri ve kütle dengeleri, kimya endüstrisinin ve belediye atık yakma tesislerinin en önemli bromür kaynakları olduğunu ve 2014 yılında İsviçre'de Ren nehirine boşaltılan ~2000 ton bromürün sırasıyla ~ %50 ve ~ %20'sini oluşturduğunu ortaya koymuştur. Yaklaşık 100 atık su arıtma tesisi (AAT) tesislerini yenilemek üzere İsviçre düzenlemelerine uygun olarak gelecekte mikro kirleticilerin azaltılmasına yönelik arıtma sistemleri incelenmiştir. Ozonlama ile yükseltme prosesi, bromür içeren atık sularda istenmeyen bromat oluşumuna neden olabilmektedir. Ölçülen bromür konsantrasyonları, 69 AAT'nin yaklaşık %75'inde <0,05 mg/L iken, belirli bromür kaynaklarına sahip (örneğin, belediye atık yakma tesisleri, çöp sızıntı suyu ve kimya endüstrisi) AAT' lerde 0,4 ila ~50 mg/L arasında değişmektedir. Atık su ozonlaması, ≤0,4 mg O3/mg DOC' lik spesifik ozon konsantrasyonlarında az miktarda bromat oluştururken, bromat verimleri, daha yüksek ozon konsantrasyonları için spesifik ozon dozu ile neredeyse lineer olarak ilişkilendirilmiştir. Atık su arıtımında (0,4-0,6 mg O3/mg DOC) tipik spesifik ozon dozları için molar bromat verimleri ≤%3'tür. Modellenmiş bir ekstrem senaryoda (tüm yükseltilmiş AAT'lerin 10 µg/L bromat saldığı), bromat konsantrasyonları büyük İsviçre nehirlerinde <0,4 µg/L ve belediye atık sularında bulunan yüksek fraksiyonlu alıcı su kütlelerinde litre başına birkaç mikrogram artmıştır [22].

Su arıtma ve ıslah sistemlerinde dezenfeksiyon, su kaynaklı patojenlerle ilişkili potansiyel sağlık risklerini ortadan kaldırır, ancak insan sağlığına zararlı dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) üretebilir. Potansiyel kanserojen bromat, bromür içeren suların ozonlanması sırasında oluşan bir DBP'dir. Bromat oluşumu sorununu azaltmak için bromatın farklı fiziksel/kimyasal veya biyolojik indirgeme yöntemleri araştırılmıştır. Şimdiye kadar, içme suyu arıtımında adsorpsiyona dayalı fiziksel yöntemin kimyasal yöntemlerden daha etkili olduğu kanıtlanmıştır [22].

Jahan vd. [23] yaptığı çalışmalarda biyolojik olarak aktif karbon filtreleri ve denitrifikasyon biyoreaktörleri gibi çeşitli biyoreaktör sistemlerinde biyolojik indirgeme yöntemleri üzerine

bazı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, bromat minimizasyonunun mikrobiyolojik mekanizmaları veya biyokimyasal yolları bugüne kadar net olarak belirlenememiştir. Genetik analiz, kometabolik veya solunum yolları gösterebilen bromat indirgemesinde yer alan mikroorganizmaların daha geniş bir resmini sağlayabilir ve farklı katkıda bulunan gruplar arasındaki sinerji fonksiyonlarını doğrulayabildiği ve farklı elektron verici ve alıcıların difüzyon katsayılarından oluşturulan hipotez, oksijene göre bromatı tercih eden bazı mikroorganizmaların, bromat indirgemesi için gerekli aktivasyon enerjisini düşüren spesifik enzimler içerdiğini gösterir. Sonuç olarak ayrıca etkili bir uygulama stratejisi olarak mikrobiyal bromat azaltımı düşünüldüğünde; pH, ozon dozu, katkı maddeleri veya amonyak, hidrojen peroksit ve/veya kloramin gibi bileşenler, çözünmüş organik karbon seviyeleri, biyofilm içindeki çözünmüş oksijen gradyanı ve bromat çıkarma veya azaltma zamanı için boş yatak teması gibi çeşitli etkileyen parametrelerin kantitatif korelasyonlarını gözlemlemek için saha ölçeği araştırmaları gereklidir. Yapılan çalışmada bromat oluşum mekanizması ele alınmış ve Şekil 2.4'te ozonlama süreci içinde bromat oluşu mekanizması verilmiştir [23, 24, 25].



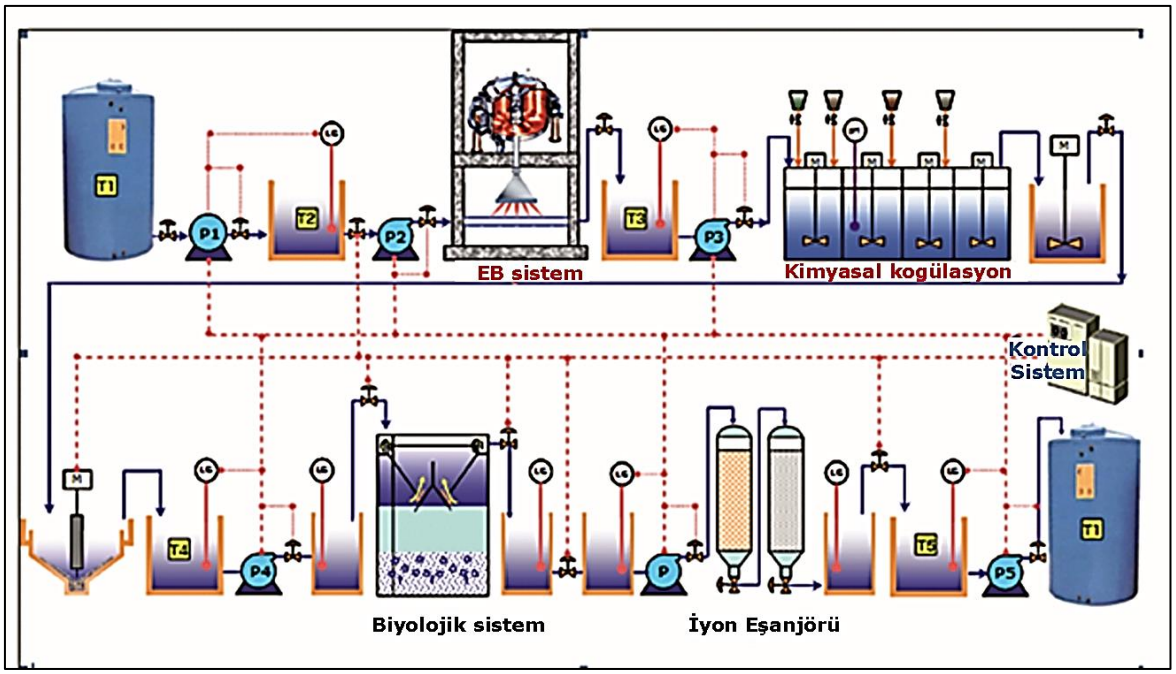
Şekil 2.4. Ozonlama sırasında kimyasal bromat oluşum yolu [23, 24]

Singer [26] tarafından yapılan çalışmada çok sayıda kuruluş, klora alternatif bir oksitleyici ve dezenfektan olarak ozonu benimsemeyi düşündüğü belirtilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada, ozonun içme suyu arıtımında kimyasını ve uygulamalarını gözden geçirmekte ve halen araştırmalarla ele alınması gereken önemli konuları değerlendirmektedir. Tartışılan konular arasında organik ve inorganik yan ürünler, ozonla dezenfeksiyon, biyolojik arıtma, ozonun pıhtılaştırıcı yardımcısı olarak kullanımı ve çok aşamalı ozonlama yer almaktadır [26].

Tripathi [27] tarafından yapılan çalışmada ozonun, 5,0, 10,0 ve 15,0 mg/L konsantrasyonlarının 2, 5 ve 10 dakikalık temas süreleri için uygulanan ozon dozları ile

ikincil atık sudaki Biyobozunur Çözünmüş Organik Karbon'u (BDOC) artırma potansiyeli ile ilişkili oksidasyon süreçlerinde, koliform inaktivasyonunda ve Dezenfeksiyon Yan Ürünleri (DBP'ler) oluşumunda etkinliğini araştırmayı amaçlamıştır. Bu çalışmada kullanılan atık su, Hindistan, Varanasi'deki Bhagwanpur Kanalizasyon Arıtma Tesisinden toplanmıştır. Bu deneyin sonuçları, KOİ, TOK, UV254, renk, bulanıklık ve toplam nitrojen parametrelerinin en yüksek düzeyde bozunması için en uygun dozun 5 dakikalık maruz kalma için 10 mg O_3/L olduğunu göstermiştir. Mikrobiyal biyokütle aralığının inaktivasyon aralığı %95 ile %98 arasında bulunmuştur. Deney, aldehitlerin ve karboksilik asit oluşumunun ozon dozu ve maruz kalma süresi ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu ve ozonun ikincil atık arıtmanın arıtma verimliliğini artırabileceğini ortaya koymuştur [27].

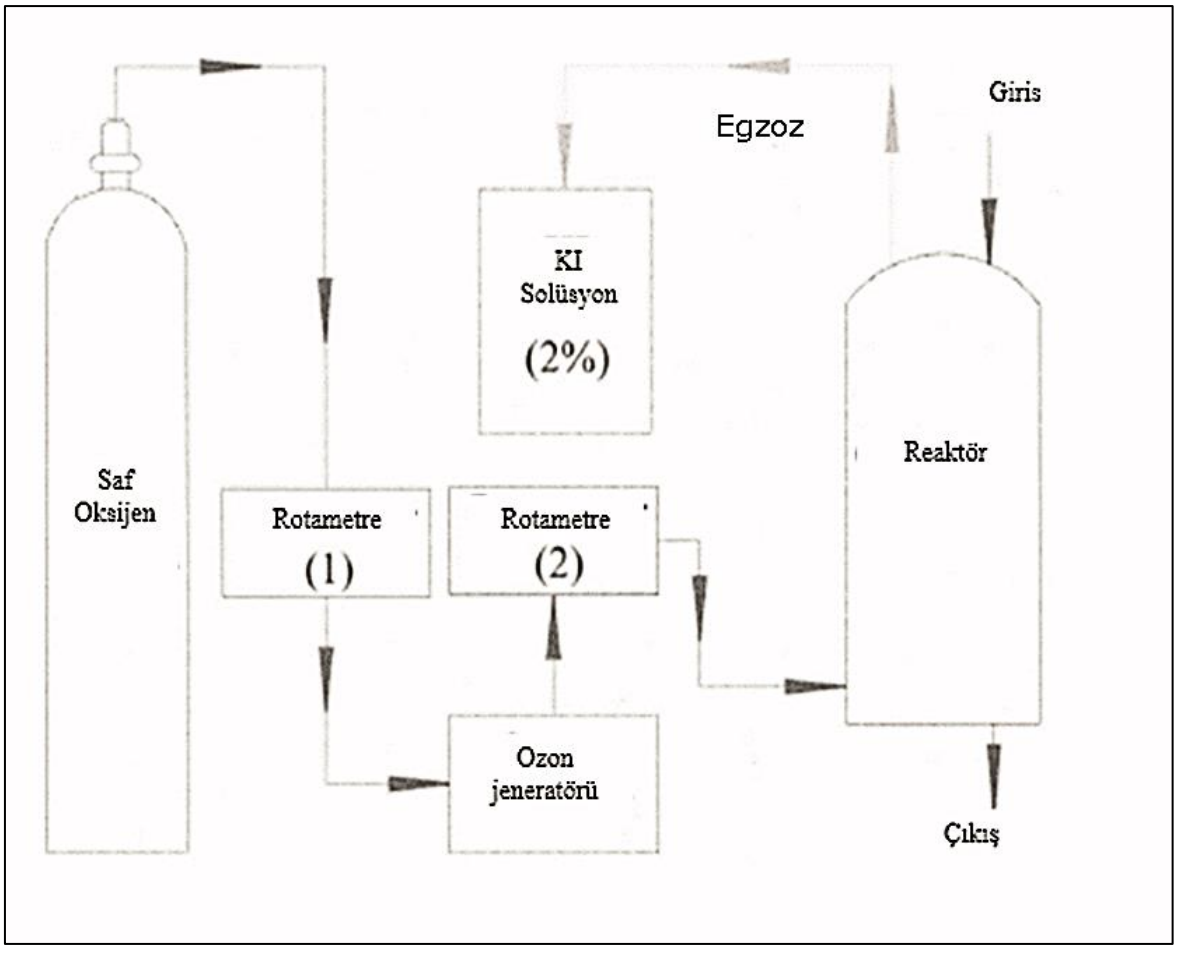
Emami-Meibodi vd. [28] tarafından yapılan çalışmalara göre elektron ışını (EB), farklı türdeki kanalizasyon ve endüstriyel atık suların dezenfeksiyonu ve arıtılması için kullanılır ancak, yüksek sermaye yatırım gerekliliği ve bu süreçte tüketilen bol enerji, maliyet etkinliği hakkında şüphe uyandırmaktadır. Meeibodi vd. literatürde daha önce yapılan bazı çalışmalar ile, geleneksel atık su arıtma yöntemlerinin ekonomik olarak değerlendirilmesini incelemiştir [28-31]. Oksijen içeren bir gaz atmosferinde iyonlaştırıcı radyasyonun etkisiyle ozon oluşumu sürecinin iyi bilindiği ve [32] bu nedenle, bir EB arıtma proses tasarımcısı, atık su dezenfeksiyonu için üretilen ozonu ve ışınlama sürecini kullanabileceğini açıklamıştır. Bu çalışmada, iki tekstil su atığı ve bir belediye atık suyu dahil olmak üzere farklı atık sular, arıtma prosesinde optimum koşulları belirlemek için farklı ışınlama stratejileri kullanılarak (yani parti, 60 lt/dk ve 1000 m_3/gün) altında deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlara göre, EB geleneksel yöntemlerin atık su arıtma yöntemleri verimliliğini artırmaktadır ancak tekstil numuneleri için EB ışınlamasından önce koagülasyon önerilir. EB uygulamasının geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında maliyet tahmini, EB'nin klorlamadan daha pahalı ve aktif çamurdan daha ucuz maliyete sahip olduğunu belirlemiştir. Bu nedenle, EB ışınlaması, yalnızca ve yalnızca geleneksel tekstil atık su arıtma yöntemleri yetersiz olduğunda veya sağlık nedenleriyle belediye atık suyunun klorlanmasına izin verilmediğinde tavsiye edilir. Bununla birlikte, yapılan çalışma ile ileri oksidasyon prosesleri (AOP) arasında endüstriyel ölçekli operasyonlarda belki de en uygun olanı EB ışınlama prosesidir sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan EB Teknolojisi ile çalışan pilot ölçekli EB sistemi Şekil 2.5'de verilmektedir [28, 29, 30, 31, 32, 33].



Şekil 2.5. EB sistemi, kimyasal koagülasyon, biyolojik sistem ve iyon değiştirici dâhil EB-Tech pilot tesisinin şematik çizimi. T1:rezervuar; T2-T5: tutma tankı; P1-P5: su pompası [27]

Yang ve Yuang [34] yaptıkları çalışma ile ozon oksidasyonu, organik ve inorganik atık suların arıtılması için gelişmiş bir oksidasyon işlemi olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, suda model kirletici olarak sodyum asetat (kimyasal oksijen ihtiyacına [KOİ] göre) seçilmiş ve sodyum asetatın suda ozon oksidasyonu ile bozunma etkinlikleri ve mekanizması araştırılmıştır. Yaptıkları çalışmada ozonun kamu su temini sterilizasyonu için ilk önemli uygulaması 1905'te Fransa'nın Nice kentinde yapıldığı [35] ayrıca ozonun sudaki organik madde ile iki yoldan reaksiyona girebildiğinin iyi bilindiği bildirilmektedir. Doğrudan oksidasyon (moleküler O_3), reaktanların yapısına bağlı olarak seçici olarak reaksiyona girerken, moleküler O_3 dekompozisyonundan üretilen hidroksil radikalleri (OH) organik bileşiklerle ayrım gözetmeksizin (dolaylı serbest hidroksil radikal oksidasyon reaksiyonları, E0 = 2.80 V) reaksiyona girer [36-38]. Bu son eylem seçici değildir ve kirleticinin tamamen mineralleşmesine yol açabilir [39]. OH radikalinin organik moleküllerle reaksiyon hızı tipik olarak 106 ila 109 L/(mol-s) mertebesindedir [40]. Sonuçlar, ozon oksidasyonunun suda sodyum asetatın ileri düzeyde işlenmesi için etkili bir arıtma teknolojisi olduğunu gösterdi; pH değeri 10,82, ozon konsantrasyonu 100 mg/L, reaksiyon süresi 30 dakika ve reaksiyon sıcaklığı 25 °C olduğunda, sodyum asetat çözeltisinden KOİ uzaklaştırma oranı maksimum %45,89 değerini elde ettiği sonucuna varılmıştır. KOİ uzaklaştırma oranı önce artmakla birlikte ardından bikarbonat (HCO_3) konsantrasyonunun 0'dan 200 mg/L'ye düşmesiyle

azalırken, en büyük düşüş %20,35'e düşmüştür. KOİ uzaklaştırma oranı karbonat (C032-) konsantrasyonu ile 0'dan 200 mg/L'ye %25,38 olarak azalmış ve CO32-, hidroksil serbest radikallerinin oluşumunu engellemek için HCO_3'den daha belirgin bir tutucu etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Kalsiyum klorür $CaCl_2$ ve kalsiyum hidroksit $Ca(OH)_2$ KOİ giderme oranını büyük ölçüde artırabildiği gibi; sadece ozon oksidasyonuna kıyasla sırasıyla %31,46 ve % 50,64 artan 30 dakikalık bir reaksiyon süresinden sonra sırasıyla % 77,35 ve % 96,53'e ulaşabilmiştir. Sodyum asetatın ana ozon oksidasyon ürününün karbon dioksit (CO_2) olduğu ve ozon oksidasyon işleminde sodyum asetatın bozunmasının hidroksil serbest radikallerinin mekanizmasını takip ettiğini kanıtlamıştır. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan deney set-up'ı Şekil 2.6'da verilmektedir [40].



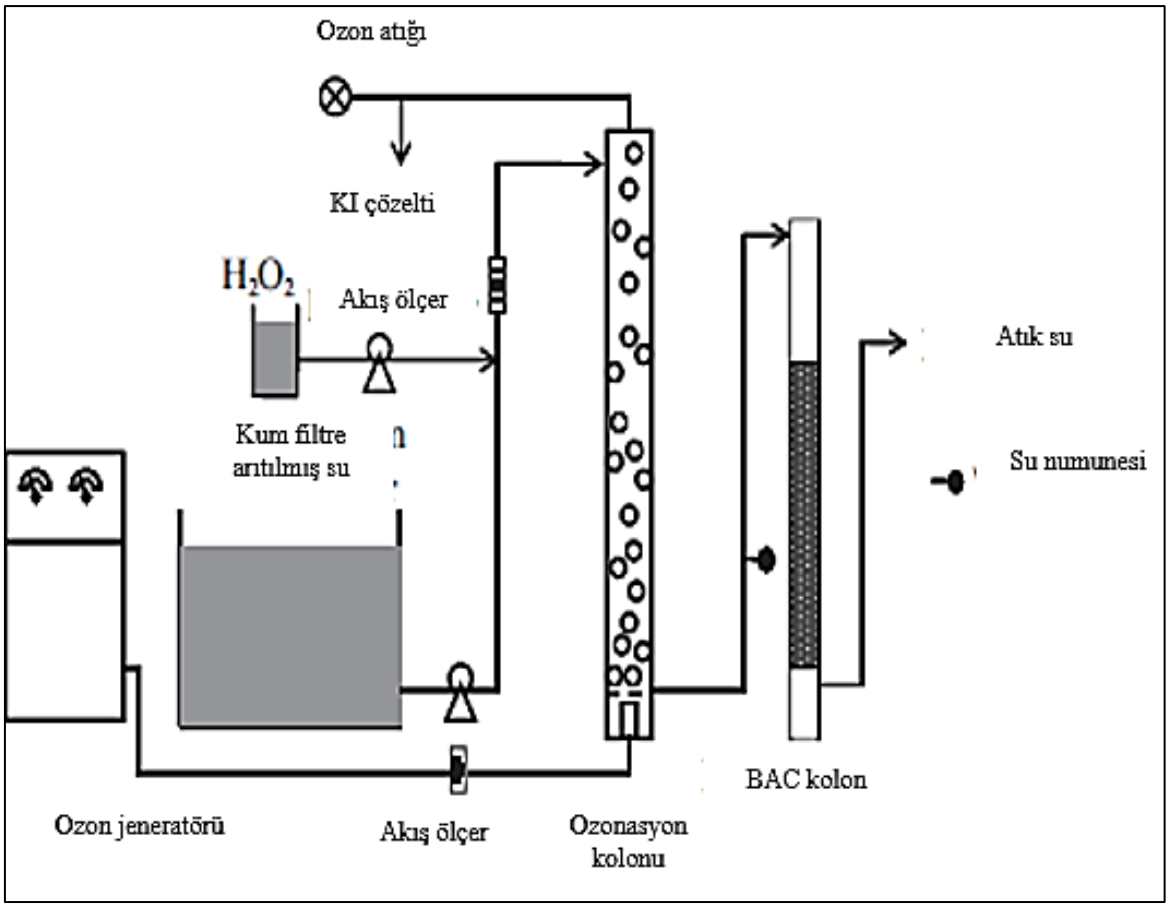
Şekil 2.6. Ozon oksidasyonunun şematik diyagramı

Deng vd. [41] tarafından yapılan çalışmada Chengdu, Çin'in güneybatısında, yüksek ozon (O_3) karışım oranına sahip bir mega kentin su değerlerini incelemiştir. Kimyasal süreçleri ve nedenlerini araştırmak için Chengdu'da uçucu organik bileşiklerin (VOC'ler), NO_2 ve O_3'ün

yüksek zamansal çözünürlüğe sahip gözlemi yapılmıştır. Yüksek O_3 seviyelerde olduğu görülmüştür. VOC, NO_2 ve O_3'ün saatlik karışım oranları 28 Ağustos-7 Ekim 2016 tarihleri arasında online bir sistemle izlenmiştir. Meteorolojik koşullara göre, göreceli olarak sıcak havası ve düşük rüzgâr hızı ile Chengdu, O3 oluşumuna elverişli olduğu bildirilmiştir. Chengdu, meteorolojik koşullara göre görece sıcak havası ve düşük rüzgar hızı ile O_3 oluşumuna elverişlidir. Chengdu'daki O_3'ün bir kısmı şehir merkezinden nakledilebilir. O_3 epizodlarında NO_2 ve O_3'ün ortalama karışım oranları sırasıyla 20,20 ppbv ve 47,95 ppbv idi. O_3 olmayan bölümlerde, NO_2 ve O_3'ün ortalama karışım oranları sırasıyla 16,38 ppbv ve 35,15 ppbv bulunmuştur. Toplam VOC'lerin (TVOC'ler) ortalama karışım oranı, O_3 olmayan bölümlerde 40,29 ppbv ve bu, O3 bölümlerinden (53,19 ppbv) daha düşük olarak belirlenmiştir. Chengdu'daki toplam O_3 oluşum potansiyelinin (OFP) %51,7'sini alkenler oluştururken, bunu %24,2'sini oluşturan aromatikler izlemiştir. Etilen, trans-penten, propen ve BTEX (benzen, etilbenzen, toluen, m/p-ksilen, o-ksilen) de Chengdu'daki OFP'ye önemli katkılarda bulunmuştur. O3 bölümlerinde ise, sefer sırasında yoğun ikincil oluşumlar gözlemlenirken Aseton, Metiletilketon (MEK) ve Metilvinilketon (MVK) gibi oksijenli VOC'ler (OVOC'ler) bileşiklerin bol miktarda bulunduğu tespit edilmiştir. İzopren, O3 epizodları sırasında hızla MVK ve Metakroleine (MACR) dönüşmüş aynı zamanda aseton, esas olarak C_3-C_5 hidrokarbonların oksidanı olduğu sonucuna varılmıştır [41].

Wang vd. [42] tarafından 2014 yılına ait bir araştırmada Huangpu Nehrine ait septik/bataklık koku ve bulanıklık probleminin tamamen giderilmesi üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Wang vd'e göre mevsimsel toprak/küf kokusuyla ilişkili septik/bataklık kokusuyla tanınan Huangpu Nehri, Şanghay için önemli bir içme suyu kaynağıdır. Bu nedenle arıtılması ülke için büyük önem arz etmektedir [42]. Buna bağlı olarak yaptıkları ön çalışmada nehir suyu içinde yüksek konsantrasyonda bromür bulunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek bromür konsantrasyonu (204,9–394,6 μg/L) ile [43] koku giderme için ozon kullanılıyorsa bromat kontrolü düşünülmelidir. Çünkü Bromür içeren kaynak suyun [44] ozonlanması sırasında potansiyel olarak kanserojen bromat ($BrO^{-}3$) oluşumunun keşfi ozonun yararlarını büyük ölçüde tehlikeye atmaktadır. Yaptıkları deneysel çalışma ile Huangpu Nehri kaynak suyundan karakteristik septik/bataklık kokusunun tamamen giderilmesi, yalnızca bir ozon-biyolojik aktif karbon (O_3-BAC) işleminde 4,0 mg/L kadar yüksek bir ozon dozu altında başarılabildiği ve bu da yüksek bromür içeriği nedeniyle yüksek konsantrasyonlarda kanserojen bromat üretimine neden olduğunu belirlemiştir. Yaptıkları çalışmada, Huangpu Nehri suyunun arıtılması için O_3-BAC işleminden önce

H_2O_2 eklenerek bromat ve septik/bataklık kokusunun eşzamanlı kontrolü olasılığını araştırılmış, H_2O_2 ilavesi, 0,5 veya daha yüksek bir H_2O_2/O_3 (g/g) oranında bromat konsantrasyonunu etkili bir şekilde azaltabildiği sonucuna deneysel olarak ulaşmışlardır Aynı zamanda, her ozon konsantrasyonu için H_2O_2/O_3 oranının optimizasyonunun gerekmesine rağmen, H_2O_2 ilavesiyle septik/bataklık koku gideriminin arttırıldığı belirlenmiştir. 2,0 mg/L ozon dozunda, 0,5 H_2O_2/O_3 oranında koku tamamen bertaraf edilmiştir. Sonuçlar, uygun bir dozda H_2O_2 uygulamasının, Huangpu Nehri kaynak suyunun ozonlanması sırasında bromat oluşumunu bastırırken septik/bataklık kokusunun giderilmesini iyileştirebileceği sonucunu göstermiştir. Yapılan araştırmada kullanılan Ozon Biyolojik Aktif Karbon (O_3-BAC) deney düzeneği Şekil 2.7'de verilmektedir [45].



Şekil 2.7. O_3-BAC (Ozon biyolojik aktif karbon) sisteminin şematik diyagramı [45]

3. TEORİ

Bilindiği üzere artan nüfus yoğunluğunun fazla olduğu kentlerde içme suyu ihtiyacı büyük önem arz etmekte özellikle nüfus yoğunluğu fazla olan illerde ve yerleşim alanlarında yüzeysel sular içme suyu maksadıyla tüketime sunulmaktadır. İçme suyunun, şehir şebekesine verilmeden önce mutlaka dezenfeksiyon işleminden geçirilmesi, içme suyu ile ilgili gerek yurt içinde gerekse yurt dışında uygulanan standartlara mutlak surette riayet edilmesi, suyun kalitesi ve niteliğinin içme suyu formatına getirilmesi gerekmektedir [55].

Günümüz itibariyle özellikle büyük kentler başta olmak üzere, birçok yerleşimde yüzeysel sular içme ve kullanma suyu amacıyla tüketime sunulmakta, ancak sunum öncesi mutlaka içme suyu arıtma tesislerinden geçirilerek suyun kalitesi istenilen niteliğe getirilmektedir. Öte yandan, son zamanlarda bir taraftan ilgili yasa ve yönetmeliklerin sıkılaştırılması, diğer taraftan yeraltı sularının kalitesinin bozulması sonucunda yüzeysel suların yanı sıra yeraltı sularının da arıtılarak şebekeye verilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Farklı coğrafyalarda suyun arıtılması ile ilgili farklı metodolojiler uygulanmaktadır [50, 51].

3.1. İçme Suyu Tanımı ve Genel Özellikleri

Yeryüzünde alternatifi olmayan kaynakların başında su gelmektedir. Artan nüfus ve küresel ısınmanın etkileri ile birlikte su kullanımı önemli bir etken haline gelmiştir. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından yapılan araştırmalar sonuncunda 1995 ve 2025 yılları arasında nüfus ile su ihtiyacı arasında bir oranlama kullanılarak ülkeler, su ihtiyaçlarına göre sınıflandırılmıştır. Bu verilere ışığında, 1995 yılında su kıtlığı ve su stresi yaşanan nüfusun dünya nüfusuna oranları sırasıyla % 29 ve % 12 iken, 2025 yılında bu oranlar % 34 ve % 15'e yükseleceği tespit edilmiştir Çizelge 3.1 su ihtiyacı ve derecesinin 1995-2025 yılları arasındaki değişimlerini göstermektedir. Yeryüzünde yaklaşık 2 milyar insan, su stresi olan ülkelerde yaşamaktadır. Bunun yanında, yaklaşık 4 milyara yakın kişi ise yılın en az bir ayında büyük bir oranda su sıkıntısı yaşamaktadır. Dünyada her yıl yaklaşık 6 milyon kişi ise sağlıklı içilebilir su ihtiyacını karşılayamadığı için farklı hastalıklar (özellikle dizanteri, tifo, kolera ve hepatit A) nedeniyle yaşamını kaybetmektedir. Bu istatistiğin büyük bölümü yaklaşık 361.000 ishal ve benzeri hastalıklardan dolayı hayatını kaybeden çocuklar oluşturmaktadır [53].

Çizelge 3.1. Kişi başına kullanılabilir su potansiyelinin yıllara göre dağılımı [53]

Mevcut Durum	Su kaynağı	1995		2025	
		Nüfus (milyon)	Dünya nüfusuna oranı (%)	Nüfus (milyon)	Dünya nüfusuna oranı (%)
Su kıtlığı var	<500 500-1000	1077 587	19 10	1783 624	25 9
Su stresi var	1000-1700	669	12	1077	15
Su yeterli	>1700	3091	55	3494	48
Sınıflandırma dışı	-	241	4	296	4
Toplam	-	5665	100	7274	100

Yapılan araştırmalarda yeryüzünde toplam su tüketiminin yaklaşık % 70'i tarım sulamalarında, % 22'si endüstri sektöründe ve % 8'i içme ve kullanma suyu olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.2 dünya çapında suyun kullanım alanlarını göstermektedir su ihtiyacı ve derecesinin 1995-2025 yılları arasındaki değişimlerini göstermektedir. Bu oranlar farklı ülkelerde farklı biçimde değişlik göstermekle birlikte Avrupa'da sektörel olarak su kullanımı oranları sırasıyla % 33 tarım, % 51 endüstri, % 16 içme ve kullanma amaçlı olduğu görülecektir.

Çizelge 3.2. Su kaynaklarının sektörel bazda dağılımı (%) [53]

Sektör	Dünya	Gelişmiş Ülkeler	Gelişmekte Olan Ülkeler	Az Gelişmiş Ülkeler	Avrupa	Türkiye
Tarım	67-70	39	52	86	33	72-75
Endüstri	22-23	46	38	7	51	10-12
İçme ve Kullanma	8-10	15	10	7	16	15-16

Yeryüzündeki su kaynakların kısıtlı olması ve artan nüfusun etkisiyle birlikte su kaynaklarının israf edilmemesi gerekmektedir. Bu kapsamda su kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması ve ham suyun içilebilir duruma getirilmesi konusu büyük önem arz etmektedir. Birleşmiş Milletler-Su (UN-Water) tarafından içme suyu tasfiyesinde belirlenen hedef berrak, renksiz, kokusuz, içinde hastalık yapan organizmalar mevcut olmayan, sağlığa zararlı kimyevi maddeler ihtiva etmeyen ve ev içinde (çamaşır veya bulaşık yıkamak için,

temizlik, vb. maksatlarla) kullanılmaya uygun bir su üretmektir. İçme ve kullanma suyu olarak kişi başına düşen su miktarı hesaplaması çeşitli kaynaklarda farklı oranlar göstermekle birlikte genel olarak aşağıdaki gibi kullanılır Çizelge 3.3 Metropollerde nüfus başına düşen evsel su ihtiyacını göstermektedir [46].

Çizelge 3.3. Kent nüfusuna bağlı evsel su ihtiyacı [46]

Kentin Nüfusu (N) (kişi)	Evsel Su İhtiyacı (L/kişi/gün)
≤ 10.000	70
10.000<N≤50.000	80
50.000<N≤100.000	100
N>100.000	120

3.1.1. İçme suyu kalitesi ve sınıflandırılması

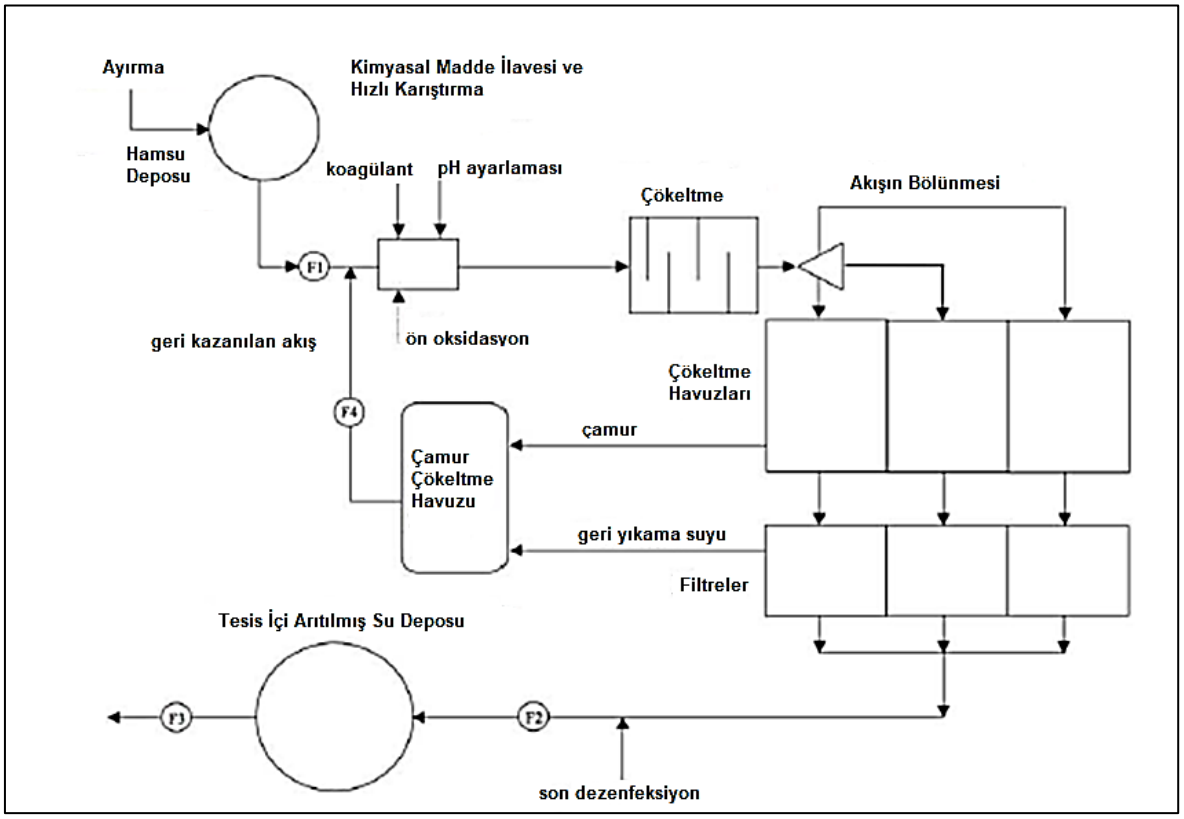
İçme suyu ve kullanma suyu kalitesi genel olarak iki kısımda değerlendirilir. Arıtılmadan önceki durum ve arıtıldıktan sonraki durum olarak iki kategoride sınıflandırılır. Her iki durum için gerekli parametrelere bakılarak uygulanacak iş ve işlemler tespit edilir [48].

3.1.2. Arıtılmamış (Ham su) kalitesi

Yüzeysel suların depolandığı Barajlardan ve göletlerden alınan ve içerisine herhangi bir kimyasal işlem uygulanmamış su olarak da ifade edilen Ham Su içerisinde bulundurduğu parametrelere göre 29.06.2012 tarihli ve 28338 sayılı "İçme Suyu Elde Edilen veya Elde Edilmesi Planlanan Yüzeysel Suların Kalitesine Dair Yönetmelik" kapsamına göre sınıflandırılır ve bu sınıflandırmaya göre içme suyu arıtma prosesleri tespiti yapılması gerekmektedir [48].

Türkiye'de ham su kaynakları, küçük su arıtma sistemlerinin %84'ü yüzey suyu, %10'u yeraltı suyu ve % 6'sı her iki kaynağın bir kombinasyonunu kullanarak değişiklik göstermektedir. Yeraltı suyu kaynakları olan sondaj kuyuları veya su kaynakları genellikle suyu içilebilir hale getirmek için sadece dezenfeksiyon yapılarak kullanır [48]. Ham su kaynağı tipik olarak yüzey suyu olan arıtma tesisleri, çok aşamalı bir süreci içerir. Yüzey sularının arıtılmasında ilk adım koagülasyon ve flokülasyondur. koagülasyon veya hızlı

karıştırma adımı, herhangi bir koloidal maddeyi (yani mikroskobik askıda çözünmeyen partikülleri) destabilize etmek için ham suya alüminyum veya ferrik sülfat gibi kimyasalların eklenmesini içerir ve bunların gevşek bir şekilde kümelenmiş ince partiküller kütlesi veya flok oluşturmasına izin verir. Su, topaklanma olarak adlandırılan topak büyümesine izin verecek şekilde yavaşça karıştırılır. Daha sonra su, önceki adımda oluşan topak kümelerinin çökeltme ve yüzdürme yoluyla uzaklaştırıldığı bir arıtıcıya akar. Bu aşamada, sudaki parçacıkların çoğu uzaklaştırılmıştır, ancak filtreleme gerektiren daha küçük parçacıklar kalmaktadır. Basınç filtrelerinin yanı sıra kum filtreleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Filtrasyon aşaması, etkili olması için düşük bir bulanıklık seviyesi (<1 tercihen <0.5] NTU) gerektiren dezenfeksiyonun son aşamasının önemli bir öncüsüdür. Filtrelenen su dezenfekte edildikten sonra ya bir rezervuarda (veya tankta) depolanır ya da doğrudan tüketicilere dağıtılır [49].



Şekil 3.1. Konvansiyonel bir su arıtma tesisinin şeması (Momba ve Brouckaert 2005) [49]

Örnek bir konvasyonel arıtma sistemi için Şekil 3.1'de şematik akış şeması verilen su arıtma tesislerinin çoğu 0,3 ML/d (55 gpm) ile 120 ML/d (Mega liters per day) (22,000 gpm) arasında bir kapasiteye sahiptir ancak tipik olarak tasarım kapasitelerinin altında çalışmaktadır [49].

29.06.2012 tarihli ve 28338 sayılı “İçme Suyu Elde Edilen veya Elde Edilmesi Planlanan Yüzeysel Suların Kalitesine Dair Yönetmelik” hükümlerine göre; Bir yerleşim yeri veya kentsel olarak kullanılacak içme ve kullanma suyu için Çizelge 3.4’de verilen parametreler ışığında uygulanacak arıtma prosesleri tespit edilmesi gerekmektedir. Suyun içerisindeki maddeler ve parametreler analiz edildikten sonra Çizelge değerlerine göre içme suyu arıtma prosesi uygulanır [46].

Çizelge 3.4. Su kalite standartları ve sınıflandırması [46]

	A1 K	A1 Z	A2 K	A2 Z	A3 K	A3 Z
pH	6,5-8,5			5,5-9	5,5-9	
Renk (filtrasyon sonrası) (Pt-Co Birimi)	10	20 (İ)	50	100 (İ)	50	200 (İ)
Toplam askıda katı madde (AKM) (mg AKM/L)	25			25		
Sıcaklık (ºC)	22	25 (İ)	22	25 (İ)	22	25(İ)
İletkenlik (20 ºC’de) (µS/cm)	1000		1000		1000	
Koku (25 ºC’de seyrelme faktörü)	3		10		20	
Nitrat (mg NO3/L)	25	50 (İ)		50 (İ)		50 (İ)
Florür (mg F/L)	0,7-1	1,5	0,7-1,7		0,7-1,7	
Alüminyum (mg Al/L)	0,3		0,3		1	
Çözünmüş demir (mg Fe/L)	0,1	0,3	1	2	1	
Mangan (mg Mn/L)	0,05		0,01		1	
Bakır (mg Cu/L)	0,02	0,05 (İ)	0,05		1	
Çinko (mg Zn/L)	0,5	3	1	5	1	5
Bor (mg B/L)	1		1		1	
Kobalt (mg Co/L)	0,01		0,02		0,2	
Nikel (mg Ni/L)	0,02		0,05		0,2	
Arsenik mg As/L	0,01	0,05		0,05	0,05	0,1
Kadmiyum (mg Cd/L)	0,001	0,005	0,001	0,005	0,001	0,005
Toplam krom (mg Cr/L)		0,05		0,05		0,05
Kurşun (mg Pb/L)		0,05		0,05		0,05
Selenyum (mg Se/L)		0,01		0,01		0,01
Civa (mg Hg/L)	0,0005	0,001	0,0005	0,001	0,0005	0,001

Çizelge 3.4. (devam) Su kalite standartları ve sınıflandırması [46]

	A1 K	A1 Z	A2 K	A2 Z	A3 K	A3 Z
Baryum (mg Ba/L)		0,1		1		1
Siyanür (mg Cn/L)		0,05		0,05		0,05
Sülfat (mg SO4/L)	150	250	150	250 (İ)	150	250 (İ)
Klorür (mg CI/L)	200		200		200	
Anyonik yüzey aktif maddeler (Metilen mavisine aktif maddeler; MMAM) (mg MMAM/L)	0,2		0,2		0,5	
Reaktif fosfor (Ortofosfat ve kolay hidroliz olabilen kondanse fosforlar) (mg P/L)	0,4		0,7		0,7	
Fenoller (mg C6 H5OH/L)		0,001	0,001	0,005	0,01	0,1
Hidrokarbonlar (mg/L)		0,05		0,02	0,5	0,1
Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (mg/L)		0,0002		0,0002		0,001
Toplam pestisit (mg/L)		0,001		0,0025		0,005
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (mg O2/L)	15		30		40	
Çözünmüş oksijen doygunluk oranı (%)	>70		>50		>30	
Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ5) (Nitrifikasyon prosesi engellenmiş) (mg O2/L)	<3		<5		<7	
Toplam kjeldahl azotu (mg/L)	1		2		3	
Amonyak azotu (NH3-N) (mg N/L)	0,05		1	1,5	2	4 (İ)
Toplam organik karbon (TOK) (mg C/L)	5		8		12	
Toplam koliform (37 ºC'de) (EMS/100 mL)	50		5000		50.000	
Fekal koliform (EMS/100 mL)	20		2000		20.000	
Fekal streptokok (EMS/100 mL)	20		1000		10.000	
K: Kılavuz değer, Z: Zorunlu değer; İ: İstisnai iklimsel ya da coğrafik şartlar						

Çizelge 3.4'de verilen değerlere göre mevcut kalite kategorileri ve içme suyu arıtma prosesleri aşağıdaki gibidir;

1) A1 Kategorisi: Öncelikle fiziksel arıtma ardından dezenfeksiyon uygulanarak içilebilir,
2) A2 Kategorisi: Önce fiziksel arıtma, ardından kimyasal arıtma işlemi sonrasında dezenfeksiyon ile içilebilir,
3) A3 Kategorisi: Önce fiziksel arıtma işlemi ardından ileri kimyasal arıtma işlemi ve deenfeksiyon ile içilebilir [46].

Yukarıdaki gruplandırmaya göre belirlenen içme suyu için nihai olarak İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik ile belirlenmiş olan içme suyu standartlarını sağlaması esastır. Bu sınıflandırma yapıldıktan sonra elde edilen sonuca göre A1 ve A2 kategorisi için suların arıtılarak içilebilir ve kullanılabilir hale getirilmesi ile ilgili kriterler için özel hüküm gerekiyorsa bunun belirlenme sorumluğu İlgili Bakanlık sorumluluğundadır. Üçüncü kategori için yani A3 kategorisinde yer alan içme suyu veya kullanma suyu için ilgili Bakanlık hüküm belirler ve buna göre ekstra çalışma yapar veya yaptırılmasını sağlar. Bu hükümler doğrultusunda yapılacak ve uygulanacak analiz ve metodolojiler zorunlu (Z) ve/veya kılavuz (K) değerlerine göre tespit edilecek ve tüm değerler için ulusal ve uluslararası standartlara göre analiz edilecektir [46].

Bu kapsamda, İçme suyu ve kullanma suyu için yıllık bazda alınacak numune ve analiz sıklığı nüfusun miktarı ile değişmektedir. Bu oran ve numune alma sıklığı nüfusu 100.000'den küçük kentler için yıllık en az dört kez, nüfusu 100.000'den büyük olan kentler için ise yıllık minumum on iki olması gerekmektedir. İlgili Yönetmelik gereğince numune alma, analiz metotları ve analiz sıklıkları ile ilgili esaslar kısmında, içme ve kullanma suyu için numune alma şekli ve sıklığı aşağıdaki kritelere göre uygulanmalıdır;

1) Alınacak numune sıklığı olabildiğince yıla yayılmalıdır. Böylelikle farklı zamanlarda farklı numuneler alınarak parametreler objektif olarak görülebilecektir.
2) Arıtma tesisine gönderilecek numunelerin alındıkları noktanın kalitesini temsil etmesi,
3) Analiz yapılacak deney muhafazalarının, taşınma, bekleme, ve hazırlanma safhalarının analiz sonuçlarına etki etmeyecek şekilde planlanması ve zaman olarak en kısa sürenin belirlenmesi önemli bir konudur ve bu süreçler ve deneyler için TS ISO 5667-1, 3, 6, 9, 14 ve TS EN ISO 19458 nolu standartların uygulanması gerekir [46].

3.1.3. Arıtılmış içme suyu kalitesi

Ulusal ve Uluslararası kriterlere göre Arıtılmış suyun kalitesinin tespiti yapılabilmektedir. Ülkemizde yüzeysel suların arıtılması ve içme suyu olarak kullanılabilirliğinin tespiti için özelliklede arıtılmış su için ilgili mevzuata uygun gereksinimine bakılır. Ülkemiz için bu gereksinim 07.03.2013 tarihli ve 28580 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanarak yürürlüğe giren İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmeliktir. Bu yönetmelik çerçevesinde suyun analizi yapılarak uygulanacak iş ve işlemler tespit edildikten sonra halka arzı sağlanır. Özellikle burada dikkat edilmesi gereken husus insan sağlığı açısından çok önemli bir yere sahip olduğu direk halk sağlığını etkilediği için yapılacak analizlerin özellikle akredite olmuş laboratuvarlarda analizlerin yaptırılmasının sağlanması hususudur [48].

- ✓ Analiz sonucu Çizelgeleri özellikle suyun alındığı lokal bölgelere göre ayrı Çizelgeler halinde verilmelidir.
- ✓ Suların analiz Çizelgelerinde özellikle denge indeksi metoduna dikkat edilmesi oksidasyon, kabuklanma ve benzeri özellikler bu analiz Çizelgelerinda ayrı ayrı gösterilmelidir. Duruma göre önleyici önlemler kapsamında muhafaza borusu ve filtre malzemesi ile pompaların seçiminde farklı önerilerde bulunulabilir.
- ✓ Özellikle suyun inşaat yapılarında ve mekanik teçhizatlarla olan münasebetinin ne aşamada olduğunun tespiti için yeraltı suyu değerleri laboratuvarında analizler yapılmalıdır [48].

3.2. İçme Suyu Arıtımında Kullanılan Metotlar ve Prosesler

Günümüz koşullarında yeryüzünde mevcut tatlı su kaynaklarından doğrudan içilebilir su temin etmek bazı bölgeler hariç pek mümkün değildir. Çok nadir de olsa bazı bölgelerden elde edilmesine karşın özellikle sanayi ve endüstriyel bölgelerde bulunan su kaynaklarından arıtılmadan su temini neredeyse imkânsızdır. Bu yüzden mevcut su kaynaklarından içme suyu temin etmek amacıyla arıtma işlemi uygulanması gerekir. Mevcut kaynaklardan su temin edilebilmesi için özellikle 3 temel esas üzerinde durulması öngörülmektedir: Suyun fiziksel olarak istenilen seviyede olması, içerisinde hastalık yapabilecek zararlı maddelerden arındırılması, virüs ve bakteri şeklinde insan sağlığını doğrudan etkileyecek mikrop ve benzeri organizmalardan bertaraf edilmesi hususları. İçilebilir suyun en önemli kriteri arıtılmış su kalitesinin TSE Standartlarında göre TS 266' daki parametrelere sahip olması

gerekmektedir. Genel olarak içme sularının arıtma prosesleri havalandırma, dezenfeksiyon, yumaklaştırma, çöktürme, filtrasyon ve son olarak dezenfeksiyon prosesleridir [46]. Kentlerde ve yaşam alanlarında mevcut içme suyu şebeke sularının kalitesi insan sağlığı açısından çok önemlidir. İçme ve kullanma suyunun kirli olması salgın hastalıklara sebep olarak halk sağlığını direk etkilemektedir. Bundan dolayı suyun mikrobiyolojik olarak istenilen düzeyde olabilmesi amacıyla genellikle içme ve kullanma suyuna klor katılmaktadır [52].

Su içerisindeki hastalık yapabilecek bakteri mikroorganizma ve benzeri istenmeyen maddelerin sudan bertaraf edilmesi için uygulanan kimyasal ve fiziksel metotların toplamına dezenfeksiyon denilmektedir. Bu metot ile su içerisindeki istenmeyen maddeler mikro organizmalar parazitler sudan atılır. Suyun içerisindeki negatif unsurlar bunlar bakteri parazit ve benzeri maddeler Dezenfeksiyon ile insan sağlığının etkilemeyecek seviyeye çekilir. İçme ve kullanma suyu dezenfektan metotları genellikle klorlama, klor oksit kullanımı, kireç, iyot, $KMnO_4$, ozonlama, ve ultraviyole ışınlama olarak yapılır [53].

İçmesuyu arıtma tesisisin seçimi için su kaynaklarının özellikleri büyük önem arz etmektedir. Su kaynağın özelliği arıtma prosesinin projelendirilmesinde en önemli belirleyici etkendir. İşletme ve yatırım maliyetleri parametreleri bu su kaynağın doğru seçimi ile doğrudan bağlantılıdır. Tesislerin işletme ve yatırım maliyetlerinin düşük olabilmesi su kaynaklarının doğru belirlenmesi ile mümkündür [46].

İçme ve kullanma suyu için seçilecek kaynak araştırılırken en çok dikkat edilmesi gereken parametreler suyun niceliği, niteliği, kaynağa olan uzaklık, arıtma prosesleri, mevsimsel değişilikler gibi unsurlar iyi analiz edilmelidir. Burada en çok dikkat edilmesi gereken husus suyun hacimsel olarak karşılığının parasal değeri ve en optimal sonucun bulunmasıdır. Optimzasyon çalışması yapılarak en uygun şartlar ve maliyet bulunarak arıtma prosesi projelendirilir [54].

İçme suyu ve kullanma suyunun arıtılma nedenleri aşağıdaki başlıklar altında toplayabiliriz [54]:

- ✓ Suyun renginin, kokusunun ve bulanıklığının istenilen seviyeye getirilmesi,
- ✓ İçme Suyu içerisindeki istenmeyen mikropların bertaraf edilmesi,

- ✓ Su içerisindeki maddelerin (Fe, Mn, NH4) insan sağlığına zararlı olmayacak seviyelere çekilmesi,
- ✓ Su içerisindeki O_2 miktarının artırılması,
- ✓ Suyun mevcut içilebilir su sıcaklığına indirilmesi ve/veya çıkarılması,
- ✓ Suyun pH değerinin düzenlenmesi,
- ✓ Suyun sertlik derecesinin ayarlanması,
- ✓ Su içerisindeki korozyon etkilerinin düzenlenmesi,
- ✓ Su içerisindeki kimyasal maddelerin özellikle zararlı olanların bertaraf edilmesi.

3.2.1. İçme suyu arıtma prosesleri

İçme ve kullanma suyu insan sağlığı ile doğrudan etkili olduğu için çalışmalarda titizlikle üzerinde durulmalı ve mevzuatsal gereklilikler kesinlikle yerine getirilmelidir. Ulusal ve Uluslararası kriterlere mutlak surette uyulmalıdır. Suyun içerisinde özellikle zararlı mikroorganizmaların bertaraf edilmesi büyük önem arz etmektedir. Dezenfeksiyon ile bu mikroorganizmalar suyun içerisinden arındırılması en önemli unsurdur. Bu kapsamda prosesler belirlenirken bu hususa dikkat edilmeli ve tesis buna göre dizayn edilmelidir [48].

İçme suyu sağlamak maksadıyla kullanılan başlıca prosesler; havalandırma, hızlı karıştırma,

yumaklaştırma, çöktürme, filtrasyon ve dezenfeksiyondur. İçme suyu ve kullanma suyu arıtımında kullanılan aşamalar ve düzenlemeler ve Çizelge yöntemlerinde kullanılan prosesler için kullanılan yöntem ve özellikleri Çizelge 3.5'de görülmektedir [54].

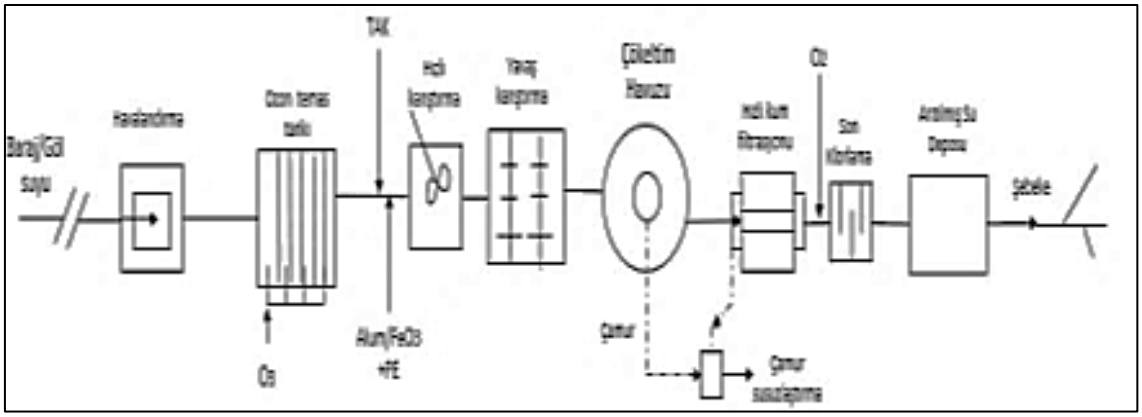
Çizelge 3.5. Küçük yerleşim yerleri içme suyu arıtılmasında kullanılan yöntemler [54]

Amaç	Yöntem	Gereksinimler	Açıklama
Bulanıklığın giderimi	Değiştirilebilir ince filtreler, ince filtrelerin geri yıkanması ve membran filtreler	Bulanıklık <1,0 NTU veya <0,2 NTU ise Dezenfeksiyon işlemi	-
Kısmi yumuşatma	İyon değiştiriciler	Kalıntı kalsiyum konsantrasyonu ≥1,5 mmol/L	Aşındırıcı özellikler dikkate alınmalıdır.

Çizelge 3.5. (devam) Küçük yerleşim yerleri içme suyu arıtılmasında kullanılan yöntemler [54]

Amaç	Yöntem	Gereksinimler	Açıklama
Artan sertlik	Uygun filtre malzemeleri ile filtrasyon, gerekirse CO_2 ilavesi	Alkalinite en az 1,5 mmol/L	Deniz suyu arıtımından sonra
Adsorpsiyon	Granüler aktif karbon	Arıtılan suya bağlı olarak zamanla değiştirilmelidir.	-
pH değerinde artış	Kalsiyum karbonatla reaksiyon filtrasyonu	pH≥ 7,7	Deniz suyu arıtımından sonra
Dezenfeksiyon	Hipoklorit, klor dioksit, UV radyasyonu,ozon	Maksimum dezenfektan konsantrasyonu ve dezenfeksiyon yan ürünü dikkate alınmalı	-
Termal dezenfeksiyon	Sürekli akışlı su ısıtıcı (gaz veya elektrikle)	en az 70 °C ve > 3 dakika temas süresi	-

İçme suyu arıtılmasında kullanılan prosesler için İstanbul Su Kanalizasyon İdaresi bünyesindeki örnek bir tesis Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Şekilde görüleceği üzere prosesler başlıca, havalandırma, karıştırıcı, ozon temas tankı, çökeltim havuzu, filtrasyon ve klorlamadan oluşmaktadır. İçme suyu bu proseslerden geçtikten sonra şehir şebekesine verilerek kullanıcılara sunulmaktadır [46].



Şekil 3.2. Örnek su arıtma prosesleri (İSKİ tarafından kullanılmaktadır) [46]

3.2.2. Havalandırma işlemi

İçme suyu proseslerinden en önemli aşamalardan bir tanesi Havalandırma prosesidir. Havalandırma prosesinde amaç içme suyu ile oksijeni buluşturarak suyun içerisindeki organik maddelerin sudan ayrışmasını sağlamaktır. Aslında işlem basit ve uygulanabilir işlem olup suyun oksijen ile temas etmesi sonucunda demir mangan gibi maddeler sudan ayrışması sağlanmaktadır. Ayrıca havalandırma ile suyun tat ve kokusunda negatif etkisi olan maddeler sudan uzaklaştırılır. Havalandırma işlemi 4 farklı metot ile yapılmakta olup en yaygın olanı kaskat havalandırmadır. Diğer havalandırma prosesleri, cazibeli havalandırma, difüzörlü havalandırma, mekanik havalandırma ve basınçlı havalandırma olmak üzere 4 farklı metod ile yapılır. olarak dört ana başlıkta toplanabilir. Bu işlemde 10-30 m^3 / m^2 saat yükünde 1-3 m aralığında yük kaybı meydana gelebilmektedir. Bu yük kaybı sınırlar içerisinde değilse basınçlı hava uygulanması gerekir [46, 47, 48].

3.2.3. Hızlı karıştırma ve yumaklaştırma işlemi

İçme Suyu arıtma proseslerinden en önemli aşamalarından biri de Hızlı karıştırma ve yumaklaştırma aşamasıdır. Bu proseste özellikle renk ve bulanıklık ile askıda katı madde giderilme işlemi gerçekleştirilmektedir. Proses işlemi içme suyu olarak kullanılacak suyun içerisine koagülant eklenerek su içerisinde floklar oluşturularak bunlara tutunan kirleticilerin çökmesi sağlanarak filtre işlemiyle sudan ayrışması sağlanır. Bununla beraber bu ve bundan sonraki aşamalarda Fe ve Al sudan ayrıştırılması sağlanmaktadır. Çökeltme işleminin yanı sıra bu proseste yüzdürme işlemi de uygulanabilir. Koagülant malzemesi olarak Alüminyum sülfat ve demir sülfat proseslerde tercih edilmektedir [46, 47, 48].

Bu proses sırasında floklar koloidallere tutunarak arıtma aşamasında bu ünitelerde giderilebilmektedir. İçme suyu içerisindeki bakteri ve mikroplarda bu aşamada giderilir. Koagülant maliyeti suyun dozajlanmasına bağlı olarak değişeceğinden uygun dozda suya verilmelidir. Dozajlamada dikkat edilecek hususların başında ihtiyaç olan doz miktarının belirlenmesi konusudur. Bu proses renk ve bulanıklığın önlenmesinde çok etkili bir yöntem olmasına karşın arıtma işlemi esnasında balçık oluşturma riskinden dolayı bazen arıtma işlemi için alternatif metotların kullanılması da düşünülebilir. Bu prosesde kullanılan Farklı koagülant malzeme ve kimyasallar Çizelge 3.6'da verilmiştir [46].

Çizelge 3.6. Hızlı karıştırma ve yumaklaştırma proseslerinde kullanılan kimyasallar [46]

Koagülant	Yardımcı Koagülant	pH Ayarlama
Alüminyum sülfat [$Al_2(SO_4)_3$]	Kalsiyum oksit (CaO)	Hidroklorik asit (HCl)
Demirklorür ($FeCl_3$)	Poliakrilamid $(C_3H_5NO)n$	Sülfürik asit (H_2SO_4)
Demirsülfat [$Fe_2(SO_4)$]	Sodyum silikat (Na_2SiO_3)	Sodyum hidroksit (NaOH)
Alüminyum klorhidrat [$AlCl(OH)_3$]	-	Sodyum karbonat (Na_2CO_3)
Poli alüminyum klorür [Aln(OH)mCl(3n-m)]	-	Sodyum bikarbonat($NaHCO_3$)
Poli alüminyum silikasülfat $Na_{12}(AlO_2)(SiO_2)12xH_2O$	-	Kireç [$Ca(OH)_2$]
Sodyum aluminat ($NaAlO_2$)	-	Sodyum silikat (Na_2SiO_3)

3.2.4. Çöktürme işlemi

Bu proses kapsamında suyun içerisindeki bulanıklık ve katı maddelerin dibe çökmesi sağlanarak suyun bulanıklığı ve katı maddelerden arındırılması sağlanır. Çökertme işlemi için suyun optimal bir hızda olması gerektiğinden çökertme havuzları su hızlarını minimize edecek şekilde dizayn edilmelidir. Tasarımlar yapılmadan önce basit çöktürme testleri uygulanır ve havuzlar bu deney sonuçlarına göre dizayn edilir. Tasarımlar genellikle uzunluk en oranı ikiye bir veya beşe bir şeklinde olur. Su alma ve suyun deşarj kısımları havuzun zıt iki yanına konulacak şekilde dizayn edilmelidir. Su alma yapısı suyun çökeltme ünitesine usulca alınmalı ve hız olabildiğince düşük olmalıdır. Suyun hızının yavaşlatılması amacıyla tankın içine perdeler konulabilir. Su deşarj kısmı suları toparlayacak şekilde suyun yavaş deşarj olmasını sağlayacak şekilde olmalıdır. Su çökertme havuzları olası pislenme durumuna karşın korunaklı olmalı ve tankın üst kısmı açık olmayabilir. Su az olduğu durumlarda tankların hijyenliği sağlanmalıdır. Bu temizleme işlemi yılda en az bir kez yapılması uygundur [46, 47, 53].

3.2.5. Filtrasyon

Bu proses kapsamında suyun bulanıklığının giderilmesinin yanında suyun içerisinde bulunan taneli yapılar zeminde bulunan kum ve kaya parçacıklarının arasından geçerken eliminasyon yapılır. Kum taneleri arasında sızan su ile partiküller ayrılarak suyun içerisindeki askıda kalan maddelerin ayrışması sağlanır. Bu proses içerisinde ayrıca demir mangan ve amonyum oksidasyon işlemi de gerçekleşir. Filtrasyon prosesi iki farklı yapıda tasarımı yapılabilir. Bunlardan bir yavaş kum filtresi diğeri ise hızlı kum filtresidir. Aralarındaki farklılık sadece hız odaklı olmayıp yavaş kum filtresi biyolojik esasa dayalı iken hızlı kum filtresi işlemi fiziksel bir filtrasyondur [46, 47, 48].

3.2.6. Dezenfeksiyon

İçme ve kullanma suyu proseslerinin en önemli adımlarından biridir. Bu proses suyun içerisinde insan sağlığını etkileyecek maddelerin bertaraf edildiği safhadır. Halk sağlığını etkileyecek bakterilerin virüslerin ve mikroorganizmaların bu proses ile sudan arıtılır. Diğer proseslerde suyun içerisindeki büyük partiküllü maddeler sudan arındırılırken bu safhada kimyasal olarak su içerisinden zararlı maddelerin arındırılması sağlanır. Dezenfeksiyon prosesinde çeşitli metodolojiler kullanılmaktadır. Literatür çalışmasında da görüleceği üzere dezenfeksiyon işleminde öne çıkan metotlar klorlama, ultraviyole ışınlama ve ozonlamadır. Bu tez çalışmasında bu üç metot üzerinde durulacak ve karşılaştırma yapılacaktır [46, 47, 48].

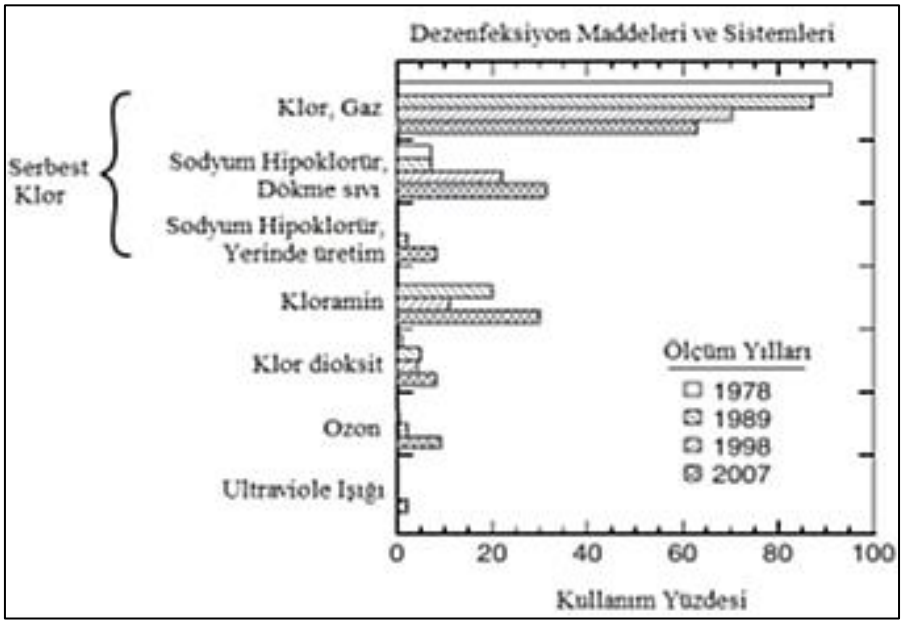
3.3. İçme Suyu Dezenfeksiyon Yöntemleri

İçme Suyunun Dezenfeksiyon işlemi genel olarak 3 ana başlıkta açıklanır. Bunlar;

1) Klorlama yöntemi,
2) Ultraviyole Işınlama (UV) yöntemi,
3) Ozonlama yöntemidir.

Bu metotlardan klorlama ve ozonlama işlemleri kimyasal oksidasyon ile dezenfeksiyon yaparken Ultraviyole ışınlama yöntemi ile elektromanyetik ışınlama kullanılarak su dezenfekte edilmektedir. ABD’de kullanılan dezenfeksiyon yöntemleri ve içeren maddelere

bakıldığında en çok riayet edilen metodun klorlama olduğu dikkat çekmektedir. En sık kullanılan dezenfektan malzemesi ise serbest klor olduğu Şekil 14 de görülmektedir [56].



Şekil 3.3. Dezenfeksiyon için kullanılan kimyasallar [56]

Şekil 3.3 incelendiğinde yıl bazında kullanılan dezenfektan metotlarının nasıl değiştiği görülecektir.1978 yılında kullanılan dezenfektan malzemelerinin % 91' i gaz klor ve % 7'si sodyum hipoklorit (çamaşır suyu) iken 2008 yılına gelindiğinde bu oranların düştüğü görülecek ve ozonlamanın dezenfektan olarak kullanımın arttığı gözlenecektir [56].

3.3.1. Klorlama ile dezenfeksiyon

İçme suyu dezenfeksiyon yöntemlerinden biri de klorlama yöntemidir. Klorlama yönteminde klor ve bileşiklerinden faydalanılır. Günümüzde en çok kullanılan klorlama metotlardan klor gazı ve sıvı klor öne çıkmaktadır. Klor ve bileşiklerinden yapılan bu dezenfektan işlemi mükemmel performans alınamamasına karşın literatürde kullanılan en yaygın metottur. Klorlama metodunun diğer dezenfektan metotlarından bazı farklılıkları vardır. Bunlar;

- ✓ UV ışınlama ve ozonlamaya göre antiseptik özelliğinin üst düzeyde olması,
- ✓ Uzun su dağıtım şebekelerinde diğer metotlara göre dayanımları iyidir,

- ✓ En önemli farklılığı su şebekelerinde dağıtımdan sonra ölçüm kolaylığı ve izlenebilir olması,
- ✓ Besleme teçhizatlarının yalın, nitelikli olmaları, pahalı olmamaları ayrıca küçük merkezi yerlerinde kullanılabilir ve karmaşık olmayan teknolojilere sahip olmaları,
- ✓ Klor ve klor bazlı bileşiklerin hemen hemen her ülkede rahatlıkla bulunabilmesi ve ekonomik olmalarıdır [46, 47, 48, 53].

3.3.2. Ultraviyole (UV) ile dezenfeksiyon

İçme ve kullanma suyu dezenfektan metotlarından biri UV radyasyonu ile su arıtma işlemidir. Bu işlem ile suyun içerisine UV ışınları absorbe edilir. Bu sayede suyun içerisindeki mikrobiyolojik organizmalar UV ışınlarına maruz kalarak suyun içerisinde dezenfekte olurlar. Bu yöntemin en avantajlı yanı suyun içerisine hızlı bir şekilde nüfus etmesi ve işlem sonrasında ardında herhangi bir kalıntı bırakmamasıdır. Dezenfektanlar için şu söylenebilir; İkincil dezenfeksiyon bakiyesi bırakan metotlar daha uygundur. Bu açıdan bakıldığında UV sistemi uygun bir metot olarak gözükmemektedir [46, 47, 53].

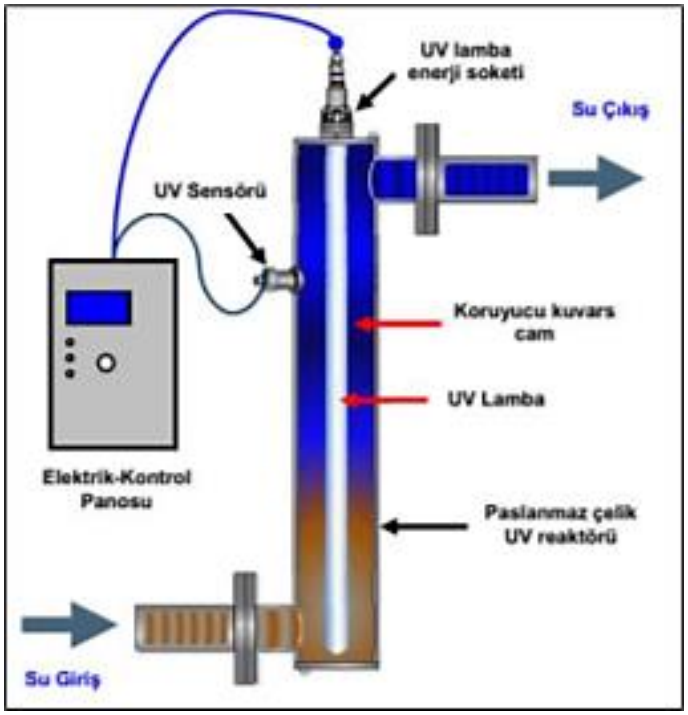
Diğer metodolojilerde suyun dezenfeksiyonu kimyasal yollarla yapılırken bu sistemde dezenfeksiyon tamamen fotokimyasal yoluyla yapılmaktadır. Fotokimyasal metod ile mikroorganizmaları bir reaksiyon ortamı oluşturarak UV radyasyonu, hücre fonksiyonlarını değiştirerek mikroorganizmaları etkisiz hale getirir. UV ışınları mikroorganizmanın hücre yapısını bozar ve hücre için hayati önem taşıyan nükleik asit ile tepkimeye girerek hücrenin deformasyonuna sebep olur. UV ışınları bazı bakteri ve organizmalara zarar veremeyebilir. Genellikle bu durum karanlık ve az ışık alan ortamlarda meydana gelir. Uygun dezenfeksiyonun sağlanabilmesi için UV ışınlarının organizmaya ulaşması ve bu ışınların yeterli enerjiye sahip olması gerekmektedir [60].

Elektromanyetik boyuna sahip UV ışınları, X-ışınları ve dalga boyu görünür ışık aralığında 100 ile 400 nm arasında olması gerekmektedir. Mikroorganizmaları bertaraf edebilmesi için UV ışınlarının aralığı 245 ile 285 nm arasında olmak zorundadır [60].

İçme suyu dezenfeksiyonunda kullanılan bir UV sistemi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

Burada;

1) UV lambalarını,
2) UV lambalarını çevreleyen şeffaf kuvarz kolunu,
3) Lambaları ve kolları sabitleyen düzenek,
4) Güç kaynağını,
5) UV dozu izleme sensörleri,
6) Kuvars kollarının şeffaflığını korumak için kullanılan temizleme sistemini içerir [60].



Şekil 3.4. Su dezenfektanı olarak kullanılan bir UV cihazı [60]

Dezenfektan olarak kullanılan maddelerden Ozon, klor ya da klor dioksitle mukayese edildiğinde diğerlerine göre daha etkili bir dezenfektan olduğu görülecektir. İçme suyu arıtımında klor ve klordioksitten daha fazla bakteri ve mikropları etkisiz hale getirdiği bilinmektedir [46].

3.3.3. İçme suyu arıtımında ozonlama prosesi

İçme ve kullanma suyu arıtımında Ozon etkin bir şekilde dezenfektan olarak kullanılmaktadır. Ozonun atmosferde bol miktarda bulunması dezenfektan olarak aktif kullanılmasını sağlar. Hava ortamında ağırdır ve beyaz ile mavi ton arasında bir renge sahip

reaktif ve kararlı olmayan bir yapıya sahip gazdır [57, 58, 59]. Ozon gazını muhafaza etmek zor olduğu için saklanması ve taşınması kolay değildir. Bu sebeple ihtiyaç olduğu yerde muhafaza edilmesi gerekir. Konsantrasyonu düşük yapıdayken toksit etkisi vardır. Atmosferde 5-10 ppm arasında bulunmakta yeryüzüne yansıyan 290-320 nm dalga boyları arasındaki ultraviyole ışınlarından canlılara zarar vermemesini sağlar [57, 59].

Ozon gazı literatürde O_3 olarak gösterilmekte ve 3 oksijen molekülünün birarada olması ile meydana gelmektedir. Üç oksijen molekülü biraraya gelen ozon gazı 2,07 V oksidasyon potansiyelinde allop yapıya sahip bir maddedir. Diğer maddelerle bir kıyaslama yapılırsa, hidrojen peroksitin oksidasyon enerjisinden 1,77 V fazla olduğu görülecektir. Ozon için yarı ömrüne bakıldığında 20 ºC'de 20 dakikadır. Ozon çözünürlüğüne bakıldığında sudaki çözünme ozon konsantrasyonu ve sıcaklık ile doğru orantılı olarak artmaktadır [62].

Havada ozon gazı üç O atomunun bir araya gelmesi ile oluşmuştur. Oksijen atomları arasındaki bağlar tekli ve ikili bağlardır. Tekli bağlar ikili bağlara göre daha zayıf bağlar olup çiftli bağlar reaktif özellikte değillerdir ancak tekli bağlar ikili bağlara göre daha zayıf ve serbest radikallerin oluşmasına sebep olurlar. Bu bağlar ile ilgili olarak Şekil 3.5'de ozonun rezonans yapısının nasıl olduğu görülebilir [63].



Şekil 3.5. Ozonun rezonans yapısı [63]

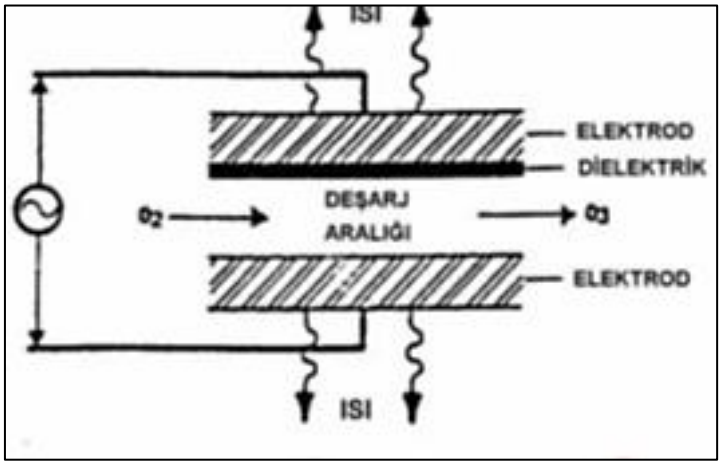
Ozon yapısı incelendiğinde ozonun oldukça kuvvetli bir oksidasyona sahip olduğu görülür. [61] Ozonun oksidasyon denklemi Eş 3.1 de verilmiştir.

$$O_2 + 2H^+ + 2eH_2O + O_2\, E_O = 2{,}07\ V \qquad (3.1)$$

Hidroksil radikalleri ile Ozon arasında bir kıyaslama yapıldığında görülecektir ki hidroksil radikalleri daha güçlüdür ve bundan dolayı ozon iyi oksitleyicidir ve bundan dolayı birçok oksidasyon işleminde ozon oksitleyici olarak aktif rol oynar [64].

Ozon gazı ile ilgili olarak birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalarda görüleceği üzere Ozon (O_3), oksijen (O_2) molekülünün ayrışması sonucu tekli oksijen atomlarına bölündükten sonra üçüncü oksijen atomu ile bir araya gelerek oluşmaktadır. Bu olayın oluşabilmesi doğal yollardan olabileceği gibi dış kaynaklı etkiler ile de ozon gazı meydana getirilebilir. Ozon gazı dışarıdan elektrik enerjisi verilerek, fotokimyasal etkileşimle ve benzeri yollarla oluşturulabilir. Doğadaki yıldırım düşmesi olayı da ozonun meydana gelmesini sağlayan doğa olayıdır [65].

Ticari amaçlı ozon üretimi için literatürde iki farklı metot kullanılmaktadır. Bunlardan biri UV Işınları ile elde edilen metodoloji bir diğeri ise koronadeşarj sistemidir. Ultraviyole ışınlarının değeri 185 nm olduğu aralık ozon oluşumu için uygun değerdir. Diğer metod ise iki yalıtkan plaka arasına uygulanan elektrik enerjisi ozonun oluşması sağlanmaktadır [66, 67]. Şekil 3.5'de korona deşarj metodu ile ozon üretimi sistemi gösterilmiştir [68].



Şekil 3.6. Korona deşarj metoduyla ozon üretimi [68]

Korona deşarj sistemi yalıtkan iki plaka arasına uygulanan yüksek voltaj ile ozonun oluşması sağlanmaktadır. Burada sistemin içerisine hava veya oksijen verilerek O_2, nin atomlarına ayrışması sonra birleşmesi sağlanmaktadır. Oksijen deşarj aralığından geçerken uygulanan yüksek voltaj sayesinde çıkışta ozona dönüşmesi sağlanmaktadır [66, 67].

Korona deşarj sistemi ilk olarak Siemens tarafından 19. yüzyılın ortalarında kullanılmaya başlanmıştır. Ozon jeneratörü kullanılarak yapılan çalışmalarda ozon üretimi yapılmış ve sistem içine kalay kaplanması yapılan bir cam tüp içerisine hava verilerek oluşturulan sistem ile ozon üretilmiş ancak soğutma sistemi kullanılmadığı için ozon tekrar bozulmaya

başlamıştır. Bu teknolojiye dışarıdan hava soğutması uygulanarak sistemin soğutulması sağlanarak ozonun bozulma oranının düşmesi sağlanmıştır [57].

Ozonun yüksek voltaj uygulanarak oluşturduğu parametrik denklem Eş. 3.2 ve Eş 3. 3'de verilmiştir.

$O_2 + e^-$ (yüksek enerji) $\longrightarrow$ $2O + e^-$ (düşük enerji) (3.2)

$O + O_2 \rightarrow O_3$ (3.3)

İçme suyu arıtımında ozonlamanın avantajları [69, 82]

- ✓ İçme suyu arıtımında kullanılan klor ve kloroksit malzemelerine nazaran daha oksitleyici özelliği daha fazladır.
- ✓ Dezenfektan olarak kullanılan Ozonun diğer dezenfektanlara göre etkinliği daha fazladır.
- ✓ Ozonlama ile yapılan su arıtımında yan ürünlerin oluşma miktarı diğer dezenfektanlara göre daha azdır.
- ✓ İçme suyu proseslerinde oluşan çamurlanma problemi bu sistemde oluşmaz.

İçme suyu arıtımında ozonlamanın dezavantajları [69, 82]

- ✓ Sistemsel olarak ilk yatırım maliyetlerinde diğer sistemlere göre daha maliyetlidir.
- ✓ İçme suyu arıtımında ozonlama prosesi komplike sistemlerde daha caziptir.Tek olarak kullanıldığında maliyet artar..
- ✓ Yüksek konsantrasyonlarda ozonlama metodunda ozon tüketimi artmakta bu da maliyeti artırmaktadır.
- ✓ Ozon kararsız olduğu için depo edilemez ve taşınamaz, yerinde üretilmesi gerekmektedir.

Ozon ile su arıtımı Avrupa'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında yaklaşık 1000'e yakın içme suyu arıtma tesisi ozon teknolojisini kullanmaktadır. İrlanda'da suyun arıtılması işleminde Granüler aktif karbon filtrasyonu ile birlikte mikroorganizmaların ve bakterilerin bertaraf edilmesi sağlanmaktadır [70].

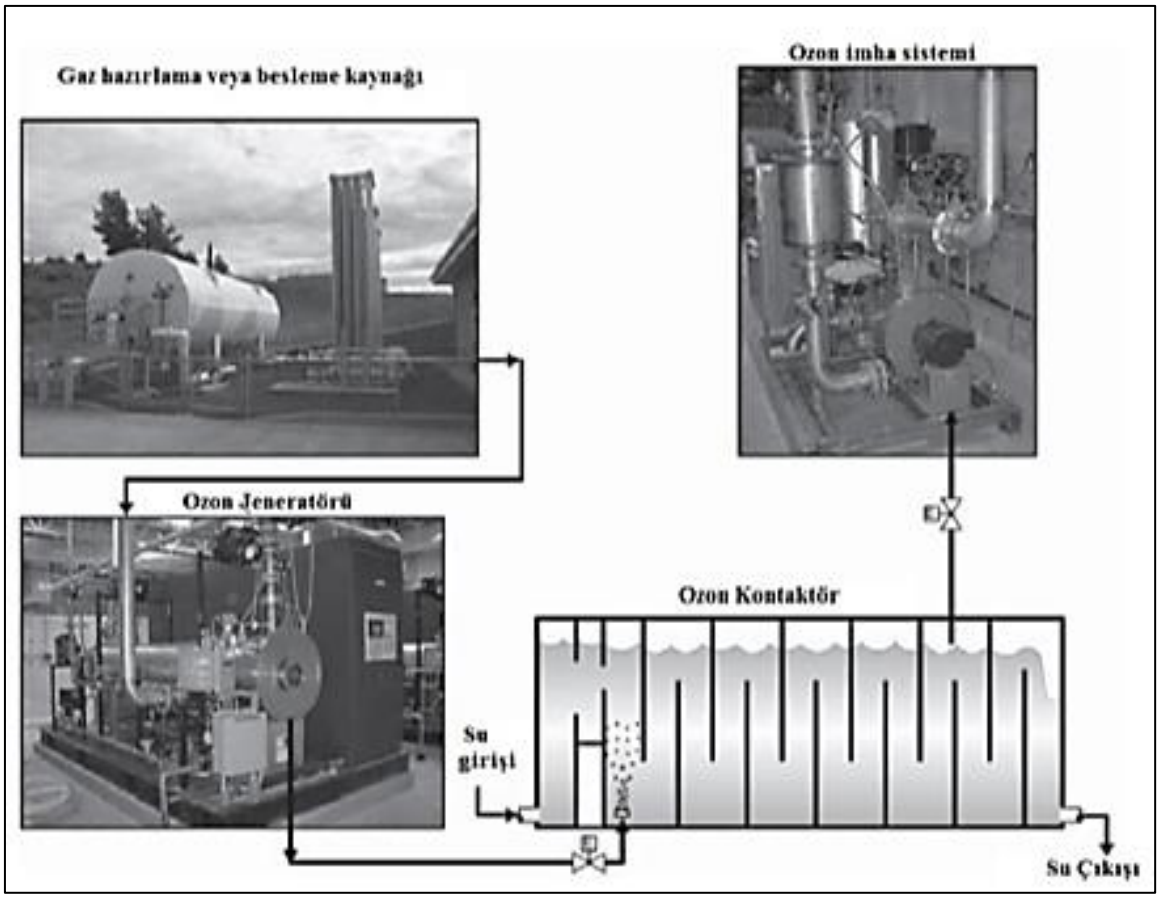
Özellikle birincil dezenfektan olarak kullanılan ozon ile klorun birlikte kullanıldığı sistemlerde mevcuttur. Ozon özellikle birincil dezenfektan olarak kullanılıyor ise en çok dikkat edilmesi gereken husus ozon temas tankının boyutlandırılması konusudur. Uygun boyutlandırma yapılmadığı taktirde suyun aktif olarak dezenfeksiyon yapılmasında işletme problemleri ile karşılaşılabilir. Bundan dolayı ozonun birincil dezenfeksiyon olarak kullanıldığı tesislerde ozon temas tankı projelendirilmesine önem verilmelidir [82].

Basit bir ozon jeneratörü tasarımı zıt yüklü iki levha arasında veya zıt yüklü plakalar arasından hava veya oksijen geçirilerek üretilir. Burada bazı uygulamalarda metal boruda kullanılabilir. Boru bir elektrik kaynağına bağlanarak içerisinden hava geçirilerek hava içerisindeki oksijenden ozon üretimi yapılarak suyun arıtılmasında kullanılır. Ozon jeneratörünün içerisinden geçen havanın nem mikarını düşürmek verimi artıracaktır.Ozon için kuru ve temiz hava tedariki jeneratör için harcanılan güce karşı ozon üretimini artıracaktır [70].

Ozon jeneratörü ile su arıtma için kullanılacak sistem esasen 5 ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar;

1) hava tedarik ünitesi,
2) ozon jeneratörü,
3) elektrik güç ünitesi,
4) kandaktör,
5) gaz çıkış mekanizmasıdır.

Ozon jeneratörü ile ilgili görsel Şekil 3.6’da gösterilmiştir [71].



Şekil 3.7. Ozon ile su arıtma sistemi (Black & Veatch Corporation 2010) [71]

3.4. Ozonlama İşleminde Etki Eden Parametreler

Bu bölümde içme suyu proseslerinden ozonlama prosesinde ozonlamaya etki eden parametreler yorumlanacaktır. Ozonlama işleminde etkili başlıca faktörler pH, sıcaklık, mekanik karıştırma, ozon dozajı ve süre olarak sayılabilir [72, 73].

3.4.1. pH faktörü

pH değeri Ozon ile doğrudan etkilidir. Özellikle yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere pH değeri 2 ve altında olduğunda Direkt Reaksiyon (Moleküler ozon), pH değeri 7 veya üzerinde olduğunda ise İndirekt Reaksiyon (Serbest radikal oluşumu) oluşumu gerçekleşir. Genel olarak; nötr pH değerlerinde ozonun çözünürlüğü düşük olacaktır. Yüksek pH değerlerinde ozon çok hızlı bir şekilde dekompoze olarak hidroksil radikali oluşturmasına vesile olur. Fakat hidroksil radikallerinin oksidasyon potansiyeli ozona göre daha yüksek olduğundan indirekt reaksiyonlarda oksidasyon daha hızlıdır. Hidroksil radikali 2.8 eV'luk

oksidasyon potansiyeli ile en kuvvetli radikal olsa da diğer hidroksilleride oluşmaktadır. [74, 75].

3.4.2. Sıcaklık faktörü

Sıcaklık ve ozonlama arasında da pH etkisinde olduğu gibi doğrudan bir etkileşme söz konusudur.Sıcaklık artıkça ozonun çözünürlüğünde düşme gerçekleşir. Bununla birlikte çözünürlüğün düşmesi nedeniyle ozonlama etkinliğinin azaldığı söylenemez çünkü sıcaklık artışı reaksiyon hızını da artırmaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında sıcaklığın artması ile ozonlamanın etkinliğinin azaldığı ancak ozonla temas süresi artırıldıkça ozonlama etkinliğinin alçak sıcaklıktaki değerlere yaklaştığı gözlenmiştir.Genel olarak artan sıcaklık birlikte ozonlamının arttığı görülmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında genellikle çalışmalar düşük sıcaklıklarda (20 °C) yapılmıştır. Arıtma suyu için bu sıcaklık uygundur ve suyun sıcaklığını yükseltmeye çalışmak maliyeti artıracaktır [76, 77].

3.4.3. Mekanik karıştırmanın etkisi

Ozonlama ve mekanik karıştırma arasında doğrudan bir etkileşim söz konusudur.Ozonlama ile suyun temas hali artırıldığı zaman arındırma etkinliğinin arttığı yapılan literatör çalışmalarında görülecektir.Özellikle karıştırıcı hızı artırıldığında etkinliğin arttığı ozonlama ile özellikle tekstil endüstrisinde kullanılan ozonlama ünitelerindeki renk giderimi prosesinin hızında artma olduğu görülmektedir. Yapılan bu çalışmalarda mekanik olarak bir rotor kullanıldığı zaman gaz fazından sıvı faza geçiş hızının arttığı ve kütle transfer parametresinin düştüğü çok net olarak görülmektedir [78, 79].

3.4.4. Ozon dozajı etkisi

İçme suyu arıtımında ve endüstriyel ozon dezenfeksiyon işlemlerinde ve proseslerinde ozon dozajının artırılması ozonlamanın etkinliğini doğrudan artırdığı yapılan literatür çalışmalarında görülmüştür.Dezenfektsiyon proseslerinde ayarlanabilir volumetrik sayaçlar ile yapılan doz artırımında suyun arıtılması ve istenilen arıtma değerlerine ulaşılması görülmüştür. Doz ve süre artırımı ile birlikte dezenfeksiyon işleminin etkinliğin artması prosesin başarısında etkin bir rol oynamaktadır [79, 80].

3.4.5. Ozonlama süresi etkisi

Çeşitli alanlarda yapılan birçok literatür çalışmasında ozonlama süresinin artırıldığında yapılan çalışma içerisindeki oksidasyonun arttığı ve dezenfeksiyon işleminin istenilen proses değerler içerisinde olduğu gözlenmiştir. Ozonlama işleminde süreler diğer parametreler sabit tutularak yapılan çalışmalarda görülecektir ki oksidasyon işlemi başarılı olmuştur. Bu çalışmalarda Ozon dozajı ya da ozonlama süresi attıkça ozonlama etkinliğinin arttığı tespit edilmiştir [78, 79, 80].

4. İÇME SUYU ARITMADA OZON GAZI KULLANIMININ DENEYSEL UYGULAMASI

Bu tez çalışmasında yöntem olarak, su arıtma sistemlerinden biri olan ozon kullanımı ile su arıtma verimi etkisi ve içme suyu kalitesi deneysel olarak incelenecektir.

İçme suyu arıtımında farklı prosesler kullanılmakta olup bu deney çalışmasında ozonlama yöntemi ile suyun arıtılması sağlanacaktır. Ankara ili sınırları içerisinde yer alan Çamlıdere ve Kesikköprü barajlarından alınan ham su ile kirli bir kaynaktan alınan kuyu suyu ozonlama tekniği kullanılarak arıtılacak, arıtılmış su örneklerinin deney sonuçları ASKİ laboratuvarlarında teknik analizleri yapıldıktan sonra ozonlama prosesi bu sonuçlara göre yorumlanacaktır.

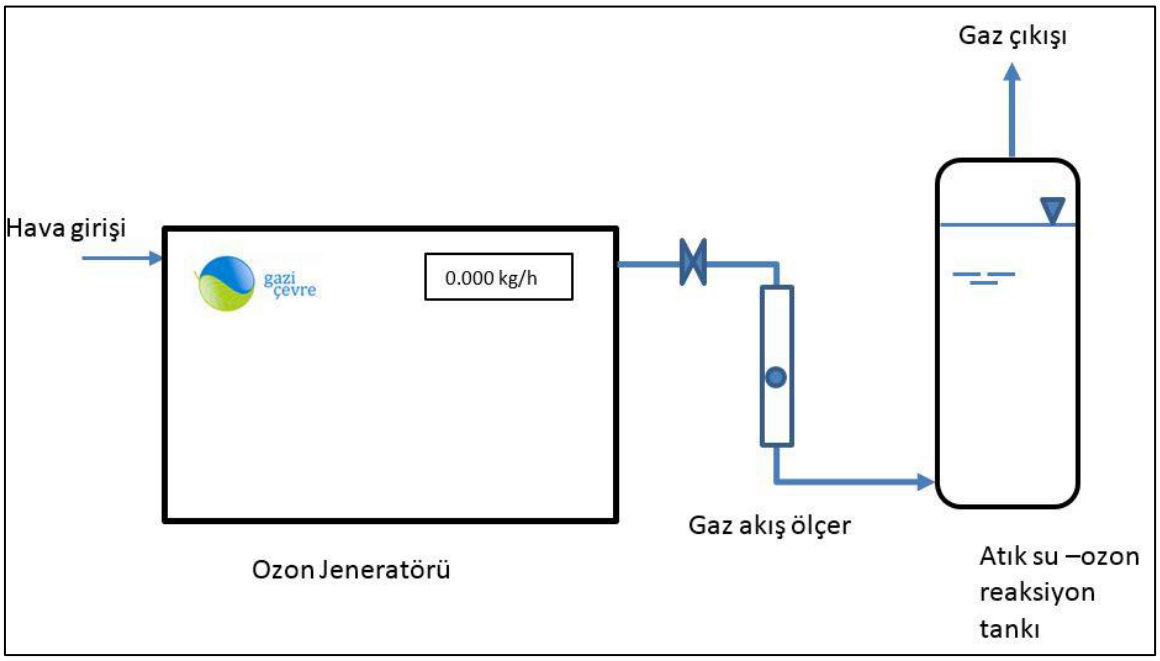
4.1. Deneysel Çalışmalar

Bir adet ozon jeneratörü su arıtma sistemi Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Isıl-Güç Laboratuvarına kurulmuştur. Bu çalışmada öncelikle amaç doğrultusunda Ankara Çamlıdere ve Kesikköprü barajlarından alınan ham su numuneleri ile kirlilik derecesi yüksek bir kuyudan alınan su numunelerinin analizleri yapılmıştır. Su numunelerinin kalitesi, TS 266 standartları ve İTASHY kriterlerine göre karşılaştırma yapılmıştır. Ozonlama ile su dezenfeksiyon işlemi genel olarak bir çok ülkede içme suyu arıtma süreçlerinde başarı ile kullanılmakta ve en çok tercih edilen yöntemlerin başında yer almaktadır. İçme Suyu arıtımında ozonlamanın etkisini görebilmek adına oluşturulan Deney düzeneği 6 farklı ekipmandan oluşmaktadır.

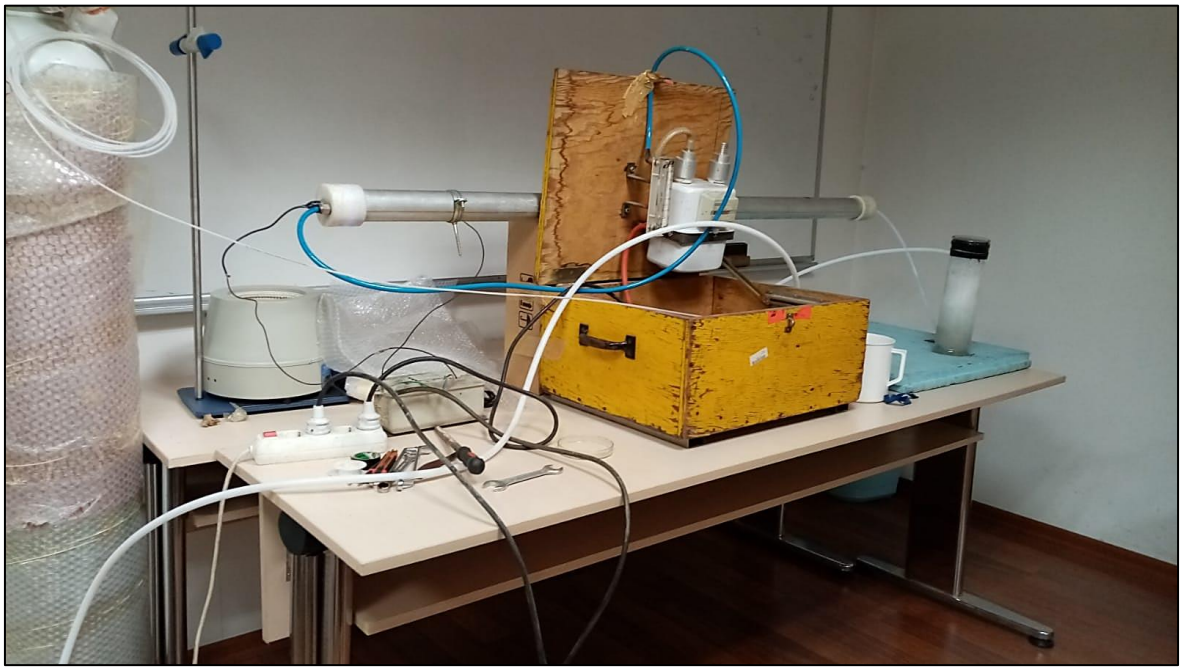
Bunlar;

1) Oksijen tankı,
2) Ozon Jeneratörü,
3) Ozon Jeneratörü enerji kaynağı,
4) Volumetre,
5) Pompa,
6) Su haznesidir.

Laboratuvar ortamında kurulmuş olan ozon jenaratörü içeren su arıtma deneysel düzeneği şematik gösterimi ara üniteleri ile birlikte Şekil 4.1'de fotoğrafı ise Resim 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1. Ozon jeneartörü içeren su arıtma deney düzeneği



Resim 4.1. Ozon ile su arıtma deney düzeneği

4.2. Deneysel Altyapı

Tez çalışmamız süresince deneylerimize yön veren ve deneysel altyapıyı oluşturan cihaz ve ekipmanlar aşağıda belirtilmiştir.

Ham su numuneleri

Bu tez kapsamında analiz edilecek sular iki farklı barajdan ve kuyudan alınarak deney sisteminde kullanılmıştır. Her iki barajdan Çamlıdere ve Kesikköprü Barajlarından ham su olarak 25'er L alınmış ve aynı gün içerisinde deneylerde kullanılmak üzere laboratuvarlara getirilmiştir. Deneylerde arıtılmak üzere barajlardan alınan su numuneleri ve kirli su Resim 4.2' de verilmiştir.



Resim 4.2. Çamlıdere ve Kesikköprü barajlarından alınan ham su ile kuyu suyu numuneleri

Deneylerde kullanılan malzemeler

Deney başlamadan önce deneyde kullanılacak malzemenin ihtiyaç listesi çıkarılmış ve Ankara İli Ostim Sanayi Bölgesinden bulunan teçhizat ve malzeme satışı yapan firmalardan satın alınarak temin edilmiştir. Tedarik edilen malzemeler Resim 4.3' de gösterilmiştir.



Resim 4.3. Deneylerde kullanılan malzemeler

4.3. Deney Programı

Deneylerin yapıldığı ortam sıcaklığı 22 ºC'dir. Deneylerde her iki barajdan alınan su ve kuyu suyu numuneleri için aynı süreler dikkate alınmış fakat ozon jeneratörüne verilen oksijen miktarı 10-15-20 L/dk arasında değişen değerlerde suya tatbik edilerek suyun arıtılmasında göstereceği değişkenlik araştırılmıştır.

Toplam 11 adet deney yapılmış ve bu deneylerden 4'ü Çamlıdere Baraj suyu, 3'ü Kesikköprü Baraj suyu, 4'ü kuyu suyunun arıtılmasını içeren deneylerdir.

Deneylere başlamadan önce, ASKİ laboratuvarında yapılan analiz sonuçları Çamlıdere Barajından alınan ham su verileri Çizelge 4.1, Kesikköprü Barajı ham su analiz sonuçları Çizelge 4.2'de, kuyu suyu kirli su analiz sonuçları ise Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.1. Çamlıdere barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Metot	Birim	Deney Sonucu	ITASHY
FİZİKSEL PARAMETRELER				
Koku	TS 266		TKEDY	
Sıcaklık	SM 2550 B	ºC	17,3	-
KİMYASAL PARAMETRELER				
Alüminyum (Al)	EPA 200.7	µg/L	1123,00	200

Çizelge 4.1. (devam) Çamlıdere barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Metot	Birim	Deney Sonucu	ITASHY
Amonyum (NH4)	TS EN ISO 14911	mg/L	< 0,10	0,5
Antimon (Sb)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	5
Arsenik (As)	EPA 200.7	µg/L	7,95	10
Bakır (Cu)	EPA 200.7	mg/L	0,003	2
Baryum (Ba)	EPA 200.7	mg/L	< 0,50	-
Bikarbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	105,00	-
Bor (B)	EPA 200.7	mg/L	0,028	1
Bromat		µg/L		10
Bromür		µg/L		-
Bulanıklık	SM 2130 B	NTU	6,80	1
Cıva	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	1
Çinko	EPA 200.7	mg/L	< 0,005	-
Çözünmüş oksijen		mg/L		-
Demir	EPA 200.7	µg/L	429,00	200
Elektriksel İletkenlik	TS 9748 EN 27888	mS/m	25,60	250
Florür (F)	SM 4110B	mg/L	0,11	1,5
Kadmiyum (Cd)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	5
Kalsiyum İyonu (Ca^{+2})	TS EN ISO 14911	mg/L	27,20	-
Karbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	< 10,00	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı		mg/L		
Klorür (Cl)	SM 4110B	mg/L	21,80	250
Kobalt (Cd)	SM 2320 B	mg/L	< 1,00	-
Koku				TKEDY
Krom (Cr)	EPA 200.7	µg/L	1,12	50
Kurşun (Pb)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	10
Lityum (Li)	TS EN ISO 14911	mg/L	< 0,10	-
Magnezyum İyonu (Mg)	TS EN ISO 14911	mg/L	6,40	-
Mangan (Mn)	EPA 200.7	µg/L	8,00	50
Nikel (Ni)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	20
Nitrat (NO3)	SM 4110B	mg/L	< 0,5	50
Nitrit (NO2)	SM 4110B	mg/L	< 0,05	0,5
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	TS 6288 EN ISO 8467	mg/L	5,30	5
pH	TS EN ISO 10523		7,70	6,5-9,5
Potasyum (P)	TS EN ISO 14911	mg/L	3,50	
Renk	SM 4110B	Pt-C0	10,00	TKEDY
Selenyum (Se)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	10
Sıcaklık		ºC	17,30	-
Silisyum Dioksit (SiO2)	EPA 200.7	mg/L	12,60	-
Sodyum (Na)	TS EN ISO 14911	mg/L	18,80	200
Sülfat (SO4)	SM 4110B	mg/L	8,90	250
Toplam Alkalinite	SM 2320B	mg/L	86,00	-
Toplam Azot		mg/L		-
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	SM 2540 C (SM-Checking Correction of Analyses)	mg/L	171,00	-
Toplam Sertlik (CaCO3)	SM 2340B	mg/L	94,00	-
Toplam Siyanür (T-CN)	TS EN ISO 14403-1	µg/L		

Analizler incelendiğinde Çamlıdere Barajından alınan ham su için bazı değerler;

- ✓ pH değeri 7,7,
- ✓ sıcaklık 17,3 ºC,
- ✓ bulanıklık 6,8 NTU,
- ✓ Sülfat (SO_4) 8,9 mg/L,
- ✓ Nitrat (NO_3) 50 mg/L,
- ✓ Amonyum (NH_4) değeri 0,5 mg/L' dir.

Çizelge 4.2. Kesikköprü barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Metot	Birim	Deney Sonucu	ITASHY
FİZİKSEL PARAMETRELER				
Koku	TS 266		TKEDY	
Sıcaklık	SM 2550 B	ºC	17,3	-
KİMYASAL PARAMETRELER				
Alüminyum (Al)	EPA 200.7	µg/L	15,00	200
Amonyum (NH4)	TS EN ISO 14911	mg/L	< 0,10	0,5
Antimon (Sb)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	5
Arsenik (As)	EPA 200.7	µg/L	11,6	10
Bakır (Cu)	EPA 200.7	mg/L	0,003	2
Baryum (Ba)	EPA 200.7	mg/L	< 0,50	-
Bikarbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	141,00	-
Bor (B)	EPA 200.7	mg/L	0,460	1
Bromat		µg/L		10
Bromür		µg/L		-
Bulanıklık	SM 2130 B	NTU	2,20	1
Cıva	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	1
Çinko	EPA 200.7	mg/L	< 0,005	-
Çözünmüş oksijen		mg/L		-
Demir	EPA 200.7	µg/L	65,00	200
Elektriksel İletkenlik	TS 9748 EN 27888	mS/m	186,80	250
Florür (F)	SM 4110B	mg/L	0,35	1,5
Kadmiyum (Cd)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	5
Kalsiyum İyonu (Ca^{+2})	TS EN ISO 14911	mg/L	129,00	-
Karbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	< 10,00	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı		mg/L		
Klorür (Cl)	SM 4110B	mg/L	315,00	250
Kobalt (Cd)	SM 2320 B	mg/L	< 1,00	-
Koku			-	TKEDY

Çizelge 4.2. (devam) Kesikköprü barajına ait su numunesi fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Metot	Birim	Deney Sonucu	ITASHY
Krom (Cr)	EPA 200.7	µg/L	1,30	50
Kurşun (Pb)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	10
Lityum (Li)	TS EN ISO 14911	mg/L	< 0,10	-
Magnezyum İyonu (Mg)	TS EN ISO 14911	mg/L	43,10	-
Mangan (Mn)	EPA 200.7	µg/L	8,00	50
Nikel (Ni)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	20
Nitrat (NO3)	SM 4110B	mg/L	< 0,5	50
Nitrit (NO2)	SM 4110B	mg/L	< 0,05	0,5
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	TS 6288 EN ISO 8467	mg/L	5,30	5
pH	TS EN ISO 10523		7,70	6,5-9,5
Potasyum (P)	TS EN ISO 14911	mg/L	3,50	
Renk	SM 4110B	Pt-C0	10,00	TKEDY
Selenyum (Se)	EPA 200.7	µg/L	< 1,00	10
Sıcaklık		ºC	17,40	-
Silisyum Dioksit (SiO2)	EPA 200.7	mg/L	12,6	-
Sodyum (Na)	TS EN ISO 14911	mg/L	18,80	200
Sülfat (SO4)	SM 4110B	mg/L	8,90	250
Toplam Alkalinite	SM 2320B	mg/L	86,00	-
Toplam Azot		mg/L		-
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	SM 2540 C (SM-Checking Correction of Analyses)	mg/L	171,00	-
Toplam Sertlik (CaCO3)	SM 2340B	mg/L	94,00	-
Toplam Siyanür (T-CN)	TS EN ISO 14403-1	µg/L		

Aynı analizler Kesikköprü Barajı için de yapılmış olup,

- ✓ pH değeri 7,8,
- ✓ sıcaklık 17,4 Co,
- ✓ bulanıklık 2,2 NTU,
- ✓ Sülfat (SO_4) 326 mg/L,
- ✓ Nitrat (NO_3) 0,93 mg/L,
- ✓ Amonyum (NH_4) 0,5 mg/L' dir.

Çizelge 4.3. Kuyu suyu numunesi fizikokimyasal özellikleri

Parametre	Metot	Birim	Deney Sonucu	ITASHY
FİZİKSEL PARAMETRELER				
Koku	TS 266		TKEDY	
Sıcaklık	SM 2550 B	ºC	19,00	-
KİMYASAL PARAMETRELER				
Alüminyum (Al)	EPA 200.7	µg/L	184	200
Amonyum (NH4)	TS EN ISO 14911	mg/L	0,27	0,5
Antimon (Sb)	EPA 200.7	µg/L	0,00	5
Arsenik (As)	EPA 200.7	µg/L	7,68	10
Bakır (Cu)	EPA 200.7	mg/L	0,003	2
Baryum (Ba)	EPA 200.7	mg/L	0,05	-
Bikarbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	120,00	-
Bor (B)	EPA 200.7	mg/L	0,14	1
Bromat		µg/L	0,00	10
Bromür		µg/L	73,00	-
Bulanıklık	SM 2130 B	NTU	8,40	1
Cıva	EPA 200.7	µg/L	0,00	1
Çinko	EPA 200.7	mg/L	0,29	-
Çözünmüş oksijen		mg/L	-	-
Demir	EPA 200.7	µg/L	36,00	200
Elektriksel İletkenlik	TS 9748 EN 27888	mS/m	105,10	250
Florür (F)	SM 4110B	mg/L	0,31	1,5
Kadmiyum (Cd)	EPA 200.7	µg/L	0,00	5
Kalsiyum İyonu (Ca^{+2})	TS EN ISO 14911	mg/L	67,20	-
Karbonat İyonu	SM 2320 B	mg/L	0,00	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı		mg/L	54	
Klorür (Cl)	SM 4110B	mg/L	167	250
Kobalt (Cd)	SM 2320 B	mg/L	0,00	-
Koku			-	TKEDY
Krom (Cr)	EPA 200.7	µg/L	4,33	50
Kurşun (Pb)	EPA 200.7	µg/L	0,00	10
Lityum (Li)	TS EN ISO 14911	mg/L	0,00	-
Magnezyum İyonu (Mg)	TS EN ISO 14911	mg/L	19,30	-
Mangan (Mn)	EPA 200.7	µg/L	3,00	50
Nikel (Ni)	EPA 200.7	µg/L	3,43	20
Nitrat (NO3)	SM 4110B	mg/L	2,40	50
Nitrit (NO2)	SM 4110B	mg/L	0,00	0,5
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	TS 6288 EN ISO 8467	mg/L	7,29	5
pH	TS EN ISO 10523		7,60	6,5-9,5
Potasyum (P)	TS EN ISO 14911	mg/L	35,70	
Renk	SM 4110B	Pt-C0	10,00	TKEDY
Selenyum (Se)	EPA 200.7	µg/L	0,00	10
Sıcaklık		ºC	19,00	-
Silisyum Dioksit (SiO2)	EPA 200.7	mg/L	13,60	-
Toplam Alkalinite	SM 2320B	mg/L	98	-
Toplam Azot		mg/L	-	-
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	SM 2540 C (SM-Checking Correction of Analyses)	mg/L	704	-
Toplam Sertlik (CaCO3)	SM 2340B	mg/L	246	-
Toplam Siyanür (T-CN)	TS EN ISO 14403-1	µg/L	0,00	

Aynı analizler Kuyu Suyu için yapılmış olup ,

- ✓ pH değeri 7,60,
- ✓ sıcaklık 19,00 C^o,
- ✓ bulanıklık 8,4 NTU,
- ✓ Sülfat (SO_4) 131,00 mg/L,
- ✓ Nitrat (NO_3) 2,40 mg/L,
- ✓ Amonyum (NH_4) 0,27 mg/L' dir.

Deneysel parametrelerinden su miktarı her bir deney için 1000 mL'dir. Deneyler 3 bölüme ayrılmış ve toplamda 11 farklı durum çalışılmıştır.

- ✓ 1. Bölüm deneylerde 3 farklı deney çalışması yapılmış ve Kesikköprü Barajından alınan ham su deney reaktörüne konulmuştur. Yapılan ilk deneysel çalışmada ozon jeneratörüne;

- 1. numunede 20 L/dk ölçüsünde oksijen gazı verilerek 0,72 μg ozon jeneratöründen geçirilmiş ve su haznesinde ozonla suyun teması 60 saniye olarak uygulanmıştır.
- 2. numunede ozon jeneratörüne 15 L/dk oksijen verilmiş ve su ile 0,54 μg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.
- 3. numune için ozon jeneratörüne 10 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,36 μg ozonun temas süresi 60 saniye olarak uygulanmıştır.

1. Bölüm deneysel çalışmalar için kullanılan parametreler Çizelge 4.4'de verilmiştir (Kesikköprü Barajından alınan suların arıtma parametreleri).

Çizelge 4.4. Kesikköprü baraj suyu deney parametreleri

Deney No	Oksijen Miktarı (l/dk)	Ozon miktarı (μg)	Süre (sn)	Arıtılan Su Miktarı (ml)
1.deney	20	0,72	60	1000
2.deney	15	0,54	60	1000
3.deney	10	0,36	60	1000

✓ 2. Bölüm deneyde 4 farklı deney yapılmış, Çamlıdere Barajından alınan ham su deney reaktörüne konulmuştur. Yapılan 4. deneyde,

- 4. Numune için ozon jeneratörüne 5 L/dk ölçüsünde oksijen gazı verilerek 0,18 µg ozon jeneratöründen geçirilmiş ve su haznesinde ozonla suyun teması 60 saniye olarak uygulanmıştır.
- 5. numunede ozon jeneratörüne 10 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,36 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.
- 6. numune için ozon jeneratörüne 15 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,54 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.
- 7. numune için ozon jeneratörüne 20 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,72 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.

2. Bölüm deneysel çalışmalar için kullanılan parametreler Çizelge 4.5'de verilmiştir (Çamlıdere Barajından alınan suların arıtma parametreleri).

Çizelge 4.5. Çamlıdere baraj suyu deney parametreleri

Deney No	Oksijen Miktarı (l/dk)	Ozon miktarı (µg)	Süre (sn)	Arıtılan Su Miktarı (ml)
4.deney	5	0,18	60	1000
5.deney	10	0,36	60	1000
6.deney	15	0,54	60	1000
7.deney	20	0,72	60	1000

✓ 3. bölüm deneyde 4 farklı deney yapılmış, kuyu suyundan alınan ham su deney reaktörüne konulmuştur. Yapılan 4 deneyde,

- 8. Numune için ozon jeneratörüne 5 L/dk ölçüsünde oksijen gazı verilerek 0,18 µg ozon jeneratöründen geçirilmiş ve su haznesinde ozonla suyun teması 60 saniye olarak uygulanmıştır.
- 9. numunede ozon jeneratörüne 10 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,36 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.
- 10. numune için ozon jeneratörüne 15 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,54 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.

- 11. numune için ozon jeneratörüne 20 L/dk oksijen verilmiş su ile 0,72 µg ozonun temas süresi 60 saniye alınmıştır.

3. Bölüm deneysel çalışmalar için kullanılan parametreler Çizelge 4.6'de verilmiştir (Kuyu Suyundan alınan suların arıtma parametreleri).

Çizelge 4.6. Kuyu suyu deney parametreleri

Deney No	Oksijen Miktarı (l/dk)	Ozon miktarı (µg)	Süre (sn)	Arıtılan Su Miktarı (ml)
8.deney	5	0,18	60	1000
9.deney	10	0,36	60	1000
10.deney	15	0,54	60	1000
11.deney	20	0,72	60	1000

4.4. Deney Analiz Sonuçları

Yapılan deneyler neticesinde ozon jeneratörü ile arındırılmış 11 numune Resim 4.4 de görüleceği üzere 1000 ml kapalı kaplar içerisinde ulusal akreditasyona sahip ASKİ Kalite Kontrol laboratuvarlarına götürülerek analizleri burada yaptırılmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları ve parametreleri 5. Bölümde Sonuç kısmında yorumlanmıştır.



Resim 4.4. Deney numunelerinin ASKİ Laboratuvarlarında analizleri

Çizelge 4.7. Çamlıdere baraj suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Hamsu Sonuçları	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Alüminyum (Al)	µg/L	200	1123,0	937,00	950,00	850,00	936,00
Amonyum (NH4)	mg/L	0,5	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Antimon (Sb)	µg/L	5	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Arsenik (As)	µg/L	10	7,95	7,6	7,8	7,7	7,7
Bakır (Cu)	mg/L	2	0,003	< 0,003	0,003	< 0,003	< 0,003
Baryum (Ba)	mg/L	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Bikarbonat İyonu	mg/L	-	105,00	112,00	111,00	121,00	115,00
Bor (B)	mg/L	1	0,028	0,058	0,052	0,053	0,055
Bromat	µg/L	10		< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0
Bromür	µg/L	-		13,0	13,0	14,0	13,0
Bulanıklık	NTU	1	6,80	3,60	3,40	3,20	3,10
Cıva	µg/L	1	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Çinko	mg/L	-	< 0,005	0,043	0,180	0,110	0,050
Çözünmüş oksijen	mg/L	-		13,60	13,30	> 20.00	> 20.00
Demir	µg/L	200	429,00	416,00	428,00	384,00	419,00
Elektriksel İletkenlik	mS/m	250	25,60	26,7	26,7	26,5	26,5
Florür (F)	mg/L	1,5	0,11	0,16	0,14	0,16	0,15
Kadmiyum (Cd)	µg/L	5	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Kalsiyum İyonu (Ca^{+2})	mg/L	-	27,20	21,70	21,60	21,80	21,70
Karbonat İyonu	mg/L	-	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 10,00
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L			15	15	15	14
Klorür (Cl)	mg/L	250	21,80	23,20	23,10	23,00	23,00
Kobalt (Cd)	mg/L	-	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Koku		TKEDY		TKEDY	TKEDY	TKEDY	TKEDY
Krom (Cr)	µg/L	50	1,12	1,05	< 1,00	< 1,00	1,09
Kurşun (Pb)	µg/L	10	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Lityum (Li)	mg/L	-	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Magnezyum İyonu (Mg)	mg/L	-	6,40	5,10	5,10	5,10	5,10
Mangan (Mn)	µg/L	50	8,00	21,00	24,00	26,00	25,00
Nikel (Ni)	µg/L	20	< 1,00	5,830	6,230	6,090	5,540
Nitrat (NO3)	mg/L	50	< 0,5	1,10	1,10	1,10	1,40
Nitrit (NO2)	mg/L	0,5	< 0,05	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	mg/L	5	5,30	2,60	2,85	2,53	3,14
pH		6,5-9,5	7,70	7,6	7,7	7,6	7,8
Potasyum (P)	mg/L		3,50	2,70	2,70	2,70	2,70
Renk	Pt-C0	TKEDY	10,00	5	5	5	5
Selenyum (Se)	µg/L	10	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Sıcaklık	ºC	-	17,30	17,3	17,3	17,3	17,3
Silisyum Dioksit (SiO2)	mg/L	-	12,60	28,90	28,10	29,40	29,40
Sodyum (Na)	mg/L	200	18,80	18,00	17,80	17,90	17,70

Çizelge 4.7. (devam) Çamlıdere baraj suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Hamsu Sonuçları	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Sülfat (SO_4)	mg/L	250	8,90	10,40	10,20	10,10	10,20
Toplam Alkalinite	mg/L	-	86,00	92,00	90,80	98,80	94,00
Toplam Azot	mg/L	-		2,31	1,89	2,17	2,59
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	mg/L	-	171,00	179	179	178	178
Toplam Sertlik (CaCO3)	mg/L	-	94,00	75,00	75,00	75,00	75,00

Çizelge 4.8. Kesikköprü baraj suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Hamsu Sonuçları	RUN 1	RUN 2	RUN 3
Alüminyum (Al)	µg/L	200	15,00	14,3	13,9	14,1
Amonyum (NH_4)	mg/L	0,5	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Antimon (Sb)	µg/L	5	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Arsenik (As)	µg/L	10	11,6	10,40	10,70	10,30
Bakır (Cu)	mg/L	2	0,003	0,008	0,004	< 0,003
Baryum (Ba)	mg/L	-	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Bikarbonat İyonu	mg/L	-	141,00	133,00	127,00	135,00
Bor (B)	mg/L	1	0,460	0,280	0,270	0,280
Bromat	µg/L	10		< 5,0	< 5,0	< 5,0
Bromür	µg/L	-		70,0	68,0	65,0
Bulanıklık	NTU	1	2,20	1,20	1,40	1,40
Cıva	µg/L	1	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Çinko	mg/L	-	< 0,005	0,400	0,340	0,300
Çözünmüş oksijen	mg/L	-		> 20.00	> 20.00	17,40
Demir	µg/L	200	65,00	62,1	63,7	62,4
Elektriksel İletkenlik	mS/m	250	186,80	91,5	91,8	91,5
Florür (F)	mg/L	1,5	0,35	0,30	0,30	0,10
Kadmiyum (Cd)	µg/L	5	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Kalsiyum İyonu (Ca+2)	mg/L	-	129,00	60,80	61,10	63,30
Karbonat İyonu	mg/L	-	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 10,00
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L			24	22	20
Klorür (Cl)	mg/L	250	315,00	134,00	137,00	131,00
Kobalt (Cd)	mg/L	-	< 1,00	1,07	< 1,00	< 1,00
Koku		TKEDY	-	TKEDY	TKEDY	TKEDY
Krom (Cr)	µg/L	50	1,30	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Kurşun (Pb)	µg/L	10	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Lityum (Li)	mg/L	-	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Magnezyum İyonu (Mg)	mg/L	-	43,10	17,10	17,23	18,40
Mangan (Mn)	µg/L	50	8,00	9,00	9,00	9,00
Nikel (Ni)	µg/L	20	< 1,00	9,580	8,050	7,010
Nitrat (NO3)	mg/L	50	< 0,5	3,20	3,10	2,20
Nitrit (NO2)	mg/L	0,5	< 0,05	< 0,050	< 0,050	< 0,050

Çizelge 4.8. (devam) Kesikköprü baraj suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Hamsu Sonuçları	RUN 1	RUN 2	RUN 3
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	mg/L	5	5,30	3,86	3,58	3,50
pH		6,5-9,5	7,70	7,8	7,8	7,9
Potasyum (P)	mg/L		3,50	4,10	4,10	5,20
Renk	Pt-C0	TKEDY	10,00	5	5	5
Selenyum (Se)	µg/L	10	< 1,00	2,220	1,530	1,550
Sıcaklık	ºC	-	17,40	17,4	17,3	17,3
Silisyum Dioksit (SiO2)	mg/L	-	12,6	20,90	21,20	20,90
Sodyum (Na)	mg/L	200	18,80	99,50	99,40	106,00
Sülfat (SO4)	mg/L	250	8,90	132,00	135,00	128,00
Toplam Alkalinite	mg/L	-	86,00	109,20	104,40	110,40
Toplam Azot	mg/L	-		2,73	2,45	2,94
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	mg/L	-	171,00	615	613	613
Toplam Sertlik (CaCO3)	mg/L	-	94,00	75,00	76,2	76,00

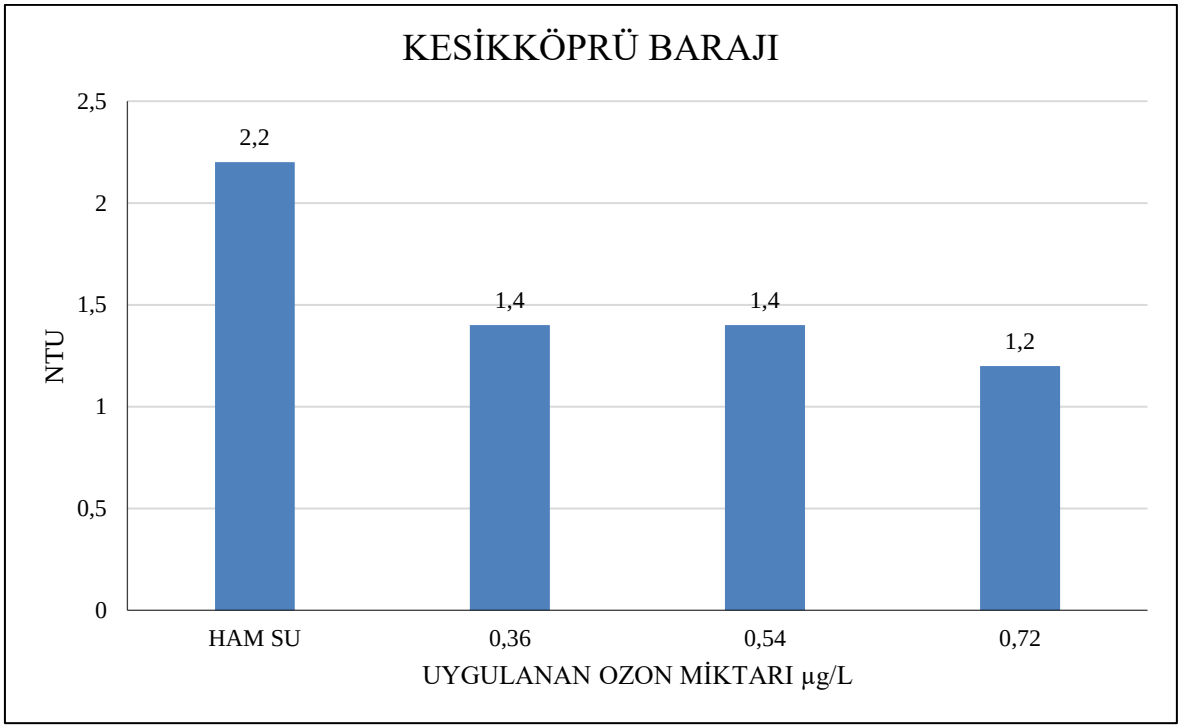
Çizelge 4.9. Kuyu suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Ham Su Sonuçları	RUN 8	RUN 9	RUN 10	RUN 11
Alüminyum (Al)	µg/L	200	184,00	235,00	292,00	335,00	453,00
Amonyum (NH4)	mg/L	0,5	0,27	0,18	0,17	0,17	0,14
Antimon (Sb)	µg/L	5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arsenik (As)	µg/L	10	7,68	8,23	8,32	8,49	8,59
Bakır (Cu)	mg/L	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Baryum (Ba)	mg/L	-	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04
Bikarbonat İyonu	mg/L	-	120,00	120,00	120,00	121,00	120,00
Bor (B)	mg/L	1	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13
Bromat	µg/L	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bromür	µg/L	-	73,00	57,00	56,00	56,00	55,00
Bulanıklık	NTU	1	8,40	7,40	6,20	5,80	3,70
Cıva	µg/L	1	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Çinko	mg/L	-	0,29	0,35	0,26	0,34	0,35
Çözünmüş oksijen	mg/L	-	-	-	-	-	-
Demir	µg/L	200	36,00	47,00	58,00	70,00	101,00
Elektriksel İletkenlik	mS/m	250	105,10	93,10	92,70	92,40	93,30
Florür (F)	mg/L	1,5	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30
Kadmiyum (Cd)	µg/L	5	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Kalsiyum İyonu (Ca^{+2})	mg/L	-	67,20	66,00	66,20	67,00	67,00
Karbonat İyonu	mg/L	-	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 10,00	< 10,00

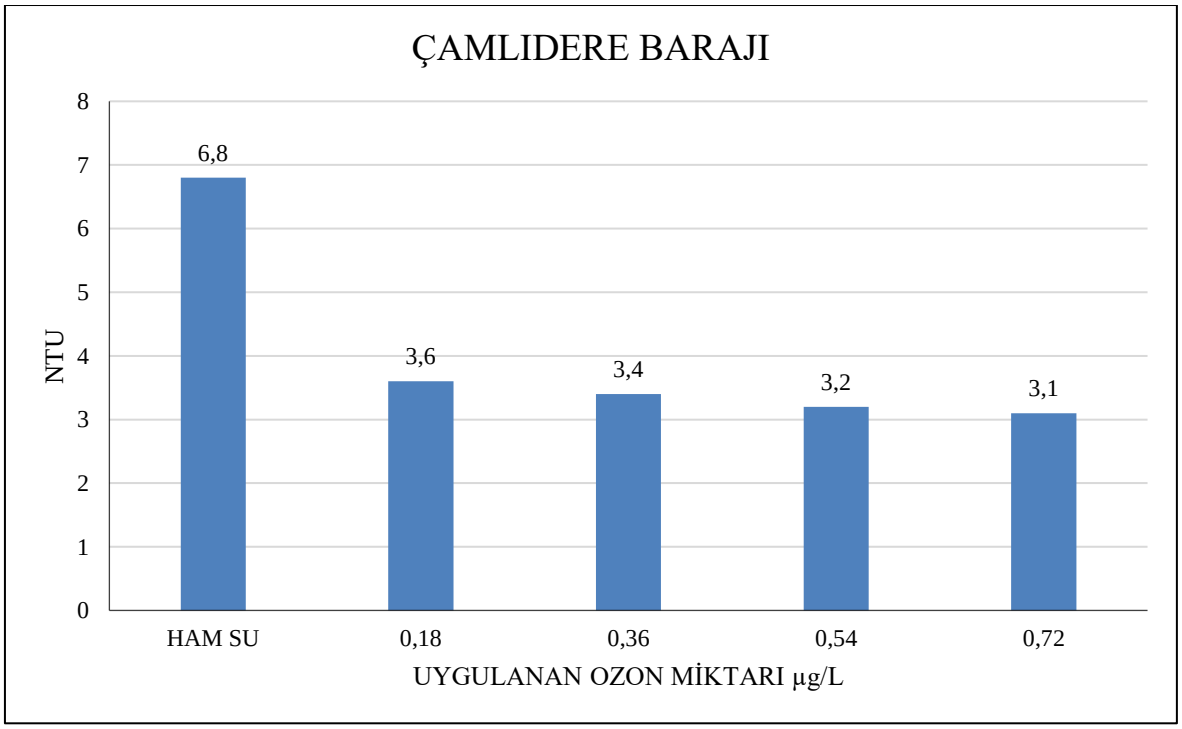
Çizelge 4.9. (devam) Kuyu suyu analiz sonuçları

Parametre	Birim	ITASHY	Ham Su Sonuçları	RUN 8	RUN 9	RUN 10	RUN 11
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L		54,00	47,00	38,00	29,00	26,00
Klorür (Cl)	mg/L	250	167,00	131,00	132,00	133,00	131,00
Kobalt (Cd)	mg/L	-	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Koku		TKEDY		TKEDY	TKEDY	TKEDY	TKEDY
Krom (Cr)	µg/L	50	4,33	4,41	4,38	4,51	4,50
Kurşun (Pb)	µg/L	10	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Lityum (Li)	mg/L	-	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Magnezyum İyonu (Mg)	mg/L	-	19,30	19,00	19,00	19,20	19,00
Mangan (Mn)	µg/L	50	3,00	3,00	3,00	5,00	6,00
Nikel (Ni)	µg/L	20	3,43	3,47	3,45	3,46	3,47
Nitrat (NO3)	mg/L	50	2,40	3,70	2,40	2,50	2,60
Nitrit (NO2)	mg/L	0,5	< 0,05	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050
Oksitlenebilirlik (Potasyum Permanganat Değeri)	mg/L	5	7,29	6,42	5,4	5,8	5,9
pH		6,5-9,5	7,60	7,70	7,70	7,80	7,90
Potasyum (P)	mg/L		35,70	4,80	4,80	5,00	4,90
Renk	Pt-C0	TKEDY	10,00	10	5	5	5
Selenyum (Se)	µg/L	10	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Sıcaklık	ºC	-	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
Silisyum Dioksit (SiO2)	mg/L	-	13,60	13,70	13,60	13,90	14,10
Sodyum (Na)	mg/L	200	97,20	94,40	95,00	96,00	94,00
Sülfat (SO4)	mg/L	250	131,00	127,00	128,00	130,00	128,00
Toplam Alkalinite	mg/L	-	98,00	98,00	98,00	99,00	98,00
Toplam Azot	mg/L	-	-	-	-	-	-
Toplam Çözünmüş Madde (TDS)	mg/L	-	704,00	625,00	620,00	622,00	625,00
Toplam Sertlik (CaCO3)	mg/L	-	246,00	184,00	183,00	182,00	184,00
Toplam Siyanür (T-CN)	µg/L						

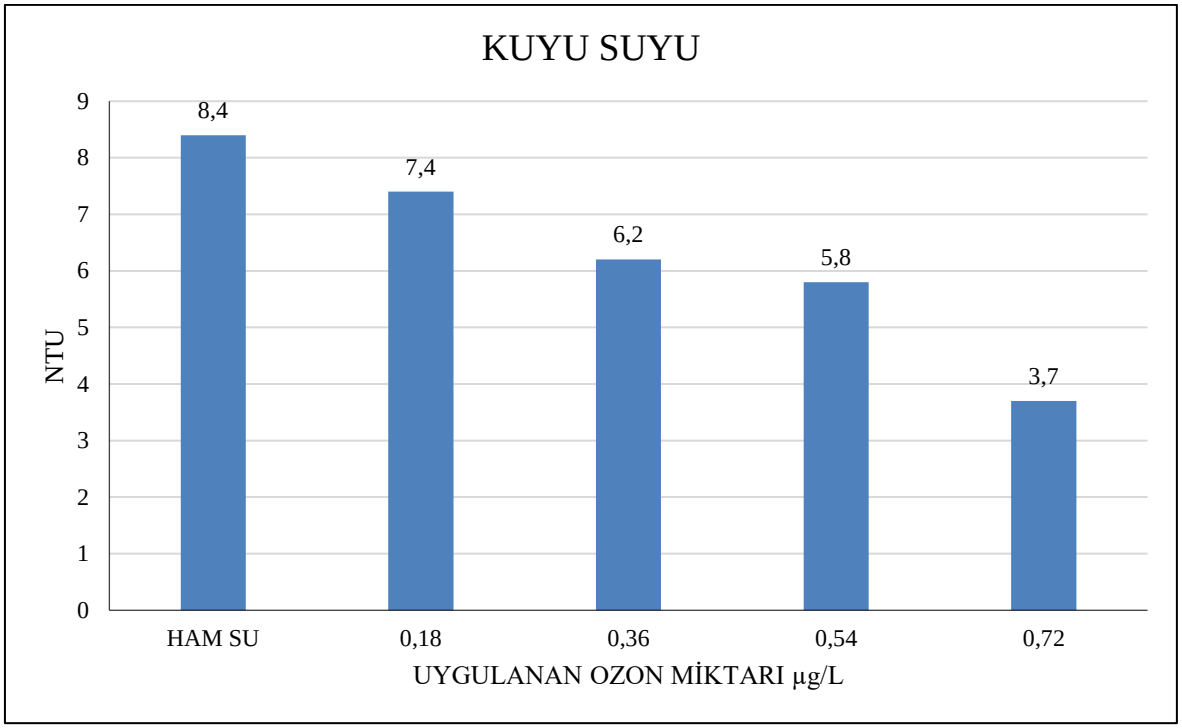
Yapılan deneyler sonucunda ozonlama ile su dezenfeksiyonu işlemi sonrasında uluslararası içme suyu kriteleri seviyesine gelen bulanıklık, elektriksel iletkenlik, oksitlenebilirlik, pH, sertlik ve renk paremetrelerinin grafiksel gösterimi aşağıda verilmiştir.



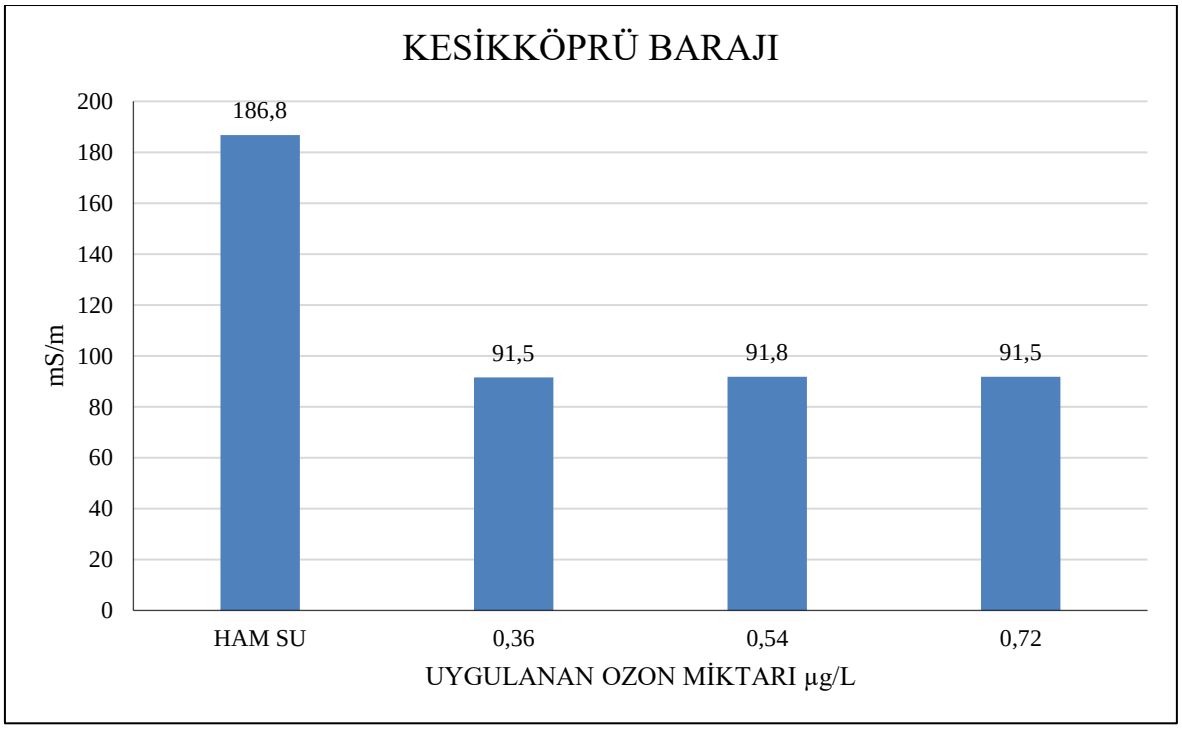
Şekil 4.2. Kesikköprü barajı su numunesi bulanıklık analiz sonuçları



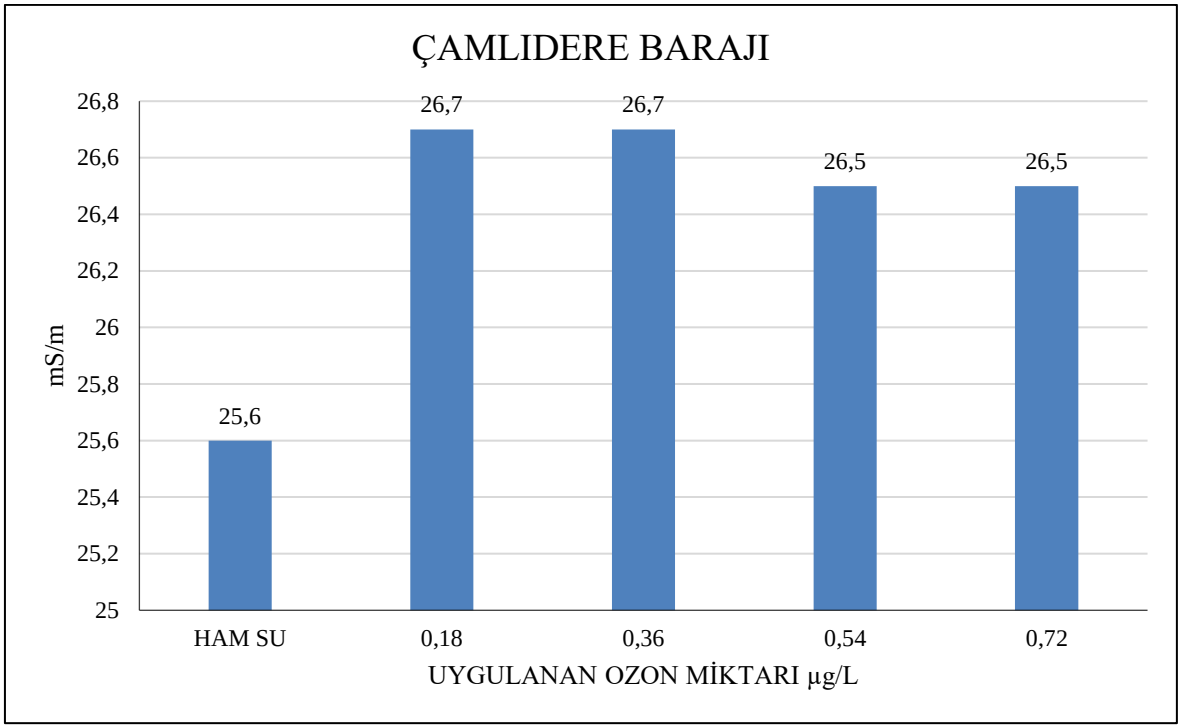
Şekil 4.3. Çamlıdere barajı su numunesi bulanıklık analiz sonuçları



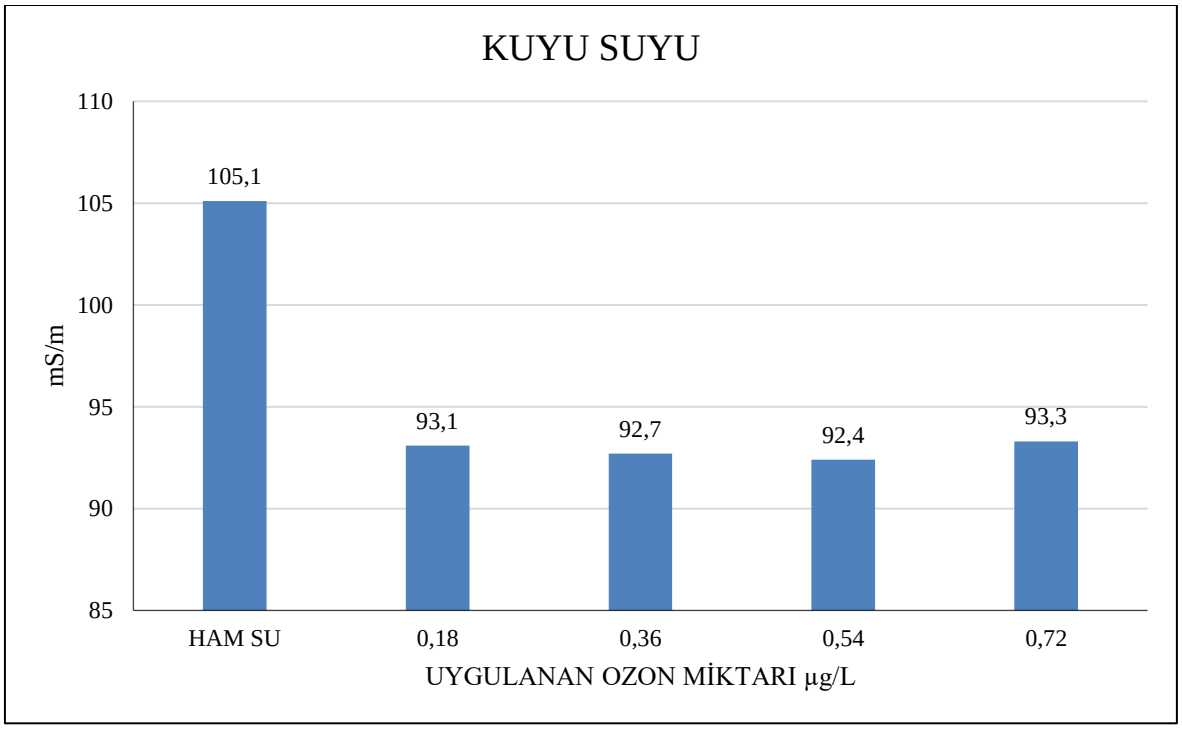
Şekil 4.4. Kuyu suyu numunesinin bulanıklık analiz sonuçları



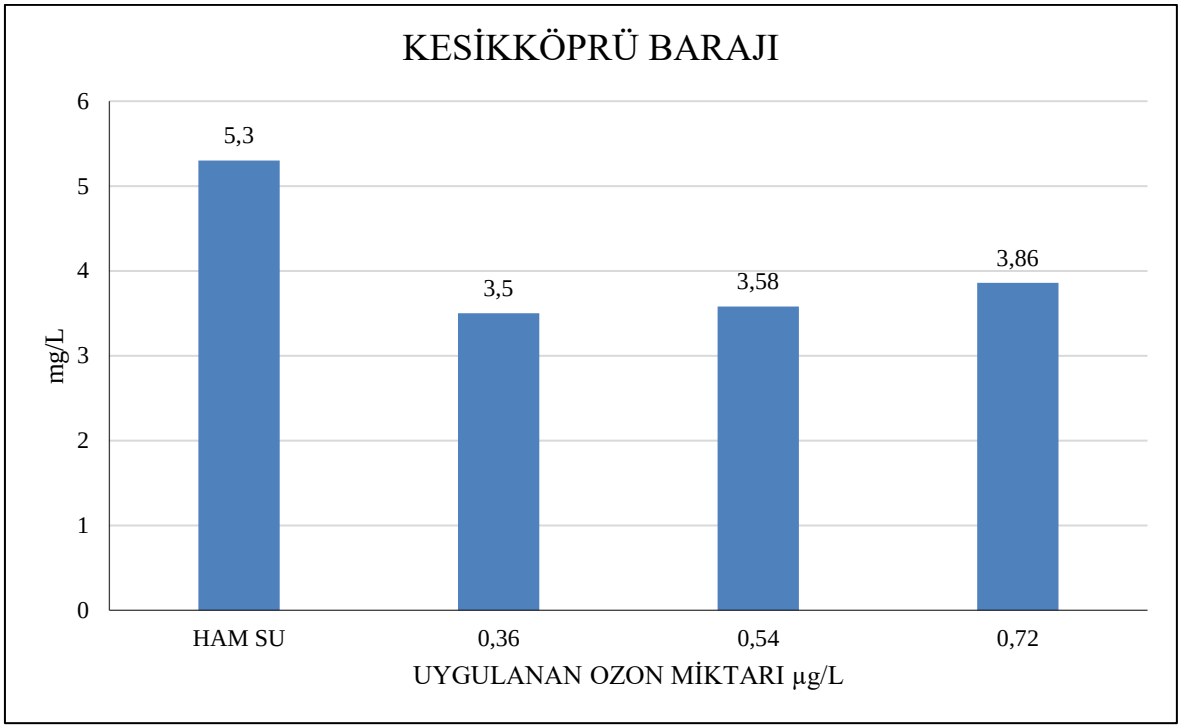
Şekil 4.5. Kesikköprü barajı su numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları



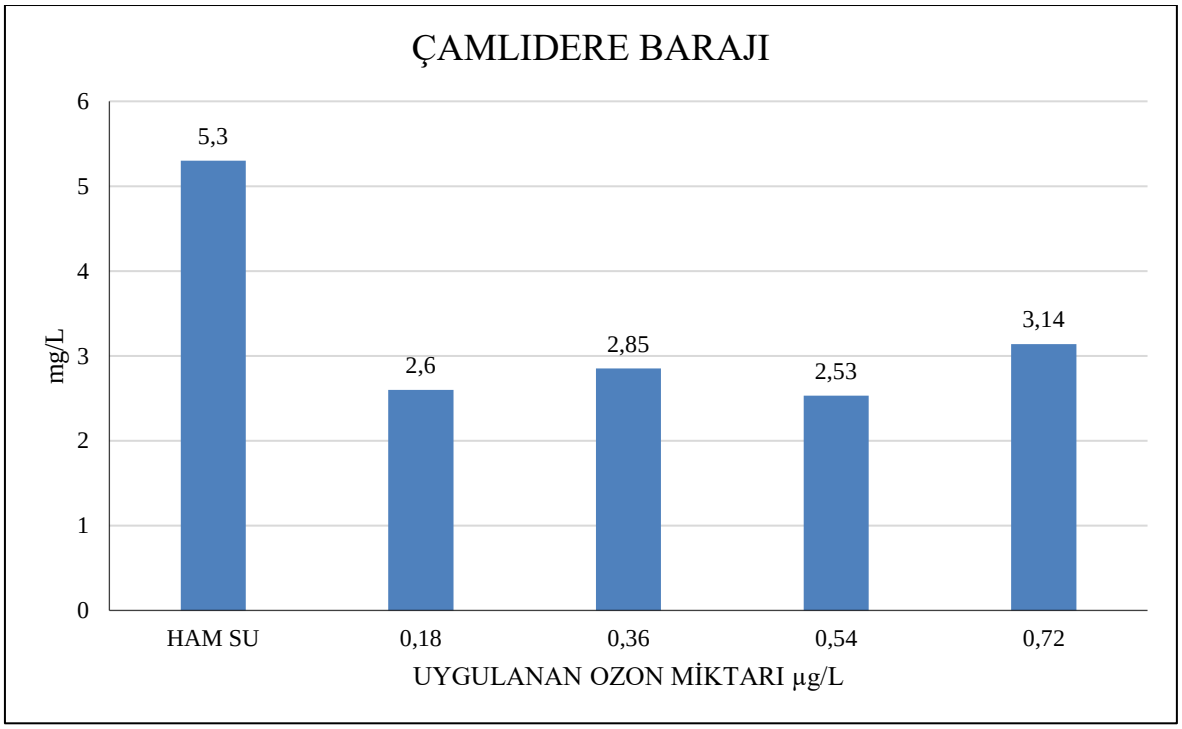
Şekil 4.6. Çamlıdere barajı su numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları



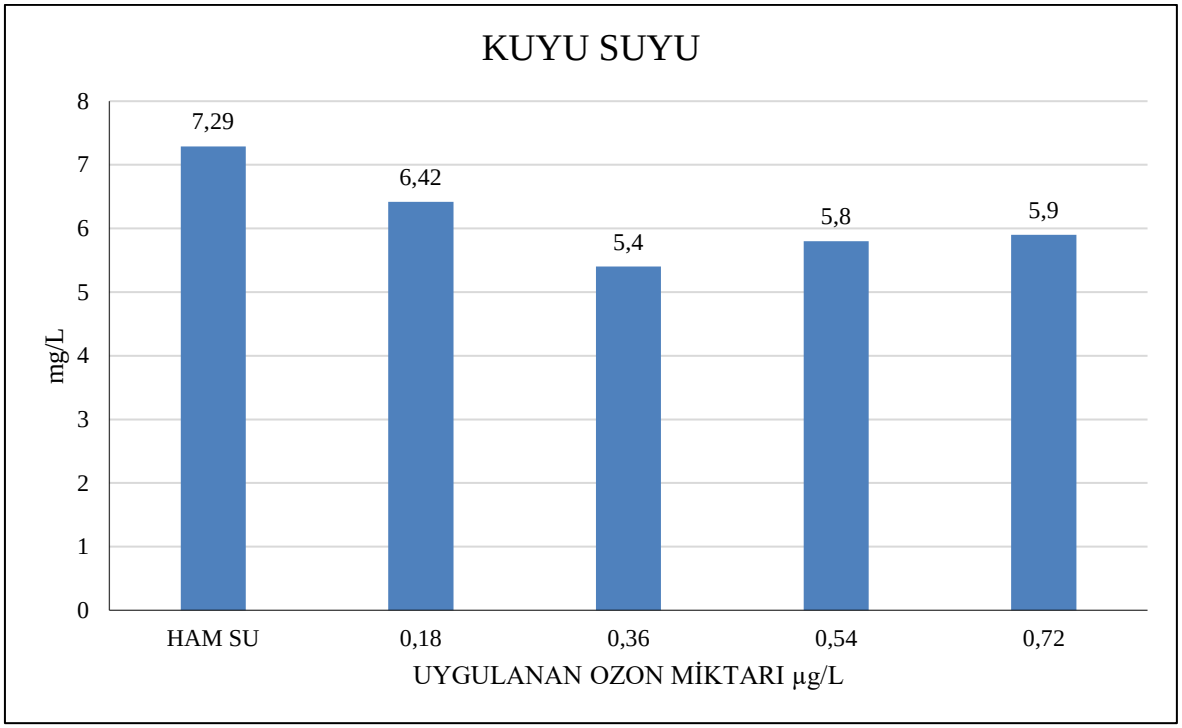
Şekil 4.7. Kuyu suyu numunesinin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları



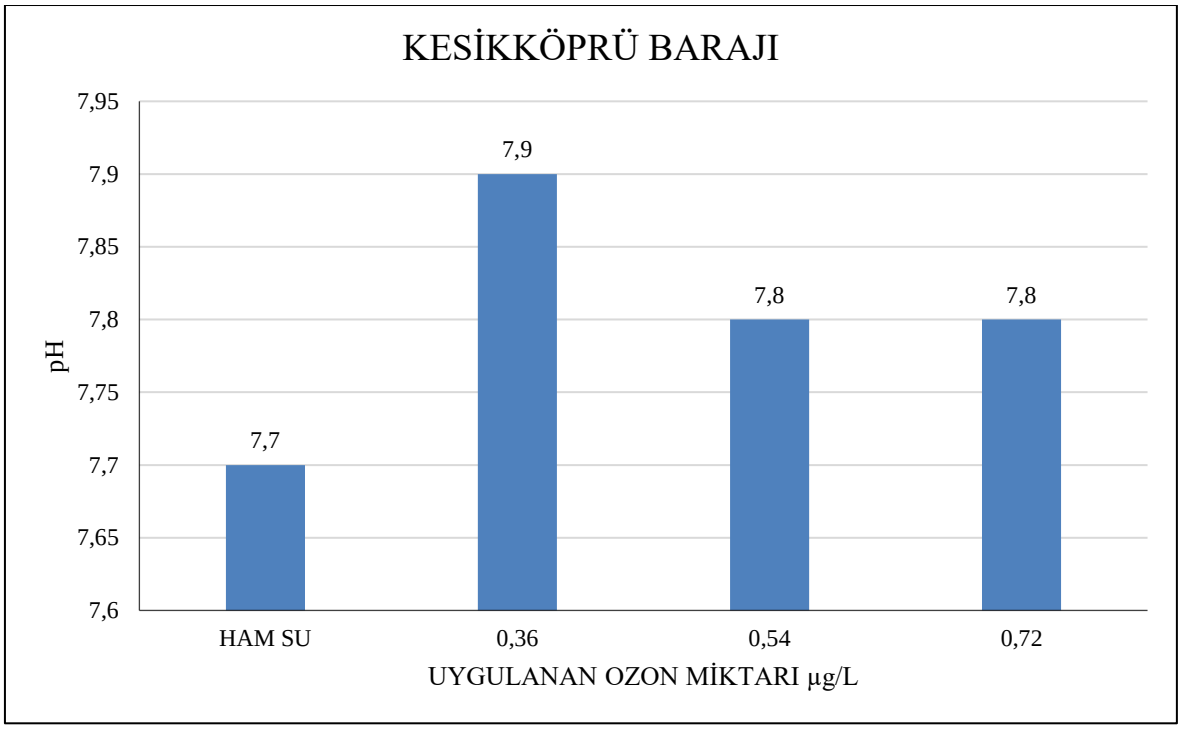
Şekil 4.8. Kesikköprü barajı su numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları



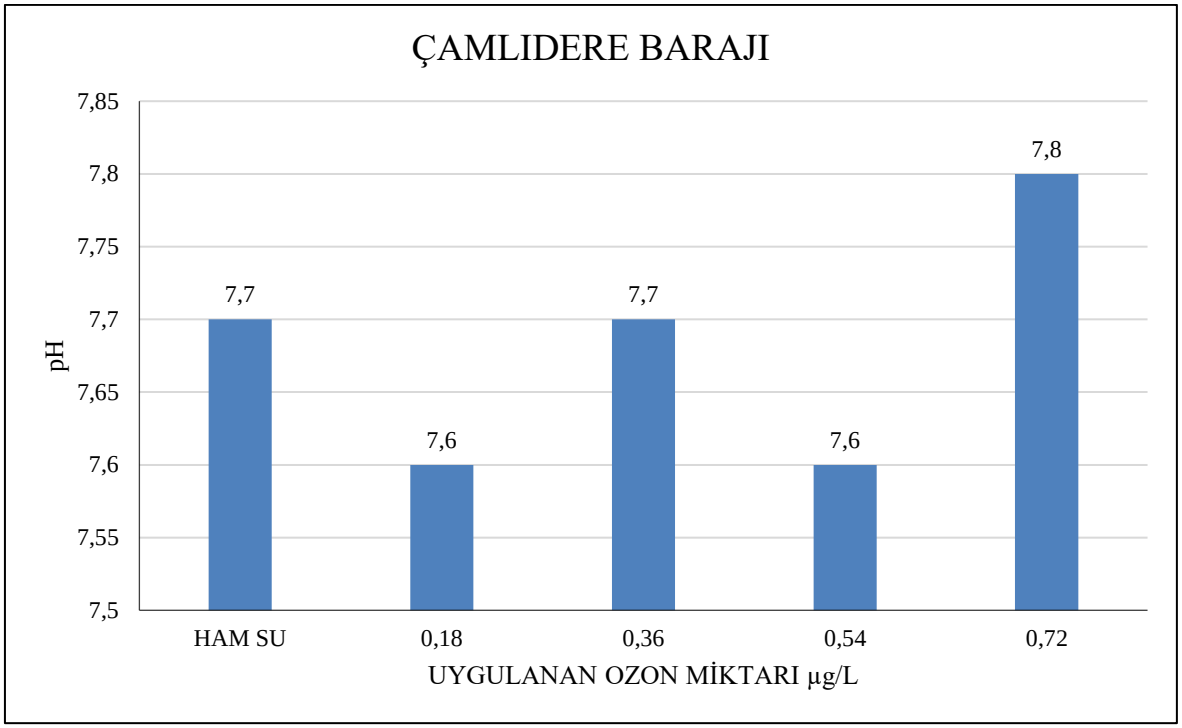
Şekil 4.9. Çamlıdere barajı su numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları



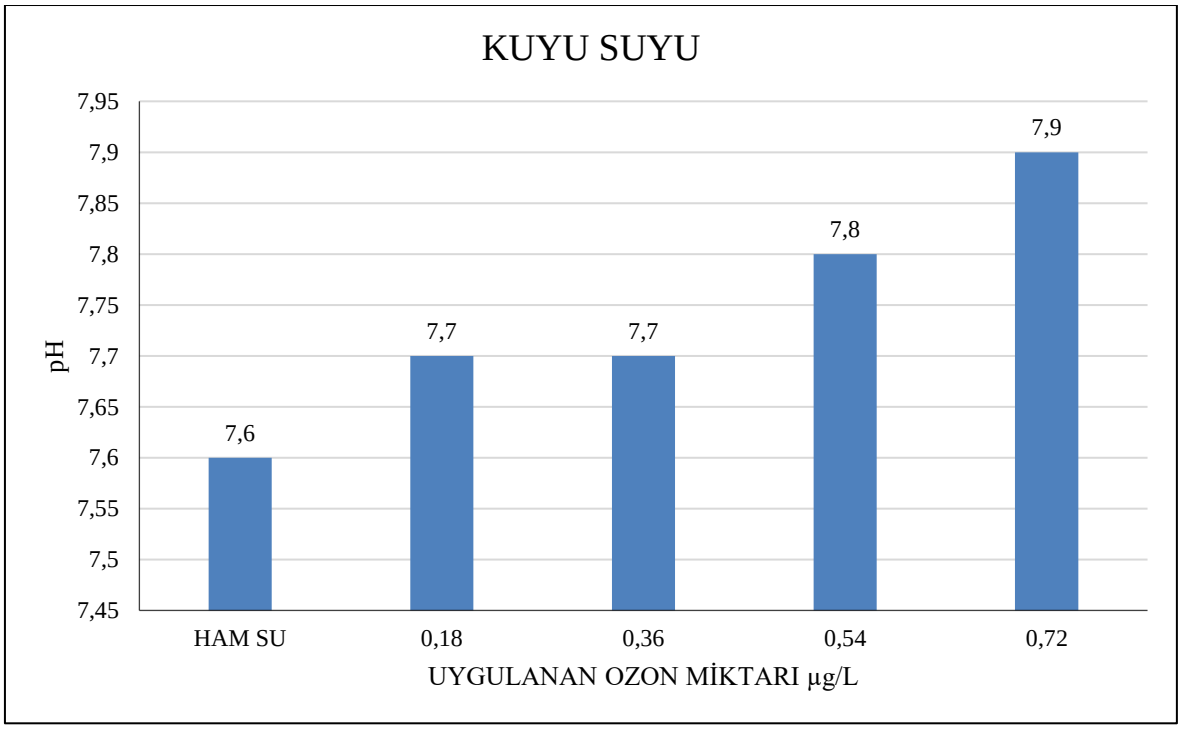
Şekil 4.10. Kuyu suyu numunesinin oksitlenebilirlik analiz sonuçları



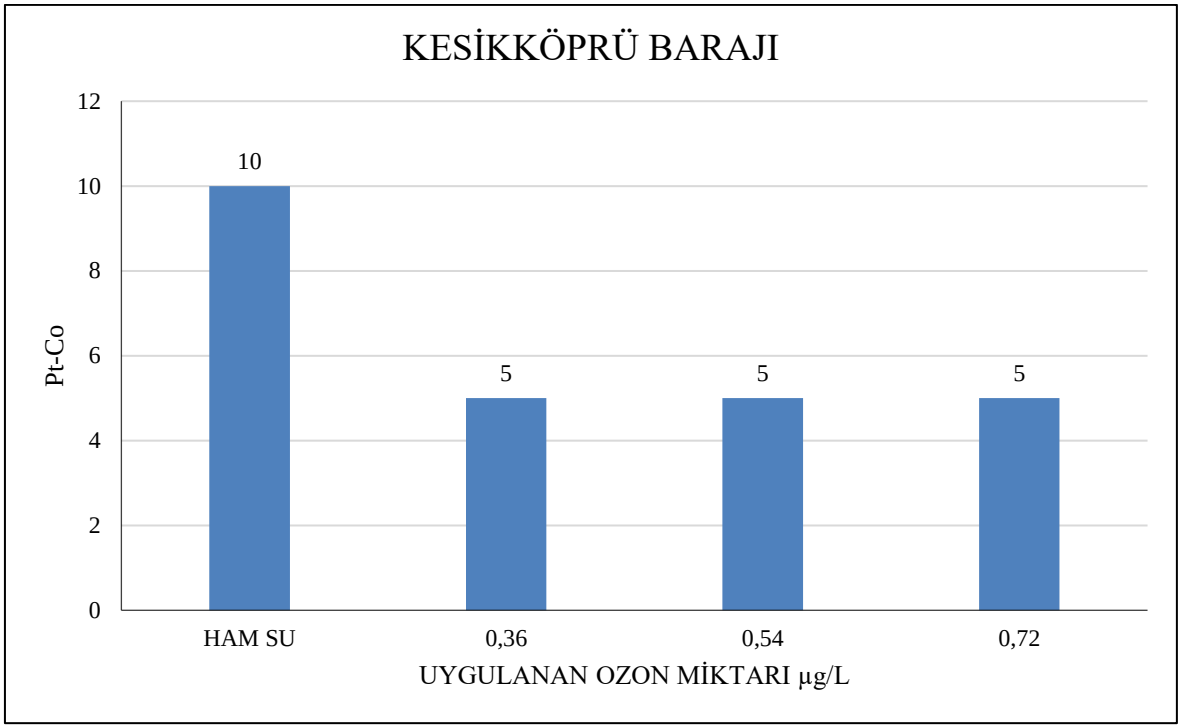
Şekil 4.11. Kesikköprü barajı su numunesinin pH analiz sonuçları



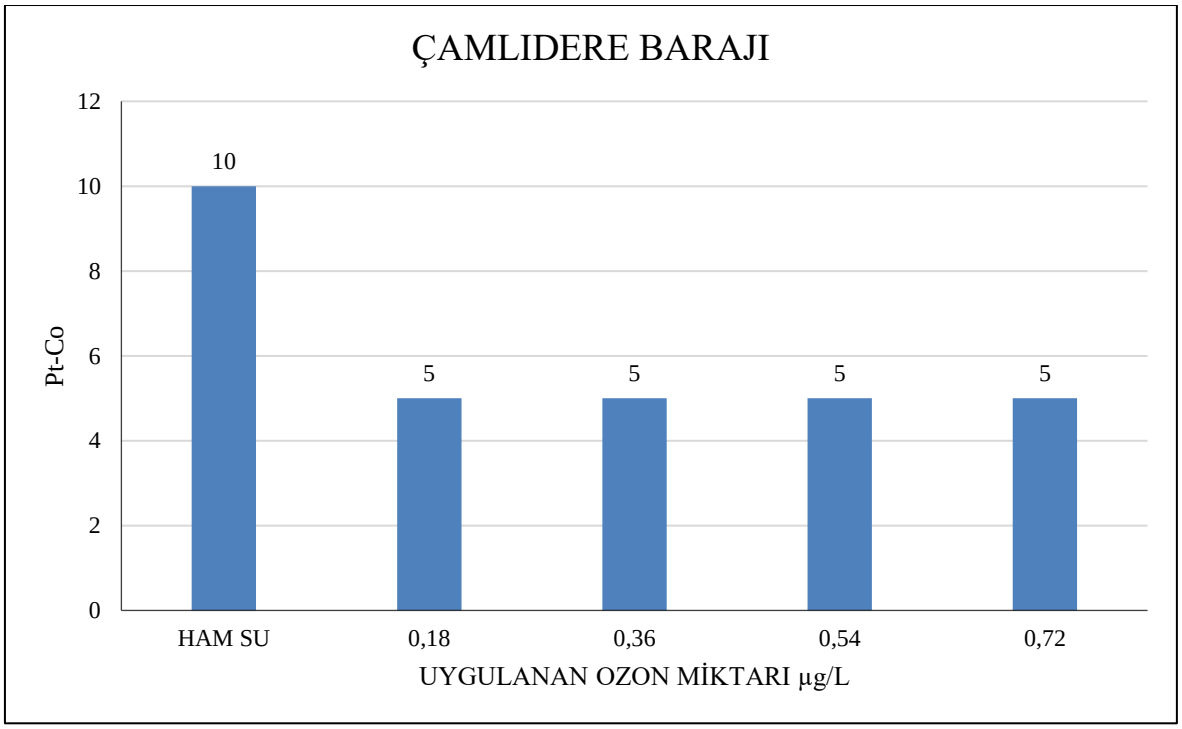
Şekil 4.12. Çamlıdere barajı su numunesinin pH analiz sonuçları



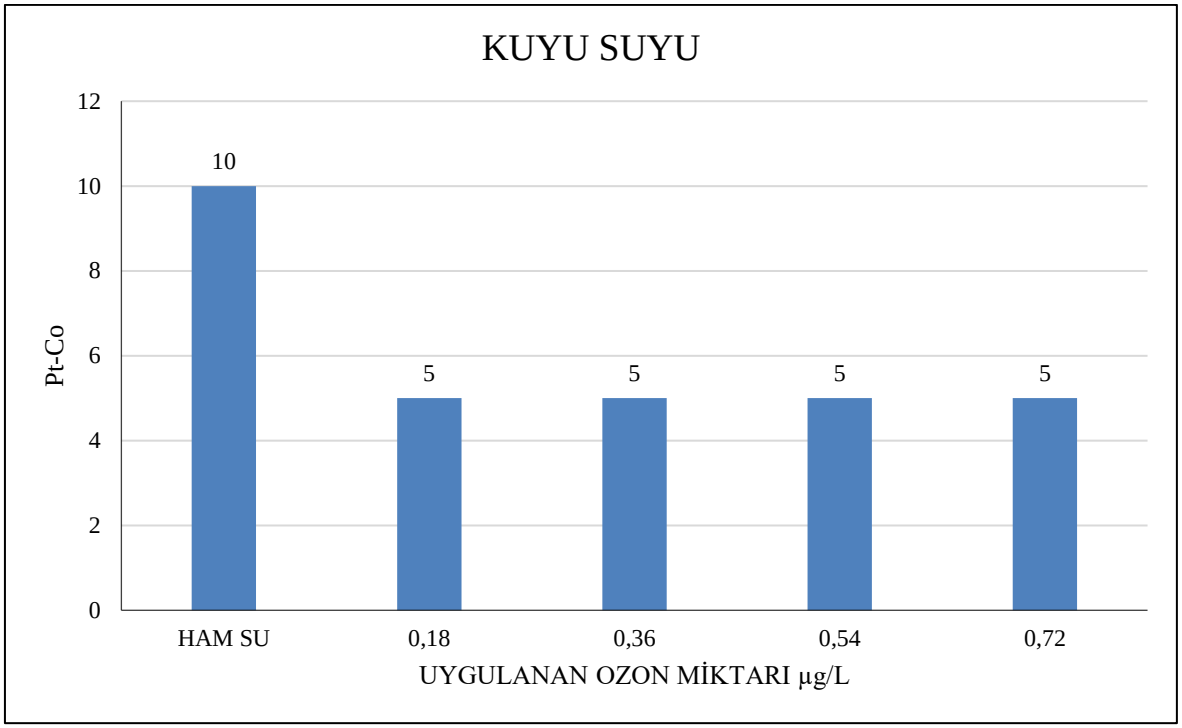
Şekil 4.13. Kuyu suyu numunesinin pH analiz sonuçları



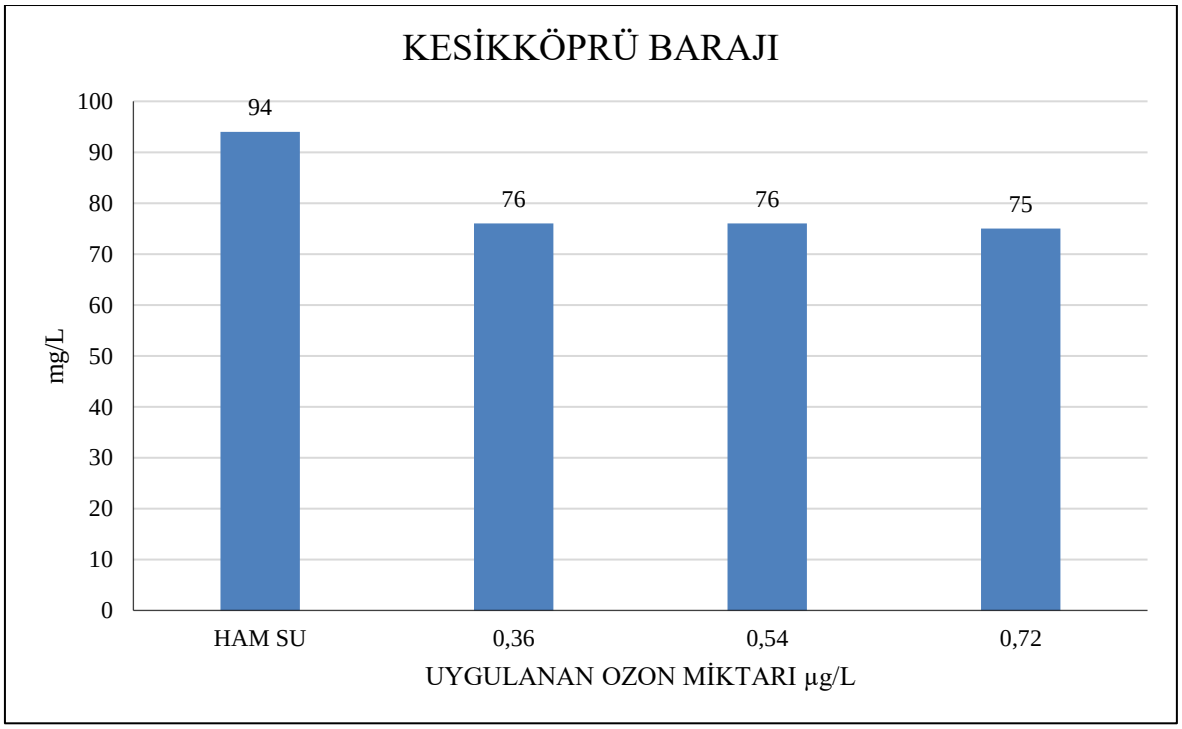
Şekil 4.14. Kesikköprü barajı su numunesinin renk analiz sonuçları



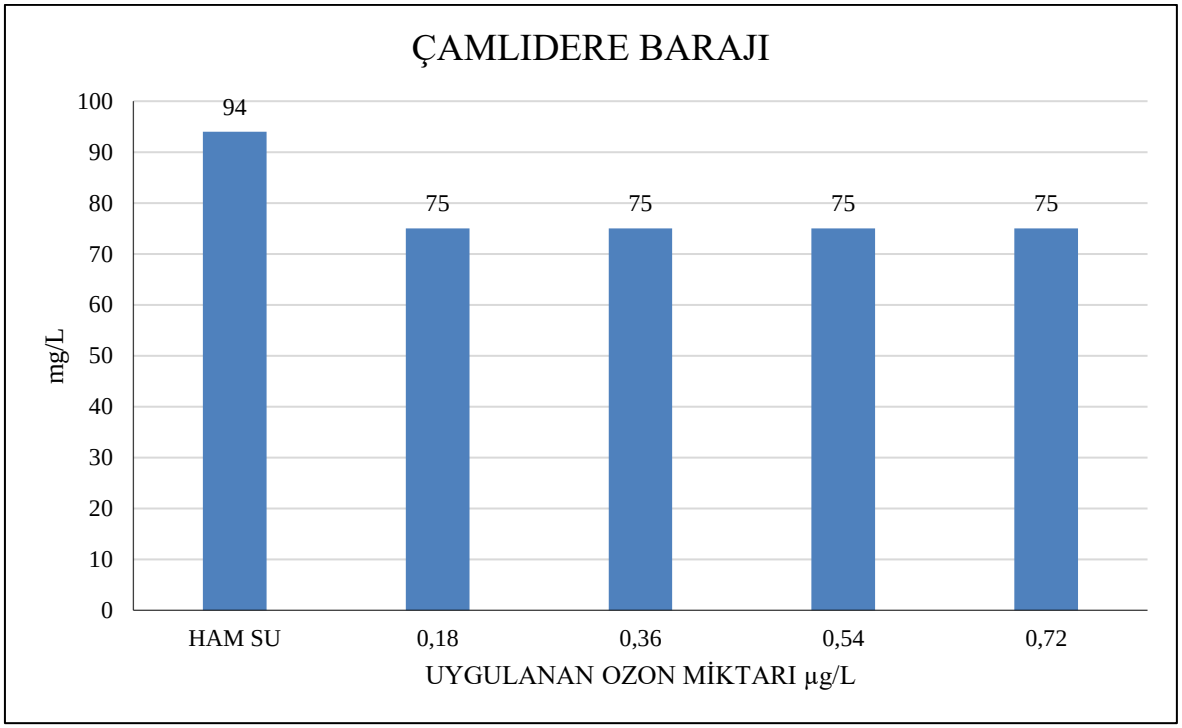
Şekil 4.15. Çamlıdere barajı su numunesinin renk analiz sonuçları



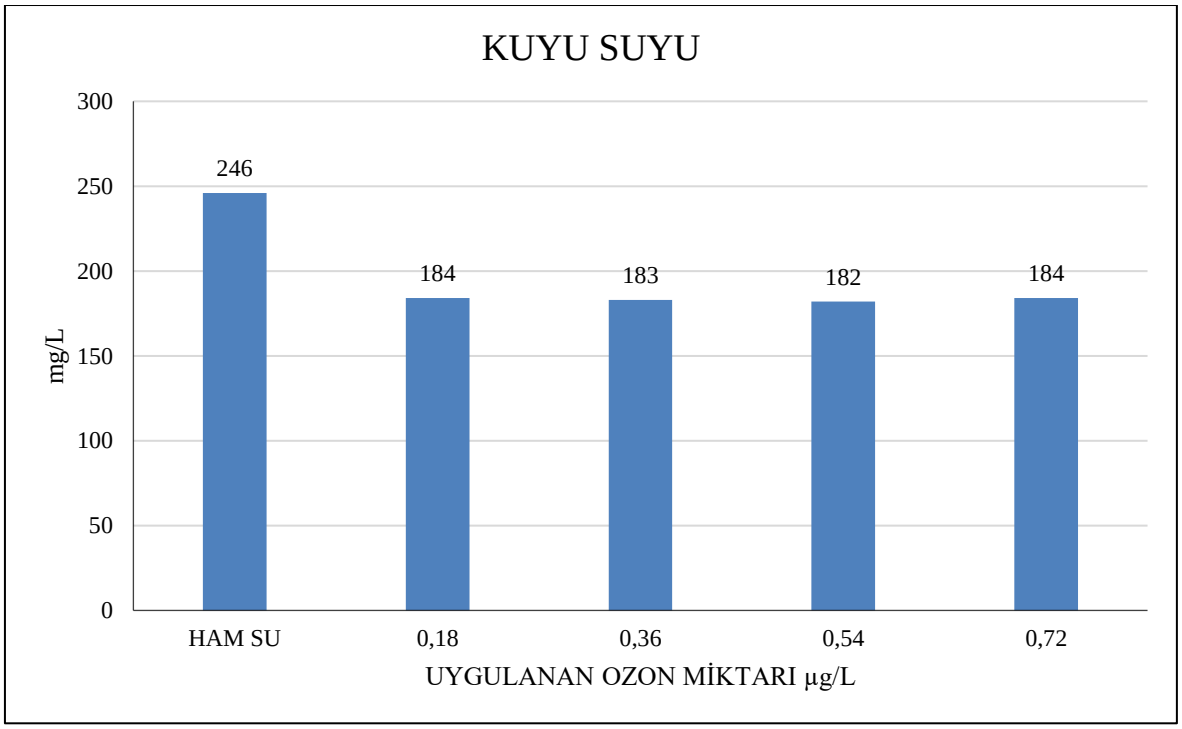
Şekil 4.16. Kuyu suyu numunesinin renk analiz sonuçları



Şekil 4.17. Kesikköprü barajı su numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları



Şekil 4.18. Çamlıdere barajı su numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları



Şekil 4.19. Kuyu suyu numunesinin toplam sertlik analiz sonuçları

4.5. Ozonlama Süreci ve Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, ozonun içme suyu olarak barajlarda biriktirilen suyun biyo-bozunur çözünmüş organik kirleticileri artırma potansiyeli ile bağlantılı olarak bulanıklık, sertlik, renk, pH, elektriksel iletkenlik ve oksitlenebilirlik parametreleri oksidasyon süreçlerinde ozonun etkinliği ile nasıl değiştiği incelenmiştir.

Ozonlama deneyleri, kabarcık kolon reaktörünün yarı kesikli çalışması altında gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ozon dozları 0,18, 0,36, 0,54 ve 0,72 µg/L ozon konsantrasyonları arasında değişirken, ozonlama işlemi 60 saniye sürmüştür. Ozonlamanın atık su kalitesini yükseltmede, sağlanan ozon dozuna büyük ölçüde bağlı olduğu Kim ve Tanaka (2010) [83] tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir. Ayrıca 6 mg/L'lik bir ozon dozunun (temas süresi = 10 dakika) ikincil atık suda tespit edilen çoğu farmasötik madde konsantrasyonunun azaltıldığını bildirmiştir.

Literatür çalışmalarında kirleticilerin maksimum düzeyde uzaklaştırılmasının ozonlama süresi ile arttığı görülmüştür. Ayrıca daha yüksek ozonlama sürelerinin atık suyun fiziko kimyasal özelliklerinin belirli bir dozlama ve sürede stabil kaldığı ve önemli ölçüde etkilemediği literatürde belirtilmiştir [83, 84, 85].

60 saniyelik deneylerde, artan ozon dozunun su özellikleri üzerindeki etkisi, Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9'da ve grafiksel olarak Şekil 4.2-17'de görülecektir. Özellikle, yüksek ozon konsantrasyonlarında Çamlıdere Barajı arıtılmış atık su için yaklaşık 15 mg/L'lik, Kesikköprü barajı için yaklaşık 20 mg/L'lik bir KOİ değeri ile sonuçlanmıştır. Kuyu Suyu için ise bu değer 26 mg/L değerlerinde olduğu tespit edilmiştir. Bilim adamları, bir atık suyun ozonlanması sırasında KOİ azalmasının % 45'i geçmediğini belirlemişlerdir.

Elektriksel iletkenlik, TS 266 ve ITASHY değerlerine göre maksimum 250 mS/m değerinde olması gerekmektedir. Yapılan deneylerde her iki baraj suyu için elektriksel iletkenlik değerleri Çamlıdere Barajı için 25,6 mS/m olan değer 26,7 mS/m mertebelerinde sabit olduğu ancak Kesikköprü Barajı için Ham Su elektriksel iletkenlik değeri 186,8 mS/m değerinden 91,5 mS/m mertebelerine düşmüştür. Her iki baraj için elektriksel iletkenlik değerleri referans değerleri altında çıkmış özellikle Kesikköprü Barajı suyunda % 50 oranında düşüşe neden olmuştur. Kuyu suyu için ise elektriksel iletkenlik değerleri

uygulanan ozonlama ile içme suyu referans değerleri aralığında kaldığı, elektriksel iletkenlikteki düşüşün de %10 seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu düşüşün sebebi, genel olarak metal iyonlarının ozonlama sonrası miktarsal olarak azalması olarak değerlendirilmektedir.

Bu deneyde ozon maruziyetine bağlı arındırma prosesinde kimyasal oksidasyon, moleküler ozon reaksiyonu (doğrudan oksidasyon) ile gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, ilk mekanizma asidik koşullar sırasında baskınken, ikincisi alkali koşullar altında ana mekanizma olmuştur. Bununla birlikte, radikallerin oksidasyon aktivitesi, eksikliğe neden olan temizleyicilerin varlığı ile sınırlanabilir [86]. Bu çalışmada, ozonlama ile içme suyu arıtılmış ve arıtılan suların pH değerlerinde göz ile görülür bir değişiklik meydana gelmemiştir. Genel olarak Ozonlama işleminde literatürde pH değerleri ile ilgili yapılan çalışmalarda; iyonlar zincir reaksiyonlarını sonlandırır ve ozonun hidroksil radikallerine bozunmasını engeller, dolayısıyla doğrudan oksidasyon mekanizması yoluyla ozonlamayı teşvik eder. Ayrıca, organik içeriğin oksidasyonu, bileşenlerin oksitlenmiş formlarının oluşmasına neden olabilir; bu maddelerin tam oksidasyonu, önemli miktarda ozon gerektirebilir. Bazı araştırmacılar, ozonlama sırasında bazı maddelerin daha hidrofilik ve polar bileşiklere dönüştüğünü bildirmiştir [83, 87]. Sonuç olarak, Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9' da gösterildiği gibi su içerisindeki maddelerin uzun süreli ozonlama veya diğer tekniklerle uzaklaştırılması daha da zor hale gelmektedir. Ancak Çizelge 4.7 ve 4.8 da görüleceği üzere Kalsiyum İyonu Çamlıdere Barajı ham su değeri 27,2 mg/L iken deneyler sonucunda ortalama 21,7 değerlerine düşmüş, Kesikköprü Barajı ham su değeri 129,0 mg/L iken 60,8 mg/L değerine düştüğü görülmüştür.Aynı şekilde Magnezyum iyonu için Çamlıdere Barajı ham su değeri 6,4 mg/L'den 5,1 mg/L'ye Kesikköprü Barajı ham su değeri 43,1 mg/L'den 17,1 mg/L değerine düştüğü gözlenmiştir. Kesikköprü Barajı ham su değerleri incelendiğinde Magnezyum ve Kalsiyum iyonlarının % 50 oranlarında azaldığı söylenebilir. Ancak Kuyu Suyu için yapılan deneylerde ise Magnezyum ve Kalsiyum iyonlarında herhangi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Allen vd. (2010) [88] yaptıkları çalışmada sentetik ikincil atıkların arıtıldığı yüzey akışlı sulak alan mezokozmlarına oksijen eklenmesinin, oksijensiz kontrollere kıyasla tortudaki amonyak oksidasyon potansiyelinde önemli bir artışa yol açtığını belirlemiştir.

Beltran vd. (1997) [89], yaptıkları çalışmada kimyasal oksidasyonun birincil belediye atık suyunun biyolojik arıtımı üzerindeki etkisini göstermiştir. Birincil belediye atık sularının

önceden ozonlanması, ozonlanmamış atık su ile karşılaştırıldığında KOİ seviyelerini azaltmış ve biyolojik olarak parçalanabilirliği %25 artırmıştır. Beltran vd., (1997b) [90] yaptığı çalışma ile şu sonuca varmışlardır: Ozon, biyolojik oksidasyonla birleştirilmek için uygun bir teknolojidir ve hem ozon verimliliği hem de ozon seviyesi başına KOİ seviyesinde meydana gelen azalmanın maksimize edildiği bir optimum ozon dozu vardır. Daha sonraki çalışmalarda, Beltran ve ark. (1999a, 1999b) [91, 92] evsel atık suyun kimyasal-biyolojik arıtımının bir kombinasyonunu test etmiş ve ozonlama öncesi ve sonrasının evsel atık su için etkili arıtmalar olduğunu göstermiştir. Belediye atık sularının ozonlama işlemi sırasında toplam nitrojenin yaklaşık %15 oranında daha düşük giderim oranları gözlemlemiştir, ancak Paraskeva ve Graham (2005) [93], 18 mg O_3/L ozon dozlarının aşılması ile toplam nitrojen gideriminin %20'ye kadar çıktığını bulmuşlardır. Paraskeva et al. (1998) [94], ozonun ikincil bir belediye atık suyu üzerindeki etkilerini ve ozonlama koşullarının bu atık suyun arıtılabilirliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada ozon, KOİ ve renk konsantrasyonlarını azaltmıştır. Ayrıca, çoğu durumda doyma seviyelerine kadar, atık suyun çözünmüş oksijen konsantrasyonunu önemli ölçüde artırdığı dikkati çekmiştir. Benzer sonuçlar Beltran ve ark. (2001b) [95] ve Park et al. (2001) [96], sırasıyla evsel atık su ve doğal su içeren ozonlama deneylerinden elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında da görüleceği üzere genel olarak, belirli kirleticilerin ozonlama yoluyla giderilmesi için en önemli faktörler atık suyun kalitesine, ozon dozuna ve maruz kalma süresine bağlıdır.

Baraj su numunelerinde bulanıklığının oldukça yüksek olduğu göz önüne alındığında, suyun gözlenen bulanıklık giderimi, her iki baraj suyu içinde % 50’ in üzerinde olmuştur. Ozon konsantrasyonunun bulanıklığı azaltmak için uygulanan ozon dozajının önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Uygulanan ozon uygulaması ile, Çamlıdere barajı suyunun bulanıklığı yaklaşık 3,10 Ntu'ya Kesikköprü barajı suyunun bulanıklığı yaklaşık 1,20 Ntu'ya kadar düşürülmüştür. Kuyu Suyunun bulanıklık oranı 8,40 Ntu seviyesinden uygulanan ozonlama ile 3,7 Ntu seviyesine düştüğü tespit edilmiştir. Paraskeva ve Graham (2005) [93], 20 mg O_3/L ozon kullanılarak ikincil bir atık suyun ozonlanmasından sonra askıda katı madde giderimin de %38'lik oranda olduğunu gözlemlemiş, ancak KOİ giderimini yaklaşık %34, toplam nitrojen giderimi %2 olarak önemsiz addetmişlerdir. Ayrıca, Petala ve ark. (2006) [96] yaptıkları çalışmada ozon konsantrasyonunun, gelişmiş bir arıtılmış belediye atık sularının pilot tesis ozonlama deneyleri sırasında bulanıklık azalmasını güçlü bir şekilde etkilediğini rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada, farklı ozonlama dozajları uygulanan deneylerde, baraj ve kuyu suyu numuneleri üzerindeki fizikokimyasal özellikleri ve Dezenfeksiyon Yan Ürünleri (DBP'ler) üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneylerde artan ozonlama miktarları ile içme suyu parametrelerinden KOİ, sertlik, bulanıklık ve renk parametrelerinin ulusal ve uluslararası kriterleri seviyesine geldiği tespit edilmiştir. Bu deneysel dozlama ve sürelerinde DBP'lerin üretimi önemli ölçüde artmamıştır.

Bu deneysel çalışma sonucunda en dikkat çeken husus içme ve kullanma suyunda fiziksel özelliklerin ozonlama neticesinde önemli derecede iyileşme göstermesidir. Özellikle suyun renk skalası, bulanıklık ve sertlikte iyileşme oranları sırasıyla, % 50, % 50 ve % 25 olarak tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İçme suyunun ozon dezenfeksiyonu, Avrupa'da birçok ülkede ve ABD'de yaygın biçimde tercih edilmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında görüleceği üzere özellikle dirençli organizma Cryptosporidium dahil olmak üzere çok çeşitli patojenlere karşı oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Su dağıtım ağı içinde yeniden oluşmaya karşı koruma sağlamak ve bir kalıntının tespitinin gerekli olduğu durumlarda düzenleyici olarak ozon ve klor birlikte uygulanmaktadır.

Yapılan deneylerde ozonlama süreleri sabit tutulmuş uygun ozon dozajının belirlenmesi ve suyun kalitesinde elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Kimyasal ve fiziksel özelliklerin araştırıldığı deneylerde en belirgin gösterge fiziksel özelliklerdeki iyileşme durumudur. Ozonlama açısından en büyük handikap düşük çözünürlüktür. İyileştirilmiş ozon transfer teknolojileri, bu sürecin maliyet etkinliğini artıracaktır. İçme suları dezenfeksiyonu için uygun dozajın elde edilmesi, bir dizi mevcut modellemenin kullanılması ve içme suyu kalitesi verilerine dikkat edilmesi ile sağlanacaktır.

Bu çalışmada Ozon ve su kalitesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Ozon çok güçlü bir oksidan olduğundan, içme suyu arıtma sürecinde hangi parametrelerin nasıl etkilendiğinin tespiti çok önemlidir. Belirlenen bu parametreler ışığında uygulama süreçleri iyi analiz edilmeli, maksimum fayda anlamında Ozon uygulaması dezenfeksiyon ve kirleticilerin parçalanması açısından nasıl etkilendiği iyi değerlendirilmelidir.

Bu uygulamanın, kabul edilemez seviyelerde dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşmasına ve ardından boşaltılmasına neden olup olmayacağı veya bu sonucun gerçekleşmesi muhtemel ise, bu ilave kirleticilerle başa çıkmak için ilave bir arıtma adımı eklemenin mümkün ve/veya uygun maliyetli olup olmadığı değerlendirilmelidir.

Ozon uygulamaları, bir çok literatür çalışmasında görüleceği üzere etkili dezenfeksiyon uygulaması olduğu sahadaki uygulamalarda kanıtlanmıştır. Kapsamlı araştırma çalışmaları ve saha uygulamaları göstermektedir ki gelişmiş ülkelerde ozonlama ile dezenfeksiyon uygulamalarının daha uygun maliyetli ve insan sağlığına en uygun içme suyu dezenfeksiyon işlemi olduğu görülmektedir. Ozonlama ile dezenfeksiyon uygulamalarında dikkat edilmesi

gereken nokta, ozonlamadan önce veya sonra ek arıtma aşamalarının dahil edilmesinin gerekli olup olmayacağına karar verilmesi ve uygulamanın bu perspektifte planlanmasıdır.

Ozonlama ile protozonların ve bakterilerin kist ve spor formları dezenfekte edilebilir ancak uygulamada sadece ozonlama işlemi yeterli olmayabilir. Ozonlamanın diğer dezenfekte işlemleri ile birlikte uygulanması gerekebilir. Yüksek ozonlama zamanında, patojenler kontrol edilebilir, ancak bu yeterli olmayabilir. Bu durumda mikroorganizmaları içeren su kaynaklarına fiziksel bir bariyer sağlanarak etkili bir dezenfeksiyon sağlanabilir.

İçme suyu sistemlerinde ozonun uygulanmasındaki ana sınırlama, bromatın DBP olarak dezenfeksiyon sonucunda ortaya çıkmasıdır. Bromat oluşumunu kontrol etme yöntemleri, esas olarak pH'ın kontrol edilmesi ve hakim su kalitesi koşullarının anlaşılması yoluyla geliştirilmiştir. Ampirik modeller, bromat oluşumunun tahmin edilip kontrol edilebildiği bir yoldur, ancak bu modeller yalnızca belirli bir su kaynağı için geliştirildiğinde doğrudur.

POU/POE sistemleri: Ticari olarak temin edilebilen iki çeşit ozonlama cihazı vardır, bunlardan biri kullanım noktası (POU-Point of use) diğeri ise giriş noktası (POE-Point of entry) ozonlama cihazıdır. POU/POE sistemleri ana elektrik şebekesinden ozon üretebilen ve dağıtabilen, çoğunlukla Kuzey Amerika'da kullanılan bir yöntemdir. Çökeltilmiş katıların arıtılmış suda bulunmasını önlemek için ozon kullanıldığında ozondan sonra bir filtreleme sisteminin sağlanması gerekir. POU sistemleri için kullanılan filtreleme ve yeterli gaz çıkış kontrolü dikkate alınması gereken en önemli hususlardır. Bu sistemlerde nihai atık suyun ozonlanması da etkilidir. Ancak daha yüksek ozon dozları gerekli olma eğilimindedir, bu da yalnızca maliyeti artırmakla kalmaz, aynı zamanda ürünlerin dezenfeksiyonu olasılığını da artırır. Biyolojik filtrasyon gibi diğer arıtma süreçleriyle entegrasyon, bu yaklaşımın işe yaramasına izin verebilir ve biyolojik ve filtrasyon bazlı arıtmaları ozon arıtma ve dezenfeksiyon ile birleştirerek ozonun Atık Su Arıtma sistemlerinde kullanımına yönelik daha uygun maliyetli bir yaklaşıma doğru gitme potansiyeli sağlar.

Ozon, aktif çamur sistemlerinde filamentli organizmaların spesifik olmayan etkili bir inhibitörü olduğunu göstermiş ve çamurun kabarması ve köpürmesinin etkin bir şekilde uzun vadeli yönetimini sağlamıştır. Bu uygulamayla ilgili sınırlı miktarda literatür olmasına rağmen, bazı literatür çalışmalarında ozonun flok yapısının geri kazanımına ve filamentleri en aza indirmedeki etkinliği görülebilmektedir. Sistem içindeki diğer mikrobiyot üzerindeki

etki ve dolayısıyla nitrifikasyon ve fosfat birikimi üzerindeki etkileri konusunda devam eden tartışmalar vardır. Daha fazla araştırma, süreç etkilerinin aralığını kontrol eden parametreleri aydınlatmaya yardımcı olacaktır.

Çok çeşitli organik ve inorganik kirleticiler ozon tarafından bozunabilir. Toplu doğal organik maddelerin etkili bir şekilde bozunması için yüksek konsantrasyonlarda ozon gereklidir. Ozonun en etkili kullanımı, metallerin ve organik mikro kirleticilerin fiziksel/soğurma işlemiyle birlikte oksidasyonu içindir.

Atık sudaki daha yüksek kirletici ve temizleme yükü, tatmin edici düzeyde giderme/dezenfeksiyon elde etmek için bu sulara çok daha yüksek dozların uygulanması gerektiği anlamına gelir. Küçük ölçekli ve pilot arıtma sistemleri için atık sularda kullanılan birçok ozon örneği vardır, ancak bu kadar yüksek konsantrasyonlarda ozon eklemenin yüksek maliyetleri nedeniyle ozon kullanan büyük su arıtma tesisleri nispeten diğer sistemlere göre azdır.

Yukarıda verilen bilgiler ve deneysel işlemler ışığında görülecektir ki; Ozon, su ve atık su arıtımında ve ayrıca çok sayıda endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır. Ozonun çok çeşitli kirleticileri etkili bir şekilde okside etmek ve geniş bir mikroorganizma yelpazesini dezenfekte etme yeteneği, onu dünya çapında birçok arıtma akış şemasının önemli bir bileşeni haline getirmiştir.

Bu deneysel çalışmada öncelikli olarak uygulama parametreleri belirlenmiş olup, her bir parametre sıra ile sabit tutularak verimsel değerlendirmeler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda ozonun su arıtma performansı üzerindeki etkileri zaman sabit tutularak 1 dakikalık temas süresinde farklı su numunelerine 0,18 – 0,72 μg/L aralığında farklı ozon konsantrasyonları uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen su numuneleri KOİ, Asitlik Derecesi (pH), iletkenlik, renk, bulanıklık, ve sertlik ve diğer bazı içme suyu uygunluk parametreleri ASKİ Laboratuvarında analiz edilmiş ve TSE 266 İçme Suyu Standardına göre değerlendirilmiş ve literatürde yapılan çalışma sonuçları ile sürecin parametrik değerleri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), iletkenlik, pH, renk, bulanıklık, sertlik miktarı ve diğer bazı parametrelerinin ozonlama ile uygun konsantrasyonlarda ve içme suyu için uygulanan ulusal ve uluslararası kritelere haiz olduğu tespit edilmiştir.

Öneriler

Yeryüzünde kişi başına düşen kullanılabilir su miktarının günden güne azalması suyun önemini daha da artırmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte içme ve kullanma suyu temininin ekonomik koşullar dikkate alınarak tekrar kullanılması günümüzde kaçınılmaz hale gelmiştir. Ayrıca su temini sağlanırken insan sağlığını koruyucu etkenlere de özellikle dikkat edilmesi gerekmektedir. Su temini ve insan sağlığı temelinde suyun dezenfeksiyon metodolojilerinden ozon ile dezenfeksiyonun artıları olduğu yapılan araştırmalarda tespit edilmiş ve gelişmiş birçok ülkede hali hazırda kullanılmakta olduğu görülmektedir.

Bu kapsamda, içme ve atık su arıtma sistemlerinde istenmeyen mikroorganizmaların etkisizleştirilmesi için etkin kullanım ağına sahip olan Ozon ile su kalitesi arasındaki etkileşimi iyi anlamak gerekir. Her arıtma aşamasından giren sular ve atıklar için mevcut su kalitesi verileri, ozonlamanın en iyi ve en verimli etkiyi sağlayacak şekilde belirli bir sistem içinde nerede uygulanacağını değerlendirmek önemlidir. Bu amacı gerçekleştirmek için baskın su kalitesi eğilimlerine dayalı basit bir karar-süreç geliştirme sistemi kullanılabilir. İçme suyu dezenfeksiyon işlemleri için uygulanan yöntemlerden Ozonlama ile suyun ulusal ve uluslararası kriterlere göre belirlenen referans değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu kapsamda içme suyu temin edilecek bölgelerde içme suyu arıtma prosesleri için ozonlamanın kullanılabileceği yapılan deneysel çalışmalar ile tespit edilmiş olup, ülkemizde ozonlama dezenfeksiyon işlemi ile içme suyu temini yapılabileceği anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Maddocks, A.; Young, R. and Reig, P. (2015). Ranking the world's most water-stressed countries in 2040. Maddocks A., Young R.S., Relg P. Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040 (2015) World Resources Institute. URL: https://www.wri.org/insights/identifying-global-coal-industrys-water-risks, Son Erişim Tarihi 21.12.2021.

2. Owa, F. W. (2014). Water pollution: sources, effects, control and management. *International Letters of Natural Sciences*, 1(3), 212-214.

3. Yang, Q., Ma, Y., Chen, F., Yao, F., Sun, J., Wang, S., ... and Wang, D. (2019). Recent advances in photo-activated sulfate radical-advanced oxidation process (SR-AOP) for refractory organic pollutants removal in water. *Chemical Engineering Journal*, *378*, 122149.

4. Díaz, M. C., Garrido, S., and Hidalgo, R. (1989). Contaminación agraria difusa. *Madrid, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo*.87,92.

5. Berry, M. J., Taylor, C. M., King, W., Chew, Y. M., and Wenk, J. (2017). Modelling of ozone mass-transfer through non-porous membranes for water treatment. *Water*, *9*(7), 452.

6. Camel, V., and Bermond, A. (1998). The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment. *Water research*, *32*(11), 3208-3222.

7. Zorlugenç, B., Zorlugenç, F. K., Öztekin, S., and Evliya, I. B. (2008). The influence of gaseous ozone and ozonated water on microbial flora and degradation of aflatoxin B1 in dried figs. *Food and chemical toxicology*, *46*(12), 3593-3597.

8. Bidhendi, G. N., Hoveidi, H., Jafari, H. R., Karbassi, A. R., and Nasrabadi, T. (2006). Application of ozonation in drinking water disinfection based on an environmental management strategy approach using SWOT method. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *3*(1), 23-30.

9. Liang, C. J., Xue, Y. S., and Liang, J. J. (2016). The phenomena of spreading ambient ozone at the west coast air basin of Taiwan. *Atmospheric Pollution Research*, *7*(4), 698-705.

10. Henrique, R. D. S. G., Harry, B., Daniel, G., and Antonio, D. L. (2015). UASB reactor effluent disinfection by ozone and chlorine. *Journal of Environmental Science and Health-Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, (12).

11. Andreadakis, A. D., Mamais, D., Gavalakis, E. A., Noutsopoulos, C., Kouris, N., and Nikitopoulos, G. (2010). Removal of taste and odour from potable water by ozone and powdered activated carbon (PAC). *International Journal of Environment and Waste Management*, *5*(3-4), 392-409.

12. Lee, W., Marcotullio, S., Yeom, H., Son, H., Kim, T. H., and Lee, Y. (2021). Reaction kinetics and degradation efficiency of halogenated methylparabens during ozonation and UV/H2O2 treatment of drinking water and wastewater effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 127878.

13. Figueredo, M., Rodríguez, E. M., Rivas, J., and Beltrán, F. J. (2021). Photocatalytic ozonation in water treatment: Is there really a synergy between systems?. *Water Research*, *206*, 117727.

14. Ormad, M. P., Miguel, N., Claver, A., Matesanz, J. M., and Ovelleiro, J. L. (2008). Pesticides removal in the process of drinking water production. *Chemosphere*, *71*(1), 97-106.

15. Rodríguez, A., Rosal, R., Perdigón-Melón, J. A., Mezcua, M., Agüera, A., Hernando, M. D., ... and García-Calvo, E. (2008). Ozone-based technologies in water and wastewater treatment. In *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste*. Berlin: Springer, Heidelberg, 127-175.

16. Turhan, K., and Uzman, S. (2008). Removal of phenol from water using ozone. *Desalination*, *229*(1-3), 257-263.

17. Antoniou, M. G., Hey, G., Vega, S. R., Spiliotopoulou, A., Fick, J., Tysklind, M., ... and Andersen, H. R. (2013). Required ozone doses for removing pharmaceuticals from wastewater effluents. *Science of the total environment*, *456*, 42-49.

18. Amini, A., Kim, Y., Zhang, J., Boyer, T., and Zhang, Q. (2015). Environmental and economic sustainability of ion exchange drinking water treatment for organics removal. *Journal of Cleaner Production*, *104*, 413-421.

19. Wang, Y., Man, T., Zhang, R., Yan, X., Wang, S., Zhang, M., ... and Li, C. (2021). Effects of organic matter, ammonia, bromide, and hydrogen peroxide on bromate formation during water ozonation. *Chemosphere*, *285*, 131352.

20. Glaze, W. H., Peyton, G. R., Lin, S., Huang, R. Y., and Burleson, J. L. (1982). Destruction of pollutants in water with ozone in combination with ultraviolet radiation. II. Natural trihalomethane precursors. *Environmental Science and Technology*, *16*(8), 454-458.

21. Wang, J., and Chen, H. (2020). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*, *704*, 135249.

22. Soltermann, F., Abegglen, C., Gotz, C., and Von Gunten, U. (2016). Bromide sources and loads in Swiss surface waters and their relevance for bromate formation during wastewater ozonation. *Environmental science and technology*, *50*(18), 9825-9834.

23. Jahan, B. N., Li, L., and Pagilla, K. R. (2021). Fate and reduction of bromate formed in advanced water treatment ozonation systems: A critical review. *Chemosphere*, *266*, 128964.

24. Fischbacher, A., Löppenberg, K., von Sonntag, C., and Schmidt, T. C. (2015). A new reaction pathway for bromite to bromate in the ozonation of bromide. *Environmental Science and Technology*, *49*(19), 11714-11720.

25. Guan, C., Jiang, J., Pang, S., Zhou, Y., Gao, Y., Li, J., and Wang, Z. (2020). Formation and control of bromate in sulfate radical-based oxidation processes for the treatment of waters containing bromide: A critical review. *Water Research*, *176*, 115725.

26. Singer, P. C. (1990). Assessing ozonation research needs in water treatment. *Journal-American Water Works Association*, *82*(10), 78-88.

27. Tripathi, S., Pathak, V., Tripathi, D. M., and Tripathi, B. D. (2011). Application of ozone based treatments of secondary effluents. *Bioresource technology*, *102*(3), 2481-2486.

28. Emami-Meibodi, M., Parsaeian, M. R., Amraei, R., Banaei, M., Anvari, F., Tahami, S. M. R., and Mousavi, S. M. J. (2016). An experimental investigation of wastewater treatment using electron beam irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, *125*, 82-87.

29. Fraas, A. G., and Munley, V. G. (1984). Municipal wastewater treatment cost. *Journal of Environmental Economics and Management*, *11*(1), 28-38.

30. Molinos-Senante, M., Hernandez-Sancho, F., and Sala-Garrido, R. (2013). Cost modeling for sludge and waste management from wastewater treatment plants: an empirical approach for Spain. *Desalination and water treatment*, *51*(28-30), 5414-5420.

31. Friedler, E., and Pisanty, E. (2006). Effects of design flow and treatment level on construction and operation costs of municipal wastewater treatment plants and their implications on policy making. *Water research*, *40*(20), 3751-3758.

32. Smith, R. (1968). *Cost of conventional and advanced treatment of wastewaters*. US Department of the Interior, Federal Water Pollution Control Administration, Advanced Waste Treatment Branch, Division of Research, Cincinnati Water Research Laboratory.1546–1574.

33. Gerasimov, G. Y. (2004). Radiation-chemical formation of ozone in an oxygen-containing gas atmosphere. *High Energy Chemistry*, *38*(2), 75-80.

34. Yang, D. M., and Yuan, J. M. (2014). Advanced treatment of sodium acetate in water by ozone oxidation. *Water Environment Research*, *86*(2), 141-146.

35. Ma, J., Li, X. Y., Chen, Z. L., and Qi, F. (2006). Removal of 2-methylisoborneol in drinking water by ozonation. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, *27*(12), 2483-2487.

36. Tehrani-Bagha, A. R., Mahmoodi, N. M., and Menger, F. M. (2010). Degradation of a persistent organic dye from colored textile wastewater by ozonation. *Desalination*, *260*(1-3), 34-38.

37. Mascolo, G., Laera, G., Pollice, A., Cassano, D., Pinto, A., Salerno, C., and Lopez, A. (2010). Effective organics degradation from pharmaceutical wastewater by an integrated process including membrane bioreactor and ozonation. *Chemosphere*, *78*(9), 1100-1109.

38. Zhao, W., Liu, F., Yang, Y., Tan, M., and Zhao, D. (2011). Ozonation of Cationic Red X-GRL in aqueous solution: Kinetics and modeling. *Journal of hazardous materials*, *187*(1-3), 526-533.

39. Sarasa, J., Cortés, S., Ormad, P., Gracia, R., and Ovelleiro, J. L. (2002). Study of the aromatic by-products formed from ozonation of anilines in aqueous solution. *Water research*, *36*(12), 3035-3044.

40. Amat, A. M., Arques, A., Miranda, M. A., and López, F. (2005). Use of ozone and/or UV in the treatment of effluents from board paper industry. *Chemosphere*, *60*(8), 1111-1117.

41. Deng, Y., Li, J., Li, Y., Wu, R., and Xie, S. (2019). Characteristics of volatile organic compounds, NO2, and effects on ozone formation at a site with high ozone level in Chengdu. *Journal of Environmental Sciences*, *75*, 334-345.

42. Wang, Y., Yu, J., Zhang, D., and Yang, M. (2014). Addition of hydrogen peroxide for the simultaneous control of bromate and odor during advanced drinking water treatment using ozone. *Journal of Environmental Sciences*, *26*(3), 550-554.

43. Yu, J. W., Zhao, Y. M., Yang, M., Lin, T. F., Guo, Z. H., Gu, J. N., ... and Han, W. (2009). Occurrence of odour-causing compounds in different source waters of China. *Journal of Water Supply: Research and Technology—Aqua*, *58*(8), 587-594.

44. HUANG, X., MEI, H., DING, G. J., and LU, N. (2010). Bromate formation during ozonation in bromide-containing Huangpu River water. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*. 16(5), 498–502.

45. Von Gunten, U., and Hoigne, J. (1994). Bromate formation during ozonization of bromide-containing waters: interaction of ozone and hydroxyl radical reactions. *Environmental science and technology*, *28*(7), 1234-1242.

46. İnternet: T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı (Aralık, 2013). *Su Arıtma Tesislerinin Tasarım ve İşletme Esasları*, Böl. 9. Web: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/ar%C4%B1tma%20norm%20rehberi/Su%20_aritma_tesislerinin_tasarım_isletme_esaslari.pdf adresinden 12 Ekim 2021'de alınmıştır.

47. Akgiray, Ö., (Haziran 2003). İçme Suyu Arıtma Teknolojileri. *Tesisat Dergisi*, 3-13.

48. Gedikoğlu H. (2021). *Balıkesir İli Merkez İçme Suyu Arıtma Tesisi Su Kalitesinin Yıllık Değişiminin Değerlendirilmesi ve Revizyon Önerileri.* Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, 84-87.

49. Momba, M. N. B., Obi, C. L., and Thompson, P. (2008). *Improving disinfection efficiency in small drinking water treatment plants*. Pretoria, South Africa: Water Research Commission.

50. Skinner, S. J., and Schutte, C. F. (2006). The feasibility of a permeable reactive barrier to treat acidic sulphate-and nitrate-contaminated groundwater. *Water Sa*, *32*(2), 129-136.

51. Abuelgasim, Z. M. A. (2016). *Effect of Dumping Waste Sludge from Mogran Water Treatment Plant (MWTP) on Residual Aluminum in Water and Soil in Blue Nile* (Doctoral dissertation, Sudan University of Science and Technology).

52. Teksoy A. (2006). *İçme Sularından Organik Madde Giderimi ve Trihalometan Oluşumunun Önlenmesi İçin Arıtma Proseslerinin Optimizasyonu*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bursa, 23-27.

53. Gürsakal H. (2007). *İçme suyu arıtma tesisleri yapımında proje yönetimi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 42-43.

54. DIN 2001-1. (2007).Drinking water supply from small units and non stationary plants – Part 1: Small units – Guidelines for drinking water, planning, construction, operation and maintenance of plants; *Technical rule of the DVGW*, Germany.

55. Dölgen, D., Sarptaş ve H., Alpaslan, (2014). *Merkezi İçme Ve Kullanma Suyu Arıtma Sistemlerinde Uygulanan Yöntemlerin Değerlendirilmesi: İzmir Örneği*, TMMOB İzmir Kent Sempozyumu, İzmir, 391-402.

56. Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., and Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design*. John Wiley and Sons.224-228.

57. Dereli Perincek, S. (2006). *An investigation on The Applicability of Ultrasound, Ultra-violet, Ozone and Combination of These Technologies as A Pretreatment Process* (Doctoral dissertation, Ege Üniversitesi, 2006), İzmir.

58. Perincek, S. D., Duran, K., Korlu, A. E., and Bahtiyari, İ. M. (2007). An investigation in the use of ozone gas in the bleaching of cotton fabrics. *Ozone: Science and Engineering*, *29* (5), 325-333.

59. Beşen, B. S. (2012). *Tekstil Terbiyesinde Ozon Uygulamaları İle Sürdürülebilir, Ekonomik ve İnovatif Proseslerin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, 36-52.

60. Kanat, A. (2009). Ultraviyole Işınları İle Suların Dezenfeksiyonu. Birinci Baskı, IX. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiri Kitabı*, 989-1004.

61. Kestioğlu, K. (2001). *Endüstriyel Atıksu Arıtma Tesisi Boyutlandırma Kriterleri*. Bursa, Vipaş Yayınevi, 114-119.

62. Erişmiş, B. (2012). *Tekstil Terbiye İşlemlerinde Ultrason Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 31-35.

63. Bhanushali, D., Kloos, S., and Bhattacharyya, D. (2002). Solute transport in solvent-resistant nanofiltration membranes for non-aqueous systems: experimental results and the role of solute–solvent coupling. *Journal of Membrane Science*, *208*(1-2), 343-359.

64. Rice, R. G. (1996). Applications of ozone for industrial wastewater treatment—a review. *Ozone: science and engineering*, *18*(6), 477-515.

65. Sevimli, M. F. (2000). *Tekstil Endüstrisi Atık Sularından Ozonlama ile Renk Giderimi ve Ozonlamanın Biyolojik Arıtılabilirliğe Etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 102.

66. Uysal, P. (2010). *Ozonun Polilaktik Asit (PLA) Liflerine Etkisi ve PLA Terbiyesinde Ozon Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 20-36.

67. Yıldız, D. (2012). *Tekstil Terbiye İşletmesinde Ozon Kullanımı Entegrasyonu.* Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 15-28.

68. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.solutionozone.com%2Faboutozone%2Fozone-generation%2Fanddate=2019-05-07 Son Erişim Tarihi: 07.05.2019.

69. Kiang, Y. H., and Metry, A. A. (1982). *Hazardous waste processing technology*. United States, Ann Arbor Science, 72-74.

70. Reynolds, T. D., and Richards, P. A. C. (1995). *Unit operations and processes in environmental engineering* (No. 628.162 R333u Ej. 1). PWS Publishing Company.

71. Solsona, F., and Méndez, J. P. (2003). *Water disinfection* (No. PAHO/CEPIS/PUB/03.89). Lima: Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences.

72. Eren, H. ve A., Aniş, P. (2006). Tekstil Boyama Atıksularının Ozonlama ile Renk Giderimi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11 (1).

73. Eren, H. A., Kurcan, P. ve Aniş, P. (2007). Boyarmadde Hidrolizinin Reaktif Boyama Atıksularının Ozonlama İle Renk Giderimine Etkilerinin Araştırılması, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2, 119-125.

74. Muthukumar, M., and Selvakumar, N. (2004). Studies on the effect of inorganic salts on decolouration of acid dye effluents by ozonation. *Dyes and Pigments*, *62* (3), 221-228.

75. Alaton, I. A., Kornmüller, A., and Jekel, M. R. (2002). Ozonation of Spent Reactive Dye-Baths: Effect of HCO 3-/CO 3 2-Alkalinity. *Journal of Environmental Engineering*, *128* (8), 689-696.

76. López-López, A., Pic, J. S., and Debellefontaine, H. (2007). Ozonation of azo dye in a semi-batch reactor: a determination of the molecular and radical contributions. *Chemosphere*, 66(11), 2120-2126.

77. Oguz, E., Keskinler, B., and Çelik, Z. (2005). Ozonation of aqueous Bomaplex Red CR-L dye in a semi-batch reactor. *Dyes and Pigments*, *64* (2), 101-108.

78. Lin, C. C., and Liu, W. T. (2003). Ozone oxidation in a rotating packed bed. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology: International Research in Process, Environmental and Clean Technology*, *78* (2-3), 138-141.

79. Saunders, F. M., Gould, J. P., and Southerland, C. R. (1983). The effect of solute competition on ozonolysis of industrial dyes. *Water Research*, *17* (10), 1407-1419.

80. Ciardelli, G., and Ranieri, N. (2001). The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation. *Water research*, *35* (2), 567-572.

81. Koch, M., Yediler, A., Lienert, D., Insel, G., and Kettrup, A. (2002). Ozonation of hydrolyzed azo dye reactive yellow 84 (CI). *Chemosphere, 46*(1), 109-113.

82. EPA (Environmental Protection Agency), (1999). Wastewater Technology Fact Sheet Ozone Disinfection. Office of Water, Washington.

83. Kim, I., and Tanaka, H. (2010). Use of Ozone-Based Processes for the Removal of Pharmaceuticals Detected in a Wastewater Treatment Plant. *Water Environment Research, 82*(4), 294-301.

84. Petala, M., Samaras, P., Zouboulis, A., Kungolos, A., and Sakellaropoulos, G. (2006). Ecotoxicological properties of wastewater treated using tertiary methods. *Environmental Toxicology: An International Journal, 21* (4), 417-424.

85. Petala, M., Samaras, P., Zouboulis, A., Kungolos, A., and Sakellaropoulos, G. P. (2008). Influence of ozonation on the in vitro mutagenic and toxic potential of secondary effluents. *Water Research, 42*(20), 4929-4940.

86. Gottschalk, C., Libra, J. A., and Saupe, A. (2000). *Ozonation of water and waste water*. England, Wıley Vch, 21-24.

87. Silva, G. H. R., Daniel, L. A., Bruning, H., and Rulkens, W. H. (2010). Anaerobic effluent disinfection using ozone: Byproducts formation. *Bioresource Technology, 101* (18), 6981-6986.

88. Allen, J. G., Beutel, M. W., Call, D. R., and Fischer, A. M. (2010). Effects of oxygenation on ammonia oxidation potential and microbial diversity in sediment from surface-flow wetland mesocosms. *Bioresource technology, 101* (4), 1389-1392.

89. Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., and Alvarez, P. (1997). Impact of chemical oxidation on biological treatment of a primary municipal wastewater. 1. Effects on COD and biodegradability. *Ozone: science and engineering, 19* (6), 495-512.

90. Beltrán, F. J., Encinar, J., and González, J. F. (1997). Industrial wastewater advanced oxidation. Part 2. Ozone combined with hydrogen peroxide or UV radiation. *Water research, 31* (10), 2415-2428.

91. Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., and Álvarez, P. M. (1999). Integration of continuous biological and chemical (ozone) treatment of domestic wastewater: 1. Biodegradation and post-ozonation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology: International Research in Process, Environmental and Clean Technology, 74* (9), 877-883.

92. Beltrán, F. J., García-Araya, J. F., and Álvarez, P. M. (1999). Integration of continuous biological and chemical (ozone) treatment of domestic wastewater: 2. Ozonation followed by biological oxidation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology: International Research in Process, Environmental and Clean Technology, 74* (9), 884-890.

93. Paraskeva, P., and Graham, N. J. D. (2005). Treatment of a secondary municipal effluent by ozone, UV and microfiltration: microbial reduction and effect on effluent quality. *Desalination, 186* (1-3), 47-56.

94. Paraskeva, P., Lambert, S. D., and Graham, N. J. D. (1998). *Influence of ozonation conditions on the treatability of secondary effluents*. Enviromental and Water Resource Engineering, 7-11.

95. Beltran, F. J., Garcia-Araya, J. F., and Álvarez, P. M. (2001). Domestic wastewater ozonation: a kinetic model approach. *Ozone: science and engineering*, *23* (3), 219-228.

96. Park, H. S., Hwang, T. M., Kang, J. W., Choi, H., and Oh, H. J. (2001). Characterization of raw water for the ozone application measuring ozone consumption rate. *Water Research*, *35* (11), 2607-2614.

97. Petala, M., Samaras, P., Zouboulis, A., Kungolos, A., and Sakellaropoulos, G. (2006). Ecotoxicological properties of wastewater treated using tertiary methods. *Environmental Toxicology: An International Journal*, *21* (4), 417-424.



GAZİ GELECEKTİR..