

## DERLEME MAKALESİ

## Dağıtım Şebekesinin Su Kalitesine Etkisi ve Farklı Ülkelerde Şebeke Suyunun İçilebilirliğinin Artırılma Faaliyetleri

Yazışma yazarı: Elif Zeynep DENERİ, deneri@itu.edu.tr

Referans: Deneri, E.Z., Fakıoğlu Kutlu, M., Koşucu, M.M. (2025). Dağıtım Şebekesinin Su Kalitesine Etkisi ve Farklı Ülkelerde Şebeke Suyunun İçilebilirliğinin Artırılma Faaliyetleri, *Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik* (26) 2, 67-86.

Makale Gönderimi: 3 MART 2025  
Online Kabul: 3 TEMMUZ 2025  
Online Basım: 30 TEMMUZ 2025

Elif Zeynep DENERİ<sup>1</sup>, Malhun FAKIOĞLU KUTLU<sup>2</sup>, Mehmet Melih KOŞUCU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-7190-737X

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1475-2249

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-5907-6964

**Özet** Dağıtım şebekelerindeki su kalitesini etkileyen faktörlerin ve şebeke sularının içilebilirliğinin incelendiği bu çalışmada, dağıtım şebekelerinde tat ve kokuya neden olan etkenler arasında olan dezenfektanlar, biyolojik aktiviteler, dezenfeksiyon yan ürünleri ve dağıtım şebekesi malzemelerinden kaynaklanan tat ve kokudan bahsedilmiştir. Bu kapsamda, Uzakdoğu, Avrupa ve Amerika'daki bazı ülkelerde gerçekleştirilen dezenfeksiyon uygulamalarına değinilmiş, ardından Türkiye'deki dezenfeksiyon uygulamaları açıklanmıştır. Çalışmada, su kalitesi iyileştirme teknikleri su kalitesi modelleme, bakiye dezenfektan tespiti ve ara klorlama başlıkları ile özetlenmiştir. Çalışmanın sonuç ve öneriler bölümünde, Türkiye'de İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te belirtilen standartlarla yüksek kalitede arıtılmış suyun dağıtım şebekeleri vasıtasıyla tüketicilere düzenli olarak sunulduğuna, fakat tüketicilerin ekseriyetinin içme suyu kullanımı amacıyla şebeke suyundan ziyade damacana ve plastik şişe sularını tercih ettiğine vurgu yapılmıştır. Ayrıca, Türkiye'deki Sıfır Atık Hedefi kapsamında plastik şişe kullanımının azaltılarak bu şişelerin çevreye verdiği zararları minimize etmek için sebillerin yaygınlaştırılması hem ekonomik hem de ekolojik açıdan önemli bir çözüm olarak sunulmuştur. Bununla birlikte, su kalitesinin sürekli izlenmesi, bakiye dezenfektan konsantrasyonlarının takibi ve ara klorlama yöntemlerinin uygulanması, su dağıtım şebekelerinde yaşanabilecek kalite bozulmalarının önüne geçilebilmesi adına önemli olmakla birlikte hidrolik modelleme araçlarının kullanımı, su kalitesinin zaman ve mekâna bağlı değişimini analiz edilebilmesi için faydalı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** su dağıtım şebekesi, su kalitesi, suyun içilebilirliği

## The Impact of Distribution Network on Water Quality and Activities to Improve the Potability of Network Water in Different Countries

**Abstract** This study examines the factors affecting water quality in distribution networks and the drinkability of tap water, addressing taste and odor issues caused by disinfectants, biological activities, disinfection by-products, and materials in the distribution system. Within this scope, disinfection practices in some countries in East Asia, Europe, and America are discussed, followed by an explanation of disinfection applications in Turkey. Water quality improvement techniques are summarized under the topics of water quality modeling, residual disinfectant detection, and intermediate chlorination. In the conclusions and recommendations section, it is emphasized that high-quality treated water is regularly supplied to consumers through distribution networks in accordance with the standards specified in Turkey's Regulation on Water for Human Consumption. However, it is noted that the majority of consumers prefer bottled water over tap water for drinking purposes. Additionally, as part of Turkey's Zero Waste Goal, reducing plastic bottle use and minimizing their environmental impact by promoting the use of water dispensers is presented as an important solution both economically and ecologically. Moreover, continuous water quality monitoring, tracking residual disinfectant concentrations, and implementing intermediate chlorination methods are highlighted as crucial measures to prevent quality deterioration in water distribution networks. The use of hydraulic modeling tools is also emphasized as a beneficial method for analyzing temporal and spatial variations in water quality.

**Keywords:** water distribution network, water quality, water drinkability

## 1. Giriş

Su dağıtım sistemlerindeki koşullar suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik karakterini belirlemektedir. Su dağıtım şebekesi işletiminde birincil amaç mikrobiyolojik ve kimyasal olarak güvenli su dağıtımını olsa da, estetik açıdan yüksek kalitede suyun tüketicilere ulaştırılması elzemdir. Renk ve koku barındıran su, dünya çapında sağlıksız olarak algılanmakta, tat ve kokunun varlığı, düşük su kalitesinin göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bu sebeple birçok ülke, suyun estetik ve organoleptik kalitesini kontrol etmek amacıyla uyulması zorunlu olmayan ikincil standartlar belirlemiştir (Abhijith & Ostfeld, 2021). Bu bağlamda, arıtma tesisinden dağıtım şebekesine iletilen suyun, organoleptik kalitesinin izlenmesi ve iyileştirilmesi, tüketicinin suya olan algısını oluşturan oldukça önemli bir faktördür.

Dağıtım şebekesinde su kalitesini etkileyen çeşitli faktörler, suyun içilebilirliğini önemli oranda azaltmaktadır. Su arıtma tesisinden çıkan su, dağıtım şebekesinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik reaksiyonlar sonucu kalitesini yitirebilmektedir. Bu faktörler, özellikle tat ve koku sorunlarına yol açabilmektedir. Dağıtım şebekelerinde tat ve kokuya neden olan etkenler arasında biyolojik aktivite, dezenfektanlar, malzeme salınımları ve farklı kaynaklara ait su karışımları yer almaktadır. Örneğin, klor ve kloramin gibi dezenfektanlar suyun tadını etkileyebilirken, ölü noktalar ve biyolojik aktivite de koku sorunlarına yol açmaktadır (AWWA, 2002). Bunların yanı sıra, şebekedeki boruların malzemeleri ve korozyon, suyun metalik bir tat almasına neden olabilmektedir. Ayrıca klorofenoller ve diğer dezenfeksiyon yan ürünleri de koku ve tat sorunlarına yol açabilmektedir. Bu faktörlerin izlenmesi ve yönetilmesi, su kalitesinin korunması açısından önemlidir (Fakioğlu vd., 2018).

Güvenli içme suyu temini, halk sağlığını koruma ve sürdürülebilir kalkınma açısından kritik öneme sahiptir (Hashemi vd., 2022). Dünya genelinde, şebeke su kalitesinin korunmasında kilit rol oynarken, kirlilik ve eskiyen altyapı gibi sorunlar ciddi zorluklar oluşturmaktadır. Su dezenfeksiyon yöntemleri ve uygulamaları ülkelere göre farklılık göstermektedir. Örneğin, Çin hızla artan su talebiyle boğuşurken, Japonya modern teknolojilerle suyu doğrudan içilebilir hale getirmiştir (Kitada ve Saito, 2020). Öte yandan, Güney Kore'de musluk suyu güvenilir bulunmazken, Hollanda dezenfektan kullanmadan güvenli su sağlamaktadır. Türkiye'de ise klorlama en yaygın yöntem olarak görülse de, ülkede suyun kalitesi ve güvenliği konusunda algı farklılıkları bulunmaktadır (Kanat vd., 2022). Bu bağlamda, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, şişelenmiş (ambalajlı) su yerine musluk suyunun tercih edilmesi ve altyapı iyileştirmeleri önerilmektedir.

Su dağıtım şebekesinde su kalitesi takibi için temelde iki çalışma yapılmaktadır: (1) Su kalitesi izleme ve (2) su kalitesi modelleme. Su kalitesi izleme; düzenli izleme (denetleme ve kontrol izlemesi) ve operasyonel izleme olarak yürütülmektedir. Türkiye'de bu süreçler, ilgili yönetmeliklerle belirlenen parametrelere dayanarak yürütülmektedir ve ölçümler, suyun insan sağlığına uygunluğunu temin etmek amacıyla düzenli şekilde yapılmaktadır. Ayrıca, su kalitesini zaman ve mekâna bağlı olarak simüle edebilmek için hidrolik temelli su kalitesi modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller, suyun yaşı, dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu ve kirlenmelerin yayılımı gibi birçok parametrenin analiz edilmesini sağlamaktadır. Su kalitesi modelleme teknikleri hem sistemin

performansını optimize etmek hem de halk sağlığını tehdit edebilecek durumları önlemek için kritik rol oynamaktadır. Su dağıtım sistemlerinde su kalitesini zamana ve mekana göre modellemek için geliştirilmiş birçok ticari yazılım bulunmaktadır. Konuyla ilgili en sık kullanılan yazılımlardan biri ise, Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilmiş olan EPANET'tir.

Bu çalışmada, dağıtım şebekelerinde su kalitesini etkileyen faktörler kapsamlı olarak değerlendirilerek, bu faktörlerin doğru biçimde izlenmesi ve yönetilmesinin önemi vurgulanmıştır. Su kalitesi takibinde izleme ve modelleme çalışmalarının temellerine değinilerek, söz konusu takip ve öngörü yöntemlerinin su kalitesini nihai olarak iyileştirmede kullanımının dağıtım şebekelerindeki su kalitesine katkısı değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında, Türkiye de dahil olmak üzere dünya genelinde dağıtım şebekelerinde su kalitesinin korunmasına yönelik yöntemler detaylı bir biçimde incelenmiştir. Dağıtım şebekelerinde su kalitesinin iyileştirilmesi için önerilen yöntemler ve gelecekte izlenmesi gereken yollar da ayrıca belirtilmiştir.

## 2. Dağıtım Şebekesinde Su Kalitesini Etkileyen Faktörler

İçme suyunun kalitesi, su arıtma tesisi çıkışında kabul edilebilir seviyede olsa dahi, dağıtım şebekesinde meydana gelen çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik dönüşümler neticesinde suyun içilebilirliği azalabilmektedir. Bir dağıtım şebekesinin boru ve depolama tesisleri karmaşık bir sistem olup, kontrolü zor olan bir takım fiziksel, kimyasal ve biyolojik reaksiyonlara bağlı olarak tüketicie ulaşan suyun kalitesini etkilemektedir (Lahlou, 2002). Bu bağlamda tüketicilere sunulan su, yalnızca şebekede uygun basınçla dağıtılmakla kalmamalı, aynı zamanda arıtma tesisinden tüketicie ulaşana kadar dağıtım şebekesi boyunca da kalitesini kabul edilebilir seviyede muhafaza etmelidir. Dağıtım şebekesindeki su kalitesinde ortaya çıkan bozulmalar, suyun organoleptik özelliklerini olumsuz etkileyerek tüketicilerin şikayetlerine yol açabilmektedir. Amerika'da 300 su idaresinde yapılan bir araştırmaya göre, bu idarelerin %65'inde tat ve koku sorunlarının ana nedeni olarak su dağıtım sistemi gösterilmiştir (AWWA, 2002). Bu bağlamda, 2014-2018 yılları arasında ABD'de Michigan'ın Flint şehrinde, dağıtım şebekelerindeki yetersiz dezenfeksiyon neticesinde Legionella bakterisinin yayılması, dağıtım şebekelerinin güvenilirliğinin önemini bir kez daha göstermiştir (Lada, 2023).

AWWA (American Water Works Association) tarafından, şebekelerde tat ve koku oluşumunda etkili olan ana parametrelerin belirlenmesi, kimyasal ve mikrobiyolojik faktörlerin tespiti, su kalitesiyle ilgili hususi sorunlara yönelik potansiyel çözümler geliştirilmesi amacıyla bir kılavuz hazırlanmıştır (AWWA, 2002). Bahsedilen kılavuzda su idarelerinin su kalitesi sorunlarını çözebilmesine veya bu sorunların ortaya çıkmasını engelleyebilmesine rehberlik edilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada tat ve kokuya neden olan faktörler arasında, biyolojik aktivite, dezenfektanlar, dezenfeksiyon yan ürünleri ile sürekli reaksiyonlar, dağıtım şebekesi malzemelerinden (boru, vana vb.) salınan maddeler ve farklı özelliklere sahip suların karışması gibi etkenler sıralanmıştır. Benzer şekilde 2012 yılında küresel ölçekte gerçekleştirilen bir araştırmaya göre, iç tesisat, korozyon ve biyofilm oluşumu, şebeke ile ilgili tat ve koku sorunlarının başlıca nedenleri olarak gösterilmiştir (Omur-Ozbek, 2012).

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

### 2.1. Dezenfektanlar

#### 2.1.1 Klor kaynaklı tat ve koku

Dünya çapında içme suyu şebekelerinde, minimum güvenli bakiye klor seviyesinin 0.2 – 0.5 ppm arasında tutulması tavsiye edilmektedir. Halk sağlığı açısından risk oluşturmayan maksimum bakiye klor seviyeleri ise 4-5 ppm civarındadır (WHO, 2003; USEPA, 2002). Bunun yanı sıra klorun, dağıtım şebekelerinde oluşan biyofilmdeki mikrobiyal karbon ile reaksiyona girerek, önemli bir dezenfeksiyon yan ürünü olan trihalometan (THM) oluşumuna sebep olduğu bilinmektedir (Abokifa vd., 2016). Ayrıca çeşitli içme suyu standartlarına göre mevcut biyofilmde yeni biyokütle oluşumunu engellemek için şebekedeki serbest klor konsantrasyonunun 0.3 - 0.5 ppm civarında tutulması gerekmektedir (Kowalska vd., 2007).

Kloraminin ise diğer klor türlerinden daha düşük seviyede tat ve koku problemine sebep olduğu belirtilmektedir. Bu sebeple ABD'deki çeşitli su sağlayıcılar, şebekede dezenfektan olarak kloramini tercih etmekte ve stabil bir kloramin konsantrasyonu ile şebeke kaynaklı çamaşır suyu benzeri/tıbbi tadın önüne geçebilmektedir (San Francisco Public Utilities Commission, 2021). Öte yandan kloraminin dezenfektan olarak kullanımı neticesinde NDMA gibi kanserojen dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluştuğu bilinmekte olup (Selbes vd., 2018), söz konusu dezenfektanın kullanımında ihtiyatlı olunmalıdır.

#### 2.1.2 Ölü noktalar

Su dağıtım hatlarındaki uç noktalarda, akım hızlarının düşük seviyede olması ve düzensiz tahliyeler nedeniyle şebekede biyolojik aktivite oluşabilmektedir (Faust&Osman, 1998). Aktinomisetlerin önemli büyüme faktörlerinden biri olan besin maddesi, bu mikroorganizmalar tarafından boruların iç yüzeyinde (ve dış kısmında) biriken organik maddelerden temin edilebilir ve bu durum tat ve koku sorunlarının ortaya çıkmasına yol açar. Aktinomisetler, su dağıtım şebekelerinde tat ve koku oluşumuna neden olabilen, genellikle göz ardı edilen bir kaynaktır. Bu mikroorganizmalar, borulardaki durgun bölgelerde sıkça tespit edilmiş ve spor oluşturabilme özellikleri nedeniyle dezenfektanlara diğer bakterilerden daha dirençli oldukları saptanmıştır (Fakioğlu vd., 2018).

#### 2.1.3 Diğer dezenfektanlar

Geçmişte klordioksit (ClO<sub>2</sub>), koku kontrolü, dezenfeksiyon, çözünebilir metallerin oksidasyonu ve TriHaloMetan (THM) oluşumunun azaltılması gibi problemlerin çözülmesinde kullanılmıştır. Ancak son yıllarda, su dağıtım şebekelerinde ortaya çıkan kokuların bu oksidanın varlığıyla ilişkilendirildiği bildirilmiştir (AWWA, 2002). Şebekede meydana gelen klordioksit kaynaklı kokuların zaman zaman ve düzensiz aralıklarla ortaya çıktığı, klor benzeri, gaz yağı ve kedi idrarı kokusuna benzer özellikler taşıdığı belirtilmektedir.

### 2.2. Biyolojik aktivite

Su dağıtım sistemlerinde oluşan tat ve koku sorunlarının %40'ı, mikrobiyal aktivite neticesinde meydana gelmektedir (Zhang vd., 2016). Örneğin insan sağlığı için zararlı olduğu bilinen aktinomisetler (Park vd., 2017), belirli çevresel koşullarda bina iç tesisatlarında tipik toprak ve küflü tatlar ürettiklerinden için su dağıtım şebekelerinde de sorun oluşturabilirler. Aktinomisetler, kauçuk gibi dağıtım şebekelerinde var olması istenmeyen materyallerin üzerinde büyüyebilirler (WHO, 2022). Bu bağlamda, heterotrof koloni sayımı, şebekedeki tat ve koku şikayetlerinin incelenmesinde

Amerika'da yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir (Fakioğlu vd., 2018). Gerber ve Lechevalier'in *Streptomyces* kültüründen izole ettikleri bir bileşik olan Geosmin molekülü, toprak ve küflü kokunun kaynağı olarak tanımlanmıştır. Sonraki çalışmalarla, küf kokusuna yol açan bir diğer bileşik de aktinomiset kültürlerinden izole edilerek 2-metilizoborneol (2-MIB) olarak adlandırılmıştır (Faust&Osman, 1998).

Dağıtım şebekelerinde tat ve koku bileşenlerini üreten başka mikroorganizma türleri de mevcuttur. Örneğin, şebekedeki yüksek kükürlü bileşiklerin başlıca kaynağı tiyobakteriler ve sülfat indirgeme bakterileridir. Hidrojen sülfürün sudaki tat ve koku algı limitinin yaklaşık 0.05 – 0.1 mg/L arasında olduğu belirlenmiştir. Hidrojen sülfürün "çürük yumurta" kokusu, oksijen eksikliği neticesinde bakteriyel aktivite sonucu sülfatın indirgenmesiyle durgun içme suyu dağıtım şebekelerinde ortaya çıkmaktadır (WHO, 2022). Ayrıca, besin maddeleri ve gün ışığının eksikliği nedeniyle su dağıtım şebekeleri alglerin hayatta kalması için ideal koşullar sunmasa da, bazı özel alg türleri borularda yaşamlarını sürdürebilir.

Biyofilmler son 30 yıldır yoğun bir şekilde incelenmiş olmasına rağmen, dağıtım şebekelerindeki biyofilmlerle ilgili sorunlara dair yapılan çalışma sayısı oldukça sınırlıdır (Skjevraak, 2004; Abbaszadegan vd., 2015). Su dağıtım şebekelerindeki biofilm oluşum ve hareket mekanizmalarının anlaşılmasının zorluğu, çalışma sayısının sınırlı olmasında önemli bir rol oynamaktadır (Douterelo vd., 2016). Fakat yeni gelişen biofilm ölçme ve kontrol etme teknolojileriyle birlikte ilgili konudaki çalışma sayısında bir artış olacağı öngörülmektedir (Liu vd., 2016).

### 2.3. Dezenfeksiyon yan ürünleri

Aritılmış içme sularında tespit edilen ilk dezenfeksiyon yan ürünlerinden biri, klor ile fenolün reaksiyonuyla oluşan klorofenollerdir. Meskûn bölgelerdeki içme suyu kullanıcıları, genellikle "iyot" veya "tıbbi" tat nedeniyle şikayetlerde bulunmuşlardır. Bilindiği üzere, 2,4-DCP (diklorofenol), 2,6-DCP ve 2-CP (klorofenol), en yüksek tat ve koku problemine sebep olan bileşiklerdendir (Faust&Osman, 1998). Dağıtım şebekelerindeki mikroorganizmaların bazı durumlarda klorofenoller metilatlayarak klorlanmış anisollerini oluşturduğu bilinmektedir ve bu bileşikler için koku algı limiti görece düşüktür (WHO, 2022).

Aritılmış su kütlesi, arıtma tesisini kabul edilebilir tat ve koku seviyeleriyle terk etse de, eğer içinde eser miktarda (<1 mg/L) fenol barındırıyorsa, su dağıtım sisteminde klorofenollü bileşiklerin oluşması mümkün olabilir. 2,4-DCP (diklorofenol), 2,6-DCP ve 2-CP (klorofenol) bileşiklerinin yüksek tat ve koku problemlerine yol açtığı bilindiğinden arıtma tesisi çıkışındaki su kütlesinde eser miktarda fenol bulunması dahi su tüketicilerinin şikayette bulunmasıyla sonuçlanabilir. Bu bileşiklerin oluşturduğu tat yoğunluğunun pH ile nasıl bir ilişki içinde olduğu da araştırılan bir diğer konudur. Ayrıca, klorlama işlemi sonucunda yoğun tat oluşturan bileşiklerin, amonyak varlığında daha yavaş bir şekilde oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, uygun koşullarda, arıtma tesisinde fark edilmeyebilir. Ancak su tüketicisi tarafından içme suyu tadının "tıbbi" olarak nitelendirilmesi gibi bir soruna yol açabilir (Faust&Osman, 1998).

### 2.4. Dağıtım şebekesi malzemelerinden kaynaklanan tat ve koku

#### 2.4.1 Kaplama malzemesi kimyasalları

Dağıtım şebekelerinde kullanılan materyaller, suda tat ve kokuya sebep olan bir diğer etkidir. Çimento bazlı boru ve

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

kaplamalardan sızan bazı kimyasallar (2,4,6-tribromoanisol, 2,4,6,-tribromofenol, 2,4,6-trikloroanisol ve 2,4,6-triklorofenol gibi) küflü veya tıbbi bir kokuya veya metalik, amonyak benzeri bir kokuya (furan, demir oksit, dietanolamin, dietilenglikol, magnezium oksit gibi) sebep olabilir. Öte yandan, epoksi reçinelerden sızan kimyasallar (stiren gibi) rahatsız edici bir kokuya neden olabilir. Benzer şekilde polietilen, HDPE ve PEX gibi materyallerin kullanılmasıyla suya salınan bisfenol-A gibi bileşikler tıbbi bir koku oluşturabilir (Tombouliau vd., 2004).

### 2.4.2 Boru korozyonu

İçme sularında, dağıtım şebekesinden kaynaklanan çözünmüş inorganik bileşikler nedeniyle oluşan tatlar da sıkça karşılaşılan bir durumdur. Bu çözünmüş inorganik bileşikler sebebiyle içme suyu, genellikle bakır, demir, mangan ve çinko gibi metallerin etkisiyle "acı" ve "metalik" bir tat alır. Bahsedilen metallere ait partiküller, suyun geçtiği bakır ve çelik borulardaki korozyon nedeniyle suya karışır. Özellikle yumuşak ve asidik özellikteki sular için bu durumun geçerli olduğu belirtilmiştir (Faust&Osman, 1998).

## 3. Farklı ülkelerdeki dezenfeksiyon uygulamaları

Güvenli ve temiz içme suyuna erişim, Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri'nin Altıncısı olarak öne çıkmaktadır. Altıncı Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi (SKH6) kapsamında dünya nüfusunun tamamı için su ve sanitasyonun bulunabilirliği ve sürdürülebilir yönetimi sağlanmalıdır. Bu hedefe ulaşmak için küresel ölçekte çalışmalar devam etmektedir (Hashemi vd., 2022).

Tatlı su kalitesinin bozulmasının, insan sağlığı, gıda üretimi, ekonomik kalkınma ve doğal çevre üzerinde olumsuz etkileri olabileceği kuvvetle muhtemeldir. Bu sebeple, tatlı su kalitesinin bozulması küresel bir sorun olarak kabul edilmektedir (Ikhlaq vd., 2014). Günümüzde arıtma tesisleri, isale hatları ve su dağıtım şebekeleri olarak adlandırılan birbirine bağlı altyapı sistemleri aracılığıyla tüketicilere temiz su sağlanmaktadır (Saleem vd., 2019). Bu altyapı sistemlerinin en kritik bileşeni, suyun tüketicilere kabul edilebilir kalite ve uygun basınçta ulaştırılmasını sağlayan su dağıtım şebekeleridir (SDŞ) (Kleiner, 1998; Mian vd., 2019; National Research Council, 2006).

Su kalitesi, SDŞ performansının değerlendirilmesinde dikkate alınan en önemli göstergelerden biridir (Ataoui ve Ermini, 2017; Mercer ve Christensen, 2011). Buna mukabil insan kaynaklı faaliyetler, endüstriyel, tarımsal ve evsel atıksular üreterek tatlı su kaynaklarını çeşitli organik, inorganik ve toksik atıklarla kirletmektedir (Bhutiani vd., 2016). Bu kaynaklardan gelen kirli su, düzgün bir şekilde arıtılmadığında, SDŞ'de su kalitesi sorunlarına (SKS) neden olabilir. SKS, bir veya daha fazla su kalitesi göstergesi için belirlenen eşik değerlerin aşılması olarak tanımlanmaktadır. SKS'nin nedenleri arasında kirletici girişi, biyofilm oluşumu, dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) oluşumu, korozyon ürünlerinin akıma katılması ve toprakta bulunan organik bileşiklerin boru içine girişi bulunmaktadır (Sadiq vd., 2007). Özellikle mikrobiyal kirleticiler, gömülü su borularının çevresinde sıklıkla bulunmakta ve içme suyunda birçok salgın hastalığa yol açabilmektedir (Bereskie, 2017; Hartmann vd., 2020; Mian vd., 2021).

SDŞ'de SKS'nin ortaya çıkmaması için farklı ülkelerde gerçekleştirilen dezenfeksiyon uygulamalarının değerlendirilmesi, SKH6'ya ne derecede ulaşıldığını göstermesi bakımından önem arz etmektedir. Bu kapsamda

Uzakdoğu, Avrupa ve Amerika başlıkları altında bu bölümde muhtelif ülkelerde gerçekleştirilen dezenfeksiyon uygulamaları sunulacaktır. Söz konusu dezenfeksiyon uygulamalarından sonra 3.4 no'lu bölümde Türkiye'de yapılan dezenfeksiyon uygulamalarından bahsedilecektir.

### 3.1. Uzakdoğu

#### 3.1.1 Çin

Çin'deki toplam tatlı su kaynağı hacmi 2,8 trilyon metreküp olup, bu miktar küresel su kaynaklarının %6'sını oluşturarak Brezilya, Rusya ve Kanada'nın ardından dünyada dördüncü sırada yer almaktadır. Ancak, Çin'in su kaynaklarının kişi başına düşen miktarı yalnızca 2000 metreküp olarak tahmin edilmektedir. 2018'de, Çin'deki şehirlerde günlük su tüketimi kişi başına 225 L, kırsal bölgelerde ise 89 L'dir. Bu değerler, Japonya ve ABD'de kişi başına ortalama su tüketimi (>350 L/gün) ile kıyaslandığında son derece düşüktür. Şu anda Çin nüfusunun %59,6'sı şehirlerde yaşamaktadır ve kentleşme ilerledikçe içme suyu talebinin artması beklenmektedir. Çin nüfusunun 2030'da zirveye ulaşması beklenmekte olup, söz konusu yılda yıllık kişi başına düşen su miktarının 1760 m<sup>3</sup>e düşeceği öngörülmektedir. Söz konusu su miktarı, su stres eşiğinin (yılda 1700 m<sup>3</sup>) yalnızca %4 üzerinde (Shi, 2020). Güvenli içme suyu, halk sağlığı ile yakından ilişkilidir. Şu anda, Çin'de rezervuarlarda bulunan su kaynaklarının %5,5'i ve göl su kaynaklarının %16,1'i mevcut yönetmeliklere uygun değildir. (Shi, 2020). Su güvenliği, bir devletin veya bölgenin ihtiyaç duyulan su kaynaklarını ve su kaynaklı ürünleri elde etme yeteneğini ve çevreyi korumak için sürdürülebilir ekolojik uygulamaları sürdürme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Çin'deki su güvenliğinin mevcut durumu incelendiğinde; söz konusu su güvenliği, su kıtlığı, su kaynaklarının hem mekansal hem de zamansal olarak düzensiz dağılımı ve düşük su kalitesi gibi zorluklarla karakterize edilebilmektedir. Bu nedenle, yakın gelecekte Çin'in, suya erişim ve su kalitesindeki yetersizlikler nedeniyle ciddi bir su stresi yaşamaması beklenmektedir. (Shi, 2020).

Çin'deki içme suyu sektöründe ultrafiltrasyon (UF) uygulamalarının mevcut durumunun incelendiği bir çalışmada, hibrit membran süreçlerinin geleneksel arıtma yöntemlerine alternatif olarak kullanımı değerlendirilmiştir. 2004-2022 yılları arasında tamamlanmış veya inşa halinde olan UF projeleri incelenmiş; projelerin coğrafi dağılımı, ölçek ve kapasite gelişimi gibi faktörler analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, UF teknolojisinin Çin'de, gelecekte merkezi olmayan su tedarik sistemleri için önemli bir çözüm olacağı öngörülmüştür. Çalışmadan söz konusu çözüm doğrultusunda, ekonomik zorluk yaşayan kırsal bölgelerde uygulanabilecek bu sistemin merkezi olmayan su teminine katkı sağlayacağı, UF teknolojisinin çok büyük ölçekli içme suyu arıtma tesisine entegre edileceği ve UF tesislerinin modernizasyon ve enerji verimliliği eğilimlerine doğru gelişeceği sonucu ortaya çıkmaktadır (Jia vd., 2023).

İçme suyu dağıtım sistemlerinin stabilitesi ve dezenfeksiyon yan ürünlerinin yönetimi, halk sağlığı güvenliğini sağlamada kritik öneme sahiptir. Zhou vd.'nin 2023 yılında Çin'de yapmış olduğu bir çalışmada, şebeke içerisindeki korozyon ürünleri, mikroorganizmalar ve içme suyu kalitesi arasındaki ilişkilere değinilmiştir. Bununla birlikte, şebeke içerisindeki korozyon yan ürünlerinin dezenfektanların bozulmasını ve zararlı dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumunu nasıl etkilediği anlatılmaktadır. Bakır korozyon yan ürünleri, dezenfektanların bozulmasını hızlandırmakta ve yan ürünlerin oluşumunu katalize etmektedir. Boru cidarlarında oluşan biyofilmler, bakiye klor ile reaksiyona girerek sağlık riskini artıran dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DYÜ) oluşumuna yol açmaktadır. Çalışmada,

endüstriyel bir oksidan olan peroksimonosülfatın (PMS), korozif yapısıyla ilişkili riskler kabul edilmekle birlikte, DYÜ oluşumunu azaltabilen bir dezenfektan olarak kullanılabilir potansiyeli açıklanmaktadır (Zhou vd., 2023).

### 3.1.2 Japonya

Japonya Su İşleri Derneği (JWWA) tarafından 2023 yılında hazırlanan rapora göre, Japonya'da musluk suyuna erişim oranı %98'i aşmıştır ve su kaybı oranı %10'un altına düşürülmüştür. Bu oranlarla Japonya, dünya genelinde en yüksek sıralarda yer almaktadır. Japonya'nın su temini, Su Temini Yasası adı altında düzenlenmiş sıkı standartlara uygun olarak işletilmektedir. Bu standartlar, mikrobiyal ve kimyasal kirleticilerin sıkı kontrolünü içermektedir. Musluk suyu, Japonya'nın büyük bir kısmında doğrudan içilebilir olup su kaynatma gerekliliği bulunmamaktadır. Bu durum, modern arıtma teknolojilerinin ve sıkı denetimlerin bir sonucu olarak kabul edilmektedir. Japonya'da su temininde, yüzeysel sular, yeraltı suları ve deniz suyu arıtımı gibi çeşitli kaynaklar kullanılmaktadır. Özellikle deniz suyu arıtma teknolojisi, kısıtlı kaynaklara sahip bölgelerde etkili bir çözüm olmuştur. Japonya'da kullanılan dezenfeksiyon yöntemleri (1) Klorlama, (2) Kloraminasyon, (3) Ozonlama ve (4) Ultraviyole Işınlama'dır. Dezenfeksiyon öncesinde kum filtrasyonu, aktif karbon filtrasyonu gibi yöntemlerle doğal organik maddeler uzaklaştırılarak dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu azaltılmakta; su arıtma tesislerinde, dezenfektan dozajlarını optimize etmek ve su kalitesini izlemek için dijital teknolojiler kullanılmaktadır. Aynı zamanda, klorlama ve UV ışınlama, aktif karbon ve biyolojik filtrasyon gibi yöntemler bir arada kullanılarak çok yönlü bir dezenfeksiyon sağlanmaktadır. Japonya'da uygulanan yöntemler, su kaynaklı hastalıkların neredeyse tamamen ortadan kaldırılmasını sağlamıştır (JWWA, 2023, JICA, 2024). Dezenfektan olarak klorun kullanımını, suyun tadı ve kokusuyla ilgili şikayetlere neden olmuştur. Bu durum, Tokyo Su İşleri Bürosu'nun su kalitesini iyileştirmek ve klor kokusunu azaltmak için geliştirdiği stratejilere dayanak oluşturmuş, konuyla ilgili Kitada ve Saito (2020)'nin yapmış olduğu bir çalışmada, Japonya'daki içme suyu sistemlerinde klor konsantrasyonunun yönetimi ve klor kokusunun azaltılması hedeflenmiştir. Çalışmada, Tokyo'daki musluk suyu sistemlerinde klor konsantrasyonunun hedef aralıkta tutulması (0,1-0,4 mg/L) ve klor kokusunun azaltılmasını sağlamak için uygulanan yöntemler incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, Tokyo'daki su arıtma tesislerinde ozonlama ve biyolojik aktif karbon kullanımı sayesinde toplam organik karbon (TOK) konsantrasyonu yarıya düşürülmüştür. Bu durum, klor tüketimini ve yan ürün oluşumunu azaltmıştır. Klor kokusunu en aza indirmek için belirlenen hedef aralığa ulaşma oranı 2004 yılında %40 olarak tespit edilirken bu oran 2015 yılında %90'a yükselmiştir. Boruların cidarlarındaki bozulmanın klor tüketimini arttırdığı tespit edildiği için 2012 itibarıyla eski boruların yenilenmesi tamamlanmış, klor tüketiminde düşüş sağlanmıştır. Su dağıtım şebekesinde daha üniform bir klor konsantrasyonu sağlamak için ara noktalarda ek klor enjeksiyon tesisleri kurulması, hedef klor konsantrasyonuna ulaşılması için dijital izleme sistemleri ve otomatik dozaj kontrol teknolojilerinin daha fazla uygulanması çalışmada tavsiye edilmektedir. Ayrıca kullanıcı memnuniyeti sonuçlarına bakıldığında, 2003 yılında %28 memnuniyet gözlenirken bu oran 2014 yılında %49'a yükselmiştir. Bununla birlikte, Tokyo Su İşleri tarafından sağlanan musluk suyunun tadını maden suyuyla karşılaştırmaları için 50.000'den fazla kullanıcıyla yapılan ankete göre, musluk suyunun en az maden suyu kadar lezzetli olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Su kalitesiyle ilgili kamuoyu farkındalığını arttırmak ve tüketici güvenliğini sağlamak için suyun tadı ve kokusuna yönelik

iyileştirme çalışmalarına devam edilmesi önerilmektedir (Kitada ve Saito, 2020).

### 3.1.3 Güney Kore

Güney Kore'de su tedarikinde trihalometanların 1990'da, nehirden fenolün 1991'de, içme suyunda ağır metallerin ve zararlı pestisitlerin 1994'te, ve hastalık yapıcı mikroorganizmaların 1993 ve 1997'de tespit edilmesiyle birlikte Korelilerin su kaynağının güvenliği konusunda endişelenmesine yol açmış; bu durum, vatandaşların musluk suyu tüketimine mesafeli olmasına sebep olmuştur. 2011 yılında yapılan bir anket, Güney Kore'de nüfusun yalnızca %3,2'sinin arıtılmamış musluk suyu içtiğini, bu oranın 2010'da %4,1 olduğunu göstermiştir. Bu durum, çoğu Korelinin içme suyunun kalitesinden memnun olmadığını ve ilgili kuruluşlara güvenmediğini göstermektedir. Pek çok Koreli, musluk suyu içtiklerinde toprak gibi kokması ve balık gibi tat vermesi gibi deneyimlerden şikâyet etmektedir. Aynı zamanda, 2009-2014 yılları arasında şişelenmiş su satışları %96, filtrelerin satışları ise %49 oranında artmıştır. Bu sebeple, artan deniz atıkları aracılığıyla içilmez musluk suyu algısının olumsuz etkileri daha da artmaktadır. (Gschwandtner vd., 2020). Güney Kore'de, nüfusun %99,1'i içilebilir musluk suyu kaynaklarına erişime sahiptir (Güney Kore Çevre Bakanlığı 2020). Güney Kore'de içme suyu kalitesi, ulusal açıdan kritik önem taşıyan bir konudur. Choi vd. (2017) ve Yong vd. (2021)'e göre, ülkede çeşitli faaliyetler için büyük ölçüde Han Nehri, Nakdong Nehri, Yongsan Nehri ve Geum Nehri gibi su kaynakları kullanılmaktadır. Güney Kore'de musluk suyu kalitesini bozan olaylardan en öne çıkanı, Nakdong Nehri'nde 1991 yılında fenol ve 2018'de Per- ve polifloroalkil maddelerin (PFAS) tespit edilmesidir. Bu durum Gumi, Daegu ve Busan şehirlerinin içme suyu kalitesini önemli ölçüde etkilemiştir (Choi vd. 2017; Yong vd. 2021). Diğer önemli olaylar ise 1990 yılında içme suyunda trihalometanlar (THM'ler), 1994'te ağır metaller ve zehirli pestisitler, 1993 ve 1997'de ise hastalık yapan mikroorganizmaların tespitidir. Bu tür olaylar, su temininin güvenliği konusunda ciddi endişelere yol açmıştır (Um vd. 2002; Lee ve Choi 2012; Hashemi vd., 2022). Günümüzde, Kore içme suyu arıtma tesisleri güvenli içme suyu sağlamak için farklı ileri arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Çoğu durumda, su dağıtımından önce patojenleri etkisiz hale getirmek amacıyla dezenfektanlar eklenerek arıtma süreci tamamlanmaktadır (Hashemi vd., 2022). Gschwandtner vd. tarafından 2020 yılında yapılmış bir çalışmada, Güney Kore'nin Guem Nehri Havzası'nda içme suyu temini amacıyla granül aktif karbon (GAK) ve ozon + GAK arıtma sistemlerinin kurulmasının fizibilitesi araştırılmıştır. GAK genellikle filtrasyon sürecine eklenirken, ozonlama ise klor dezenfeksiyon sistemi ile birleştirilerek su içindeki ince partiküllerin uzaklaştırılmasını ve kimyasal reaksiyonların oluşmasını sağlamaktadır. Söz konusu çalışmanın sonuçlarına göre, tüketiciler için en önemli özellik su güvenliği iken, katılımcılar için suyun rengi bir sorun oluşturmamaktadır. Katılımcıların %50-60'ı içme suyunun tat ve kokusunu iyileştirmek için ödeme yapmaya gönüllü olduğunu beyan etmiştir. Granül aktif karbon arıtma sisteminin kurulumu için ortalama ödeme gönüllülüğü aylık 1,78-4,56 ABD doları, ozonlama kurulumu için ise 2,03-5,13 ABD doları arasında değişmektedir. Bu değerler, önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve Güney Korelilerin şişelenmiş su için harcadığı aylık ortalama miktarla karşılaştırılabilir düzeydedir (Gschwandtner vd., 2020).

Güney Kore'nin başkenti Seoul'de Büyükşehir Belediyesi, su kaynağından musluğa kadar olan üretim ve dağıtım sürecinin sistematik kalite denetimi ve yönetimi yoluyla vatandaşlarına güvenli ve sağlıklı su sağlamaktadır. Ayrıca, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen 163 maddeyi içeren su

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

kalitesi denetimleri ve yıllık olarak toplam 130 ek düzenleyici olmayan mikro maddeye yönelik gerçekleştirilen fiili durum araştırmaları ile musluk suyunun güvenliğini kanıtlamıştır. Musluktan doğrudan su içmeyi düşünen kişiler için en büyük caydırıcı unsur olan biyolojik ve dezenfektan kaynaklı kokuları gidermek amacıyla, ham suda alg ve koku arttığında uyarı veren alg ve koku uyarı sistemleri kurulmuş olup, kokuya neden olan maddelere karşı önleyici bir şekilde tepki verilmektedir. Klor kokusunu azaltmak amacıyla Seoul, su temin sürecinin orta noktasındaki su depolarına klor enjeksiyon sistemini uygulamaya koymuştur. Bu sistem, temiz tatlı suya ilişkin yönergelere uygun olarak musluklarda kalan klor seviyesini 0,1~0,3 mg/L aralığında tutmaktadır (Cho, 2017).

### 3.2. Avrupa

#### 3.2.1 İspanya

Doğu İspanya'da bulunan bir içme suyu pompa istasyonunda, serbest klor seviyelerinin optimum düzeyde tutulmasında geçmiş dönemde pH düzeltmesi ve klor ölçümü için kimyasal eklemek amacıyla peristaltik pompalar kullanılmaktadı idi. Bu durum, ısı nedeniyle kimyasal bozulma ve pompa giriş tüplerinin sık bakım ihtiyacı gibi sorunlara sebep olmaktadır. Bu zorlukları aşmak için, su hizmeti şirketi Grundfos ve Badger Meter ile iş birliği yaparak Dijital Enstrüman Dozaj (DED) sistemi uygulanmış, söz konusu sistemde kullanılan sensörler vasıtasıyla işletim verimliliği artmıştır. Kullanılan sensör pH düzeltilmesine veya ek kimyasallara ihtiyaç duymadan sürekli ve hassas serbest klor ölçümleri sağlamaktadır. Sistem, dezenfeksiyon süreçlerinin kesintisiz izlenmesine olanak tanımakta ve operatörlerin sorunlara hızlı bir şekilde müdahale etmesine imkan vermektedir. Kullanılan dijital sistemle otomatik ölçüm ve kontrol sağlanmış olup bu durum modern dijital çözümlerin su arıtma süreçlerini nasıl iyileştirebileceğini ve güvenli içme suyu tedarikini nasıl sağlayabileceğini göstermiştir (URL-1). İspanya'nın Barcelona şehrindeki içme suyu tercihlerinin sağlık ve çevresel etkilerini analiz eden bir çalışmada, içme suyundaki sağlık risklerini (özellikle mesane kanseri) ve çevresel etkileri (ekosistem kaybı, kaynak kullanımı) değerlendirmek için sağlık etki değerlendirmesi ve yaşam döngüsü analizi yöntemlerini birleştirerek modelleme yapılmıştır (Villanueva vd., 2021). Çalışmada, Barcelona nüfusunun içme suyu kullanımı dört farklı senaryoda incelenmiştir: (1) mevcut su tüketim alışkanlıkları, (2) %100 musluk suyu kullanımı, (3) %100 şişelenmiş su kullanımı, (4) %100 filtrelenmiş musluk suyu kullanımı. Çalışma sonuçlarına göre, şişelenmiş su kullanımı, mesane kanseri ile ilişkili trihalometan (THM) maruziyetini en aza indirirken, musluk suyu senaryosu en yüksek sağlık riskini taşımaktadır. Şişelenmiş su üretiminin çevresel etkileri, musluk suyuna kıyasla 1400-3500 kat daha yüksektir. Buna mukabil, kaynak tüketimi ve ekosistem kaybı açısından musluk suyu en sürdürülebilir seçenektir. Filtrelenmiş musluk suyu ise, sağlık risklerini önemli ölçüde azaltırken çevresel etkileri minimumda tutan en dengeli alternatiftir. Araştırmada, şişelenmiş su kullanımını azaltmak ve musluk suyunun kalitesine olan güveni artırmak önerilmektedir (Villanueva vd., 2021).

#### 3.2.2 Hollanda

Hollanda'da klor, birincil dezenfeksiyon için veya dağıtım şebekesinde bakiye dezenfektan olarak kullanılmamaktadır. Hollandalılar musluk suyundaki mikrobiyal güvenlik için ödün vermeden ve klor kullanmadan içme suyu üretimini ve dağıtımını mümkün kılan bir toplam sistem yaklaşımını benimsemişlerdir. Söz konusu sistem, daha önce van der

Kooij vd. (1995, 1999, 2003) tarafından tanımlanmıştır. Bu yaklaşım aşağıdaki öğeleri içermektedir:

- Mikrobiyolojik olarak güvenli yeraltı suyu, suni şarj veya kıyı filtrasyonu gibi toprak geçişli yüzey suları için çoklu bariyerli bir arıtma ile doğrudan yüzey suyu arıtımı sağlanmalıdır.
- Mümkün olduğunca filtrasyon ve UV dezenfeksiyonu gibi yöntemler kullanılmalıdır. Ozon veya peroksit ile oksidasyon da kullanılabilir, ancak klor kullanılmaz.
- Dağıtım sırasında kirleticilerin suya sızması önlenmelidir.
- Biyolojik olarak kararlı (biyostabil) temiz su üretimi yapılmalı ve biyostabil malzemelerin kullanımıyla dağıtım sisteminde mikrobiyal büyüme önlenmelidir.
- Sistem arızalarını zamanında tespit ederek önemli sağlık sorunlarının ortaya çıkmasını önlemek için düzenli izleme yapılmalıdır.

Smeets vd. (2009) tarafından yapılmış bir çalışmada, Hollanda'nın içme suyunda klor kullanmadan mikrobiyal güvenliğin nasıl sağlandığı incelenmiştir. Hollandalıların benimsediği yaklaşıma göre, Hollanda'nın temiz su kaynaklarının seçimi, çoklu bariyer arıtma teknikleri ve biyolojik olarak kararlı temiz su üretimi gibi yöntemlerle mikrobiyal güvenliği koruyarak gerçekleştirilmektedir. Ülkede su kaynağı olarak mikrobiyolojik açıdan güvenli olan yeraltı suyu tercih edilmiştir. Yüzey suyu kullanıldığında ise toprak geçişi ve çoklu bariyer sistemleri uygulanmıştır. Filtrasyon ve UV dezenfeksiyonu gibi fiziksel işlemler, yüzey sularının arıtılmasında ön plandadır. Arıtma işlemi için kimyasal maddenin gerekli olduğu durumlarda ise klor yerine ozon ve peroksit oksidasyonu gibi alternatifler kullanılmıştır. Su dağıtım sırasında biyolojik olarak kararlı temiz su üretimi için biyostabil malzemelerin kullanılması uygun görülmüştür. Herhangi bir sistem arızasını zamanında tespit edebilmek için düzenli izlemeden istifade edilmiştir. Hollanda'nın söz konusu yaklaşımları ve uygulamaları ile dezenfektan bakiyesi olmayan güvenli içme suyunun kullanıcılarına sağlanması mümkün kılınmıştır (Smeets vd., 2009).

#### 3.2.3 İsveç

İsveç'in başkenti Stockholm'de şebeke suyu, yüksek kalitesi ve güvenliğiyle tanınmaktadır. Şehirdeki suyun büyük bir kısmı, yakındaki Mälaren Gölü'nden alınmakta ve Norsborg veya Lovö su arıtma tesislerinde kapsamlı arıtma süreçlerinden geçirilmektedir. Bu süreçler, çeşitli filtrasyon aşamalarını, UV ışığıyla dezenfeksiyonu ve kloramin gibi su kalitesini artırıcı kimyasalların eklenmesini ve arıtma işlemi sırasında ve sonrasında, suyun kalitesini ve güvenliğini kontrol etmek amacıyla düzenli testleri kapsamaktadır. Stockholm'deki şebeke suyu genel olarak güvenli kabul edilse de, 2022 yılında İsveç Gıda Ajansı tarafından yapılan bir araştırmada, birçok İsveçli çocuk ve yetişkinin kanında yüksek seviyelerde kurşun tespit edildiği ortaya konulmuştur. Kurşun, geçmişte su borularının lehimlenmesinde ve boyalarda kullanılmış bir metaldir ve özellikle çocuklarda nörotoksosite gibi sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. İsveç, 1970'lerde su borularında kurşun kullanımını durdurmuş olsa da eski binalarda hala kurşun içeren borular bulunabilmektedir (URL-2). Bununla birlikte, Nieminen tarafından 2020 yılında yapılan bir çalışmada, İskandinav ülkelerindeki içme suyu dezenfektanlarının etkinlik gereksinimleri ve bu gereksinimlerin güncellenmesine yönelik önerilerin incelendiği bir çalışmada, içme suyu arıtma tesislerinde kullanılan dezenfektanların, mevcut uygulanan Avrupa Biyosidal Ürünler Tüzüğü gereksinimlerine uymakta zorlandığı belirtilmiştir. İskandinav ülkelerinde kullanılan dezenfektanlar temel itibarıyla kloramin, klor dioksit ve ozondur. Finlandiya'daki

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

içme suyunun %33'ü ozonla, %50'si ise kloraminle dezenfekte edilmektedir. İskandinav ülkelerinde yüzey sularında yüksek seviyede humik asit bulunur. Bu durum, kimyasal dezenfeksiyon sırasında karsinojenik yan ürünlerin oluşumuna yol açabilir. Bu nedenle, yüzey suları genellikle dezenfeksiyondan önce işlem görmektedir. Kloramin bazlı dezenfektanlar, söz konusu tüzükte belirtilen testleri geçememekte ancak fiiliyatta kullanılmaktadır. Finlandiya, İsveç ve Norveç'teki su kalitesi standartları, AB içme suyu direktifine uyumludur ve bu ülkelerde mikrobiyolojik kalitenin yüksek olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca İskandinav ülkelerindeki içme suyu dezenfeksiyon standartlarının, Avrupa mevzuatıyla uyumlu hale getirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Ancak, bu uyum sürecinde mevcut test koşullarının bölgesel ihtiyaçlara göre yeniden düzenlenmesi gerektiği belirtilmiştir (Nieminen, 2020).

### 3.3. Amerika

#### 3.3.1 Kanada

Kanada'da içme suyu dezenfeksiyonu, halk sağlığını korumak ve içme suyu kaynaklı hastalıkları önlemek amacıyla çeşitli

yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, suyun kaynaktan musluğa kadar güvenliğini sağlamak için entegre bir sistem olan çoklu bariyer yaklaşımı çerçevesinde uygulanmaktadır. Kullanılan başlıca dezenfeksiyon yöntemleri (1) Klorlama, (2) Kloraminasyon, (3) Ozonlama, (4) Ultraviyole (UV) Işınlama'dır. Kanada'da güvenli içme suyu sağlama, halk sağlığını koruma, çevresel etkileri minimize etme ve su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlama hedeflerini içermektedir. Bu hedefler kapsamında Kanada'da uygulanan çoklu bariyer yaklaşımında, içme suyu sisteminin tüm unsurlarını (kaynak suyu, arıtma ve dağıtım sistemleri) kapsayan entegre bir risk yönetim yöntemi söz konusudur. Bu yaklaşım, kaynak suyunun korunması, arıtma süreçlerinin etkili kılınması ve dağıtım sistemlerinin güvenli hale getirilmesiyle temiz, güvenli ve sürdürülebilir su sağlama amacı taşımaktadır.

Kanada Çevre Bakanları Konseyi (CCME) tarafından 2004 yılında hazırlanan bir raporda, Kanada'da güvenli içme suyunu sağlamak için benimsenen çoklu bariyer yaklaşımı açıklanmıştır (CCME, 2004). Çoklu bariyer yaklaşımı bileşenleri Tablo 1'de, uygulama adımları ise Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Çoklu Bariyer Yaklaşımı Bileşenleri (CCME, 2004).

Bileşenler	Açıklamalar
Kaynak Suyu Koruma	Su kaynaklarını kirlenmeye karşı korumak için havza yönetimi yapılır ve kirleticilere karşı tedbir alınır.
Etkili Su Arıtma	Fiziksel, kimyasal ve biyolojik kirleticileri gidermek için çok aşamalı arıtma süreçleri kullanılır.
Güvenli Su Dağıtım	Arıtılmış suyun güvenliğini dağıtım sırasında korumak için boru hatları ve depolar düzenli olarak denetlenir.
İzleme ve Test Etme	Su kalitesi düzenli test edilir ve fiziksel, kimyasal, biyolojik parametreler değerlendirilir.
Acil Durum Müdahale Planları	Beklenmeyen kirlenme olaylarına veya sistem arızalarına hızlı müdahale planları hazırlanır.

Tablo 2. Çoklu Bariyer Yaklaşımı Uygulama Adımları (CCME, 2004).

Uygulama Adımları	Açıklamalar
Havza Koruma Planları	İçme suyu kaynaklarının çevresinde koruma bölgeleri oluşturulur ve bu bölgelerdeki faaliyetler sıkı düzenlemelere tabi tutulur.
Gelişmiş Su Arıtma Teknolojileri	Arıtma tesisleri, en iyi teknolojilerle donatılır ve dezenfeksiyon yan ürünlerini azaltıcı süreçler uygulanır.
Topluluk Katılımı	Halk bilgilendirilir ve içme suyu güvenliği konusunda katılım teşvik edilir.
Denetim ve Sertifikasyon	Tüm içme suyu sistemleri düzenli olarak denetlenir ve bu sistemlerin sağlık standartlarına uygunluğu sertifikalandırılır.

Mian vd. (2021)'nin Kanada'da yapmış olduğu bir çalışmada, içme suyu dağıtım şebekelerindeki dezenfeksiyon yan ürünlerini (DYÜ) ele alarak, içme suyu kalitesini değerlendirmek için yeni bir gri su ayak izi (GSAI) tabanlı çerçeve geliştirilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, yeraltı suyu kaynağı kullanan su kalitesi yönetim stratejilerinde, yüzey suyu kullananlara kıyasla DYÜ oluşumu açısından daha iyi su kalitesinin sağlandığı görülmüştür. Kanada'nın eyaletlerinden biri olan Ontario'da içme suyunun dezenfeksiyonu, suyun kaynağından tüketiciye ulaşana kadar güvenliğini sağlamak amacıyla belirli prosedürler ve düzenlemeler çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Bu prosedürler, suyun etkin bir şekilde arıtılmasını ve dağıtım sisteminde dezenfektan kalıntısının korunmasını hedeflemektedir. Birincil Dezenfeksiyon ile suyun, tüketiciye ulaşmadan önce patojenlerden arındırılması ve İkincil Dezenfeksiyonla ise dağıtım sistemi boyunca dezenfektan bakiyesinin korunması ve suyun yeniden kirlenmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Dezenfeksiyon süreçlerinin etkinliğini sağlamak için su kalitesi düzenli olarak izlenmekte ve gerekli müdahaleler yapılmaktadır (Government of Ontario, 2024).

Kanada'da bulunan liman şehirlerinden biri olan Vancouver'da içme suyu iki aşamalı olarak arıtılmaktadır: birincil arıtım suyun kaynağında gerçekleşirken, ikincil arıtım dağıtım sürecinde suyun kalitesini korumak için uygulanmaktadır. Seymour Capilano Filtrasyon Tesisi, Capilano ve Seymour Rezervuarlarından gelen suyu filtrasyon ve UV ışığı kullanarak artırırken, Coquitlam Su Arıtma Tesisi ozon ve UV ışığı ile arıtım yapmaktadır. Bu farklılık su kaynaklarının jeolojik yapısından kaynaklanmaktadır. Dağıtım sırasında klor, suyun kalitesini korumak için gerektiğinde eklenmektedir (Metro Vancouver, t.y.). Bununla birlikte, bakiye klorun balıklar üzerindeki toksikolojik etkilerine ilişkin yapılmış olan çalışmalara bakıldığında, Brungs (1976) tarafından yapılmış bir çalışmada, daha hassas tatlı su balıklarının (alabalık, somon ve sazangiller) çoğunun 96 saatlik LC50 değerinin toplam kalıcı klor açısından 40 ile 80 µg/L arasında değiştiği sonucuna varılmıştır (Brungs, 1976; British Columbia, 1989). Klorun hassas balıklar üzerindeki söz konusu olumsuz etkileri göz önünde bulundurulduğunda, Vancouver'da klorlama uygulamasının somon balıklarının göç vakitlerinde yapılmadığı anlaşılmaktadır.

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

### 3.3.2 Amerika Birleşik Devletleri

Patel vd. (2020) tarafından ABD'deki içme suyu güvenliği, erişimi ve tüketim trendlerini incelemek amacıyla yapılan bir çalışmada, ABD'deki içme suyu tüketim davranışlarının sağlık üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve içme suyu kalitesiyle ilgili sosyal ve çevresel eşitsizlikler ele alınmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre ABD'deki içme suyu kaynaklarının bazılarının kurşun ve diğer toksik maddelerle kontamine olduğu, özellikle eski boru hatlarındaki kurşun çökelmelerinin, içme suyu kalitesini düşürdüğü görülmektedir. Düşük gelirli topluluklar ve azınlık gruplarının, genellikle daha kötü kalitede suya erişebildiği ülkede bu durum, sadece ekonomik eşitsizliklerin değil, aynı zamanda altyapı yatırımlarındaki dengesizliklerin de bir sonucu olarak görülmektedir. Suyun içme suyu amacıyla tüketiminin artırılması için eğitim ve farkındalık programları uygulansa da insanlar içme suyu yerine genellikle şekerli içecekleri tercih etmekte ve bu da sağlık risklerini artırmaktadır (Patel vd., 2020). Wu vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ABD'deki nokta kullanım su arıtma teknolojilerinin (ör. ters osmoz, UV dezenfeksiyon) etkinliği, yeni teknolojilerin kirlenmeleri giderme konusundaki başarısı, akıllı sistemlere yönelik ihtiyaçlar ve mevcut su kalitesi düzenlemeleri incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre nokta

kullanım sistemleri, içme suyundaki çoğu kirlenme için etkili bir çözüm sunmaktadır ancak bu sistemler genellikle gerçek zamanlı performans izleme özelliklerinden yoksundurlar. Bu sistemlerin kullanımı düşük gelirli aileler için maliyetlidir ve kırsal alanlarda su kalitesi mevzuatına uyumda zorluklara sebep olmaktadır. Söz konusu sistemler, başta kurşun, arsenik ve mikrobiyal kirlenmeler olmak üzere birçok kirlenmeye etkili bir şekilde giderebilmektedir. Ancak, yeni ortaya çıkan kirlenmeler (örneğin PFOS ve PFOA gibi perfloroalkil maddeler) için mevcut teknolojilerin daha da geliştirilmesi gerekmektedir (Wu vd., 2021).

### 3.4. Türkiye

Türkiye'de bulunan içme sularının, kalite parametreleri ve bu parametrelerin limit değerleri Sağlık Bakanlığı tarafından hazırlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik ile belirlenmiştir. Söz konusu yönetmelikte içme suyu arıtımında dikkate alınan mikrobiyolojik ve kimyasal parametreler ile gösterge parametreleri belirlenmiş olup yönetmelikteki değerler AB İçme Suyu Direktifi değerlerine uygundur. Tüketime sunulan içme-kullanma suları söz konusu yönetmeliğe göre Tablo 3'te belirtilen sıklıklarda denetleme izlemesi ve kontrol izlemesine tabi tutulur (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2005).

Tablo 3. Bir dağıtım şebekesinden, bir tankerden sağlanan veya gıda üretiminde kullanılan içme-kullanma amaçlı su için minimum numune alma ve analiz sıklığı (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2005).

Bir su şebekesi bölgesi içinde her gün dağıtılan ya da üretilen suyun miktarı (m <sup>3</sup> ) (Not 1 ve 2)	Her yıl için kontrol izlemesi sayısı (Not 3, 4 ve 5)	Her yıl için denetleme izlemesi sayısı (Not 3 ve 5)
≤ 100	2	1
> 100 ≤ 1.000	4	1
> 1.000 ≤ 10.000	4 + her 1000 m <sup>3</sup> /gün için 3 kontrol izlemesi	1 + her 3300 m <sup>3</sup> /gün için 3 denetim izlemesi
> 10.000 ≤ 100.000	31 + her 1000 m <sup>3</sup> /gün için 3 kontrol izlemesi	3 + her 10.000 m <sup>3</sup> /gün için 1 denetim izlemesi
> 100.000	301 + her 1000 m <sup>3</sup> /gün için 3 kontrol izlemesi	10 + her 25.000 m <sup>3</sup> /gün için 3 denetim izlemesi

**Not 1:** Bir su şebekesi bölgesi içme-kullanma suyunun bir ya da daha fazla kaynaktan geldiği ve içindeki su kalitesinin yaklaşık olarak aynı olduğu coğrafi bölgedir.

**Not 2:** Miktarlar bir takvim yılı üzerinden ortalama olarak hesaplanır. Bakanlık minimum sıklığı, 200 L/gün/kişi olarak varsaymak kaydıyla, su miktarı yerine bir su şebekesi bölgesindeki nüfusun sayısını kullanarak belirleyebilir.

**Not 3:** Aralıklı olarak kısa dönem su verilmesi halinde tankerlerle dağıtılan suyun izleme sıklığı Bakanlık tarafından kararlaştırılır.

**Not 4:** Ek-1 'de yer alan parametreler için, Bakanlık tabloda belirtilen numunelerin sayısını aşağıdaki hususlara göre gözden geçirebilir.

(a) En azından birbirini izleyen iki yıl boyunca alınan numunelerden elde edilen sonuç değerleri değişmez ve Ek-1'de belirtilen limitlerden belirgin biçimde daha iyi ise,

(b) Suyun kalitesinin bozulmasına neden olacak olası bir faktör yoksa azaltılabilir.

Tabloda belirtilen numune sayısının % 50'sinden az olamaz.

**Not 5:** Numunelerin sayısı zaman ve yer bakımından mümkün olduğu kadar eşit olmalıdır.

İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik gereğince içme suyu dağıtım sistemlerinde su kalitesi parametrelerinin düzenli şekilde izlenmesi gerekmektedir. Düzenli izleme -veya bir başka ifadeyle rutin numune alma-, su dağıtım sistemlerindeki su kalitesi parametrelerinin daimi surette ölçülmesi anlamına gelmektedir. Düzenli alınan numunelerin lokasyonu olarak seçilecek noktaların, su dağıtım şebekesinin genelini ve su temin edilen nüfusu iyi temsil edebilmesi önem arz etmektedir. İlgili mevzuata göre Düzenli İzleme ikiye ayrılmaktadır. Bunlar a) Denetleme İzlemesi, ve b) Kontrol İzlemesi'dir. Yönetmeliğe göre Denetleme ve Kontrol izlemeleri, Yönetmeliğin Ek-2 Tablo B1'inde belirtilen asgari şartlara uygun izleme programları ile yapılır ve numune alma noktaları, Ek-2'deki gereklilikleri karşılayacak şekilde yetkili kurumlarca tespit edilir.

**a) Denetleme İzlemesi:** Denetleme izlemesi, insan sağlığını korumak için belirlenen kimyasal, mikrobiyolojik ve radyoaktif parametrelerin sınır değerlere uygun olup olmadığının tespit

edilebilmesi için icra edilmektedir. Bu izleme türünde, ilgili yönetmeliğin ekinde bulunan Ek-1'deki tüm parametreler dikkate alınır ve içme-kullanım suyunda düzenli surette bu parametreler için belirlenmiş olan sınır değerlerin ihlal edilip edilmediği denetlenir. Denetleme izlemesi, su kalitesinin sürekliliğini sağlamak ve özellikle suda oluşabilecek her türlü kirlenmenin ve kalite bozulmasının tespit edilebilmesi açısından önem taşımaktadır. Denetleme izlemesinde ölçülen parametreler ve bunların sınır değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

**b) Kontrol İzlemesi:** Kontrol izlemesinin amacı, tüketime sunulan suyun temel organoleptik (tat, koku, renk gibi algılanan), mikrobiyolojik kalitesini ve arıtma etkinliğini düzenli olarak değerlendirmektir. Bu izleme türü vasıtasıyla, dezenfeksiyon ve diğer arıtma işlemlerinin yeterliliğinin gözlenmesi ve suyun hijyen standartlarına uygunluğunun sağlanıp sağlanmadığının belirlenebilmesi mümkün olmaktadır. Özellikle, içme-kullanma suyu sağlanan bölgelerde kontrol izlemesi, suların tüketiciye ulaştığı noktada

insan sağlığını tehdit edebilecek herhangi bir unsur taşımamasının teminat altına alınabilmesinde etkili

olmaktadır. Kontrol izlemesinde test edilen parametreler Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Denetleme İzlemesi gerçekleştirilirken ölçülen su kalitesi parametreleri (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2005).

Parametre	Sınır Değer	Birim
<i>Escherichia coli</i>	0	mL
Enterokok	0	mL
Koliform Bakteri	0	mL
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0	mL
Anaerob sporlu sülfid redükte eden bakteriler	0	mL
Patojen Stafilokoklar	0	mL
Parazitler	0	L
Akrilamid	0,1	µg/L
Antimon	5,0	µg/L
Arsenik	10	µg/L
Benzen	1,0	µg/L
Benzo[a]piren	0,01	µg/L
Bor	1,0	mg/L
Bromat	10	µg/L
Kadmiyum	5,0	µg/L
Krom	50	µg/L
Bakır	2,0	mg/L
Siyanür	50,0	µg/L
1,2-dikloreten	3,0	µg/L
Epikloridin	0,1	µg/L
Florür	1,5	mg/L
Kurşun	10,0	µg/L
Cıva	1,0	µg/L
Nikel	20,0	µg/L
Nitrat	50,0	mg/L
Nitrit	0,5	mg/L
Pestisitler	0,1	µg/L
Toplam Pestisitler	0,5	µg/L
Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar	0,1	µg/L
Selenyum	10,0	µg/L
Tetrakloretilen ve trikloretilen	10,0	µg/L
Toplam Trihalometan	100,0	µg/L
Vinil Klorür	0,5	µg/L

Tablo 5. Kontrol İzlemesi gerçekleştirilirken ölçülen su kalitesi parametreleri (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, 2005).

İçme-Kullanma Suları	İçme Suları	Kaynak Suları*	Notlar
Renk	Renk	Renk	
Bulanıklık	Bulanıklık	Bulanıklık	
Koku	Koku	Koku	
Tat	Tat	Tat	
İletkenlik	İletkenlik	İletkenlik	
Hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH)	Hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH)	Hidrojen iyonu konsantrasyonu (pH)	
Nitrit			Not 3
Amonyum	Amonyum	Amonyum	
Alüminyum	Alüminyum		Not 1
Demir	Demir		Not 1
<i>C. perfringens</i> (Sporlar dâhil)	<i>C. perfringens</i> (Sporlar dahil)	<i>C. perfringens</i> (Sporlar dahil)	Not 2
<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i>	
Koliform bakteri	Koliform bakteri	Koliform bakteri	
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>P. aeruginosa</i>	
	22 ve 37 °C'de koloni sayımı	22 ve 37 °C'de koloni sayımı	

\*Kaynak sularında, demir, kükürt, mangan ve arseniğin ozonla zenginleştirilmiş hava kullanılarak ayrıştırılması halinde, ozon, bromat ve bromoform parametrelerine, aktif alüminyum kullanılarak florürün ayrıştırılması halinde florür parametresine de bakılır.

- Not 1:** Yalnızca arıtmada kullanıldığında gereklidir. Diğer tüm durumlarda, parametreler denetleme izlemesine dâhil edilir.
- Not 2:** Suyun sadece yüzey suyundan alınması ya da yüzey suyundan etkilenmesi halinde gereklidir. Diğer tüm durumlarda, parametreler denetleme izlemesine dâhil edilir.
- Not 3:** Dezenfeksiyon yöntemi olarak kloraminasyon kullanıldığında gereklidir. Diğer tüm durumlarda, parametreler denetleme izlemesine dâhil edilir.

Türkiye'deki içme suyu dezenfeksiyonunda en yaygın kullanılan yöntem klorlama olup, düşük maliyeti ve şebeke boyunca dezenfeksiyon etkisinin devam etmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak klorlama, su kaynaklarında bulunan doğal organik maddelerle reaksiyona girerek trihalometanlar (THM) ve haloasetik asitler (HAA) gibi dezenfeksiyon yan

ürünlerinin (DYÜ) oluşmasına yol açmaktadır. Özellikle İstanbul'da yapılan çalışmalar arasından Büyükçekmece Gölü su kalitesi üzerinde yapılan bir çalışmada, bromür iyonlarının varlığının THM oluşumunu bromlu türe dönüştürerek artırdığı gözlemlenmiştir (Uyak ve Toröz, 2007). Alternatif bir yöntem olarak ozonlama, klorlama yerine

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

bazı arıtma tesislerinde ön oksidasyon amacıyla uygulanmaktadır. Ömerli Arıtma Tesisinde bu yöntem kullanılarak organik maddenin oksitlenip THM oluşumunun azaltılması amaçlanmaktadır. Ozonlama, güçlü oksidasyon potansiyeline sahip olmasına rağmen, şebeke boyunca kalıcı bir dezenfeksiyon sağlamadığı için sınırlı bir kullanım alanına sahiptir (Uyak vd., 2008).

Mikrokirleticiler (MK), farklı çevresel ortamlarda ve canlı organizmalarda iz miktarlarında bulunmaları nedeniyle tanınmakta ve karakterize edilmektedir. Yaygın olarak bilinen MK grupları, ekolojik çevreler için potansiyel tehdit oluşturabilecek farmasötikler, kişisel bakım ürünleri, pestisitler, uyarıcılar, iz metaller (İM), kalıcı organik kirleticiler, mikro ve nanoplastikler ve yapay tatlandırıcıları içermektedir (Petrie vd., 2015). Bugüne kadar, bilim insanlarının çoğu, atıksu arıtma tesislerini su kütlelerinde MK'lerin ana kaynağı olarak tanımlamıştır (Abbasi vd., 2022). Selek (2020)'in yaptığı bir çalışmada, Türkiye genelinde yıl boyunca dört defa 283 adet yüzey suyundan numune alınarak sahaya özgü bir izleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen bulgulara göre, Türkiye'nin yüzey suyu kaynaklarında mikro kirleticiler açısından bir baskı olsa bile, geleneksel parametreler açısından sorunun daha baskın olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, sahaya özgü jeolojik

oluşumdan kaynaklanan ağır metal konsantrasyonları, Türkiye'nin yüzeysel içme suyu kaynaklarında tespit edilmiştir. Wang vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, ağır metaller ve mikrokirleticilerin bölgede yaşayan insanların içme suyu güvenliğini tehlikeye attığı belirtilmiştir. Bu sebeple ağır metal ve mikrokirletici içeren suların içme suyu amacıyla tüketiminde çekinceler olması kaçınılmazdır

Türkiye'nin en kalabalık şehir olan İstanbul'da (2024 yılı tahmini nüfusu 15.815.231 kişidir) 2023 yılında, 24 adet içme suyu arıtma tesisinden yaklaşık 16 milyon kişiye 1 milyar 117 milyon m<sup>3</sup> su sağlanmış olup günlük ortalama su tüketimi 3.060.450 m<sup>3</sup>tür. Kaynaklardan toplanıp içme suyu arıtma tesislerinde arıtılan su yaklaşık 23.000 km'lik bir şebeke ağı ile şehre verilmektedir.

Şehrin her yıl artan su talebinin karşılanması için yatırımlarına devam eden İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ), İstanbul'un önemli su kaynaklarından olan Terkos Gölü'nden aldığı ham suyu İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisine taşımaya hedeflenen Terkos İkitelli Ø2500 mm'lik İsale Hattı'nı hizmete almıştır. İSKİ 2023 faaliyet raporuna göre İstanbul'da bulunan içme suyu arıtma tesislerinde kullanılan üniteler ve dezenfeksiyon işlemleri Tablo 6'da özetlenmektedir (City of İstanbul, 2024) (İSKİ, 2024).

Tablo 6. İstanbul'daki İçme Suyu Arıtma Tesislerinde Bulunan Üniteler ve Uygulanan Dezenfeksiyon İşlemleri (İSKİ, 2024).

İçme Suyu Arıtma Tesisi	Kapasitesi (m <sup>3</sup> /gün)	Üniteleri ve Uygulanan Dezenfeksiyon İşlemi
İkitelli İçme Suyu Arıtma Tesisleri	800.000	kaskat havalandırma, ince ızgara, <b>ön ozonlama</b> , hidrolik karışımı sağlayan koagülasyon ve flokülasyon ünitesi, yukarı akışlı çamur battaniyeli durultucu, <b>ara dezenfeksiyon</b> , hızlı kum filtresi ve <b>son dezenfeksiyon</b>
Cumhuriyet İçme Suyu Arıtma Tesisleri	720.000	kaskat havalandırma, <b>ön dezenfeksiyon</b> , mekanik karışım sağlayan koagülasyon ve flokülasyon ünitesi, lamellalı durultucu, <b>ara dezenfeksiyon</b> , hızlı kum filtresi ve <b>son dezenfeksiyon</b>
Büyükçekmece İçmesuyu Arıtma Tesisi	400.000	ince ızgara, <b>ön dezenfeksiyon</b> , kaskat havalandırma, hidrolik olarak karışım sağlayan koagülasyon ve flokülasyon ünitesi, yukarı akışlı ve çamur yataklı durultucu, <b>ara dezenfeksiyon</b> , hızlı kum filtresi ve <b>son dezenfeksiyon</b>
Elmalı İçmesuyu Arıtma Tesisi	40.000	<b>ön ozonlama</b> , birleşik sistem koagülasyon – flokülasyon – durultucu ünitesi, hızlı kum filtresi ve <b>son dezenfeksiyon</b>
Taşoluk İçmesuyu Arıtma Tesisi	100.000	Kaskat havalandırma, ızgara, <b>ön ozonlama</b> , hidrolik koagülasyon ve flokülasyon ünitesi, yukarı akışlı çamur battaniyeli durultucu, <b>ara dezenfeksiyon</b> , hızlı kum filtresi ve <b>son dezenfeksiyon</b>

2023 yılında İSKİ'de dezenfeksiyon amacı ile kullanılan toplam kimyasal miktarları Tablo 7'de gösterilmektedir. İstanbul'da içme suyu arıtma tesislerinde arıtılan ve şebeke sistemine verilen su, ulusal ve uluslararası standartlara uygundur. Suyun kalitesinin sürekliliğini sağlamak için rutin olarak ham su kaynaklarından, içme suyu arıtma tesislerinden ve şebeke sularından numune alınarak su kalitesi 7 gün 24 saat esasına uygun bir şekilde izlenmektedir. Su kalitesini izlemek için standartlara uygun numune alınmakta ve TS EN ISO/IEC 17025'e göre akredite olan İSKİ laboratuvarlarında fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik analizler yapılmaktadır. Hazırlanan Su Kalitesi raporları aylık bazda İSKİ web adresinde yayınlanmaktadır. 96 adet parametreden akredite olan İSKİ laboratuvarlarında, 176 adet parametre analizi yapılabilmektedir. 2023 yılında laboratuvarlarda rutin olarak su kaynakları (göl, baraj ve nehir), içme suyu arıtma tesisleri, şebeke, vakıf sular, İSKİ kuyu, İSKİ depo, deniz suları, sanayi aboneleri sorumluluğundaki kuyu suyu, ücretli analizler, kaynak suyu, okul, şebeke-depo ve şikâyet üzerine alınan toplam 27.163 numune 263.708 parametre çalışılmıştır (İSKİ, 2024).

Tablo 7. 2023 yılında arıtma tesislerinde dezenfeksiyon için kullanılan toplam kimyasal madde miktarları (İSKİ, 2024).

Türü	Miktarı (ton/yıl)
Ortalama Ozon	390
Ortalama Mayi Klor	4.940
Ortalama Sodyum Hipoklorit	1.390

İstanbul'da içme suyu arıtma tesisinden çıkan sular, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'e uygun ve dünya standartlarında içilebilir durumdadır (İSKİ, 2024). Temiz ve güvenilir suyun şebekeye aktarılması için gerekli bakiye klordan kaynaklı muslukta oluşan koku ve insanların tüketim alışkanlıkları gibi sebepler göz önünde bulundurulduğunda, İstanbul'daki tüketicilerin büyük bir kısmının musluk suyunu içme suyu olarak tüketmeyi tercih etmediği bilinmektedir. Söz konusu tüketiciler içme suyunu damacana, plastik şişe ve musluk suyu arıtma sistemleri ile temin etmektedirler. Bu durumda artan plastik kullanımı atık üretiminde de artışa sebep olmaktadır.

Tarkan (2010), İstanbul'un Ömerli Barajı'nı besleyen altı akarsuyun su kalitesi, fiziksel habitat özellikleri ve bazı biyolojik parametreler üzerindeki etkilerini incelediği bir çalışmada, Haziran 2005 ve Temmuz 2006 tarihleri arasında aylık olarak, akarsuların 12 farklı noktasından su örnekleri toplamış ve 15 fiziksel ve kimyasal değişkeni analiz etmiştir. Çalışmada, akarsu genişliği, akım hızı ve klorofil-a en önemli parametreler olarak belirlenmiştir. Özellikle toplam fosfat, ortofosfat, nitrit ve çözülmüş oksijen değerleri, akarsudaki su kalitesini etkileyen başlıca faktörler olarak öne çıkmıştır. İnsan etkileri, arazi kullanımı ve jeolojik yapıların, akarsuyun kimyasal özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Paşaköy Deresi, Ömerli Barajı'nı olumsuz etkileyen en kirliliğe sahip akarsu olarak tanımlanırken, Riva Deresi'nin de ciddi kirlilik sorunlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer akarsular ise nispeten daha temizdir. Akarsularda 25 zooplankton türü tanımlanmış ve analizler sonucunda nitrat, nitrit, ortofosfat, klorofil-a, pH, su sıcaklığı, askıda katı madde, oksijen ve akarsu genişliğinin zooplankton çeşitliliğini etkileyen en önemli faktörler olduğu belirlenmiştir. Özellikle Paşaköy ve Riva derelerinde, ötrofikasyon indikatör türleri olan *Bosmina longirostris* ve *Keratella cochlearis* gibi türlerin baskın olduğu tespit edilmiştir.

Nadiroğlu (2014) hazırladığı tez çalışmasında, Ankara'nın kuzeyinde bulunan bir bölgenin su dağıtım şebekesinin dezenfeksiyon kapasitesini değerlendirmiştir. Su kalitesini etkileyen temel parametreler; boru cidarı reaksiyon hız sabiti ( $k_c$ ), ana akım reaksiyon hız sabiti ( $k_a$ ), klor konsantrasyonu ve suyun düşüm noktalarına erişme süresi olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bulgularına göre, klor konsantrasyonu üzerindeki en önemli etken suyun düşüm noktalarına erişme süresidir. Uzun erişme süreleri klor konsantrasyonlarının düşmesine neden olmaktadır. Sürekli çalışan tek bir pompa ile sistemde enerji verimliliğinin sağlanması hedeflenmiştir, ancak enerji maliyetini en aza indiren optimum pompa programında klor seviyelerinde daha büyük düşüşler gözlemlenmiştir. Sistemin performansını iyileştirmek için ölü noktaların kaldırılması, boru döngülerinin oluşturulması önerilmektedir. Sezonluk değişimler de göz önünde bulundurularak klor konsantrasyonlarının düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının sürdürülebilir seviyelerde tutulması için pompa çalışma programlarının ve reaksiyon hız sabitleri gibi sistem parametrelerinin önemli vurgulanmıştır.

Koç (2014) yapmış olduğu tez çalışmasında su dağıtım şebekelerinin dezenfeksiyon kapasitesini etkileyen sistem parametrelerini incelemiştir. Özellikle pürüzlülük katsayısı (Hazen-Williams pürüzlülük katsayısı), boru cidarı reaksiyon hız sabiti ( $k_c$ ), ana akım reaksiyon hız sabiti ( $k_a$ ) ve su sızıntı miktarı gibi faktörlerin klor konsantrasyonu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma kapsamında, Ankara'nın kuzeyinde bulunan bir bölgede DMA'lara (İzole Ölçüm Bölgeleri) bölünmüş su dağıtım şebekelerinde su kalitesi modellenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, tank ile su alışverişi olan bölgelerde pürüzlülük katsayısının artması klor konsantrasyonlarını azaltmaktadır. Buna karşılık, tank ile su alışverişi olmayan bölgelerde cidar ve ana akım reaksiyon hız sabitleri, klor konsantrasyonunu en çok etkileyen parametreler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, su sızıntı miktarının artmasının klor konsantrasyonundaki düşüşü yavaşlattığı, azaltılmasının ise su yaşının artması dolayısıyla klor konsantrasyonundaki azalmayı hızlandırdığı gözlemlenmiştir. Şebekenin DMA'lara ayrılması, su kayıplarını tespit edebilmek, sistemin daha kolay yönetilmesini sağlamak ve şebekenin doğru modellenmesine önayak olmak gibi avantajlar taşımaktadır. Çalışmanın sonunda, su kayıplarının azaltılması için basınç yönetimi ve izolasyon vanalarının kullanımı

önerilmiş; cidar ve ana akım reaksiyon hız sabitlerinin düzenli olarak izlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca Koç (2014), teşkil edilen DMA'larda alt bölgelerin ayrı ayrı analiz edilmesinin, su kalitesi yönetiminin etkin bir şekilde yapılmasını mümkün kıldığını vurgulamıştır.

Güner (2020) tarafından yürütülen doktora çalışmasında 2017 yılında İstanbul'daki içme suyu kalitesi parametreleri incelenmiştir. Bahsedilen çalışmada İstanbul'un 39 ilçesinde su dağıtım şebekesinin muhtelif noktalardan numune alınarak denetim ve kontrol izlemesi yapılmıştır. Bu izleme faaliyeti sırasında İstanbul'un 39 ilçesinden toplam 548 noktadan 149149 adet bakiye klor ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu 149149 ölçümün 610'unda bakiye klor konsantrasyonunun izin verilen minimum değerinin altına indiği görülmüştür. Ölçümlerin % 99.59'unda ise herhangi bir bakiye klor konsantrasyonu eksikliğine rastlanmamıştır.

Tuluk ve Orhan (2017), Erzurum'da şebeke suyu ile piyasada satılan şişelenmiş doğal kaynak sularının fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kalite parametrelerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Şebeke suyu verileri Erzurum Su ve Kanalizasyon İdaresi'nden (ESKİ) alınırken, şişelenmiş kaynak suları üzerindeki analizler üretici etiketleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, her iki su kaynağının da ulusal ve uluslararası standartlara uygun olduğunu, dolayısıyla insan sağlığı açısından güvenli ve içilebilir nitelikte olduğunu göstermiştir. Çalışmada, musluk suyunun pH, elektrik iletkenliği, klorür, sülfat, sodyum, alüminyum, demir ve mangan değerlerinin şişelenmiş kaynak sularına kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle musluk suyunda pH ortalama 8,12 olarak ölçülmüşken, şişelenmiş sular da bu değer 7,42 olarak bulunmuştur. Ayrıca, şebeke suyunun elektrik iletkenliği değeri ortalama 242,22  $\mu\text{S/cm}$  iken, şişelenmiş sular da bu değer 98,29  $\mu\text{S/cm}$ 'dir. Benzer şekilde, şebeke suyundaki klorür, sülfat ve sodyum değerleri sırasıyla 27,01 mg/L, 15,21 mg/L ve 19,92 mg/L olarak ölçülürken, şişelenmiş sular da bu değerler 2,36 mg/L, 5,58 mg/L ve 3,06 mg/L olarak tespit edilmiştir. Alüminyum ve demir içerikleri şebeke suyunda daha yüksek çıkmış, ancak her iki su kaynağındaki ağır metal konsantrasyonlarının kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre hem musluk suyu hem de şişelenmiş kaynak suları koliform bakteri, *Escherichia coli* ve *C. Perfringens* gibi mikroorganizmalar açısından temiz bulunmuştur. Ancak, bazı şişelenmiş su markalarının etiketlerinde mikrobiyolojik analiz sonuçlarının yer almaması, tüketici bilgilendirmesi açısından eksiklik olarak değerlendirilmiştir. Genel olarak, şişelenmiş doğal kaynak sularının kirlenmeye karşı yüzey sularına göre daha doğal bir koruma sağlaması nedeniyle, kalite parametrelerinin musluk suyuna kıyasla daha düşük seviyelerde olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak, musluk suyu ve şişelenmiş doğal kaynak suları arasında fiziksel ve kimyasal parametreler açısından anlamlı farklar bulunmasına rağmen, her iki su kaynağı da güvenli içme suyu standartlarını karşılamaktadır. Çalışma, tüketicilerin bilinçli su tercihleri yapabilmesi için şişelenmiş su etiketlerinin güncel ve detaylı analiz bilgilerini içermesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Aydın ve Şirin (2019), Adana'da gerçekleştirilen çalışmada, halkın belediye tarafından temin edilen şebeke suyu içme tercihlerini ve kullanım noktası su arıtma sistemlerindeki filtre değişimi farkındalığını değerlendirmeyi amaçlayarak 5.139 kişiyle (kadınların oranı %44, erkeklerin oranı %56) görüşmüştür. Katılımcıların çoğunluğu, filtrelenmiş veya şişelenmiş su yerine şebeke suyunu tercih ettiğini belirtmiştir. Filtrelenmiş su kullanıcıları, bu su kaynağını suyun patojenlerden arındırılmış ve koku, tat ve renginin değiştirilmiş olması sebebiyle tercih ettiklerini ifade etmiştir. Tüketicilerin

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

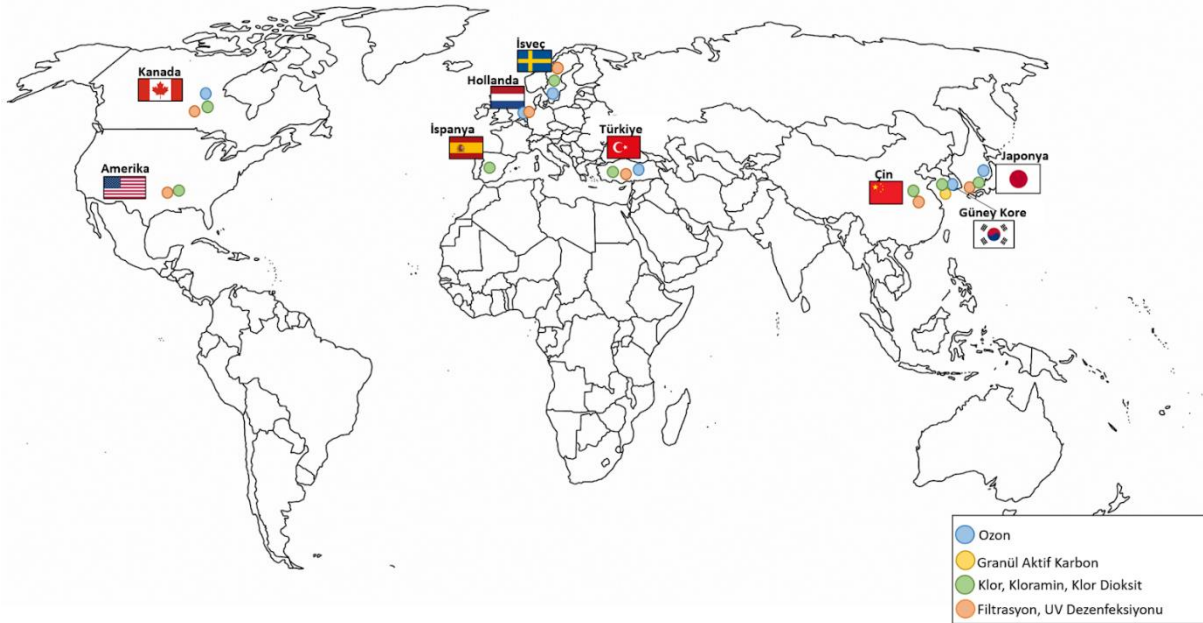
yaşı arttıkça şişelenmiş ve filtrelenmiş su kullanımı artarken, şebeke suyu kullanımı azalmıştır. Cinsiyet açısından bakıldığında, erkeklerin şebeke suyu içmeyi kadınlara oranla daha fazla tercih ettiği görülmüştür. Eğitim düzeyi ve gelir arttıkça şebeke suyu tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Karakaş Ulusoy (2024) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de şişelenmiş su kullanımından şebeke suyu kullanımına dönüşün sürdürülebilir kalkınma açısından önemi incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, Türkiye'de şebeke suyunun yeniden içilebilir hale getirilmesi sağlanarak şişelenmiş su kullanımının azaltılmasını değerlendirmektir. İkincil amaç ise, şebeke suyunun içilebilir kalitede sunulmasının sürdürülebilir kalkınma üzerindeki önemini ortaya koymaktır. Şebeke suyunun içilebilir kalitede olmasını engelleyen faktörler arasında boru malzemesi, eskiyen dağıtım sistemleri, suyun şebekede bekleme süresi, sıcaklık ve biofilm oluşumu yer almaktadır. Bu faktörler, arıtılmış suyun dağıtım sırasında yeniden kirlenmesine yol açmaktadır. Ayrıca, mevcut merkezî su dağıtım sisteminin plansız genişlemesi ve yenilenme eksikliği, şebeke suyunun kalitesini olumsuz etkilemektedir. Buna karşın, şişelenmiş su tüketimi plastik kirliliğini arttırmakta ve mikroplastik gibi insan sağlığına zararlı bileşenlerin yayılmasına sebep olmaktadır. Söz konusu çalışmada vurgulanan çözüm önerileri arasında, su havzalarının korunması, şehir planlamasının doğayla uyumlu şekilde yapılması ve dağıtım sistemlerinin düzenli bakım-onarımı yer almaktadır. Ayrıca, çok merkezli, esnek ve çeşitli

su kaynaklarına dayalı entegre su altyapı sistemlerinin planlanması gerektiği belirtilmektedir.

Sürdürülebilir kalkınma açısından, musluk suyunun içilebilir hale getirilmesi ekonomik, çevresel ve sosyal açıdan kritik bir rol oynamaktadır. Plastik atıkların azaltılması, enerji tüketiminin düşürülmesi ve su kalitesinin korunması, sürdürülebilir şehirleşmenin temel hedeflerindedir. Bu kapsamda sebil ve termosların kullanımının yaygınlaşması oluşan ambalaj atığı miktarında da azalmaya sebebiyet verecek ve bu sayede Sıfır Atık konseptine katkı sağlanabilecektir. Tarihi semt çeşmelerinden içilebilir kalitede suyun kullanıcıya ücretsiz şekilde sağlanması, azalan şişelenmiş su tüketimi ile üretilen ambalaj atığı miktarında düşüşe sebep olacaktır. Şebeke suyunda tat ve kokunun giderilmesi için ara klora uygulama ve şebeke suyunun yaşının düşürülmesi ile ölü noktadaki uzun bekleme süreleri azaltılarak şebeke suyu kalitesinin artırılması mümkündür. Mevcut merkezî su altyapılarının yerine doğaya duyarlı, su tasarrufuna dikkat edilen ve su kalitesinin hassasiyetle takip edildiği ve korunduğu sistemlere geçiş elzemdir. Bu geçiş, iklim değişikliği neticesinde ortaya çıkması muhtemel tehlikeleri bertaraf etmek ve gelecek nesiller için su güvenliğini garanti altına almak adına hayati bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Farklı ülkelerdeki dezenfeksiyon yöntemleri harita üzerinde şematik olarak Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 2'de ise dezenfeksiyon yöntemleri özet halinde sunulmaktadır.



Şekil 1. Farklı ülkelerdeki dezenfeksiyon yöntemlerinin şematik gösterimi.

Ülkeler	Ozon	Granül Aktif Karbon	Cl <sub>2</sub> -ClO <sub>2</sub> -NHCl	Filtrasyon-UV
Çin				
Japonya				
Güney Kore				
İspanya				
Hollanda				
İsveç				
Kanada				
Kuzey Amerika				
Türkiye				

Şekil 2. Farklı ülkelerdeki dezenfeksiyon yöntemlerinin özet halinde gösterimi.

#### 4. Su Kalitesi İyileştirme Teknikleri

Dağıtım şebekelerinde, hidrolik modelleme destekli olarak (debi, basınç, su hızları ve su yaşı dağılımları dikkate alınarak) ölü veya kör noktalar tespit edilmeli ve su kalitesini iyileştirmek için gerekli önlemler (periyodik tahliye, ara klortlama vb.) alınmalıdır. Ayrıca, bakiye klor, THM ve tat/koku izleme çalışmaları, hidrolik modelleme desteği ile, ilgili kurumda birimler arasında etkin bir koordinasyon sağlanarak eş zamanlı olarak yürütülmelidir (Fakioglu vd., 2018).

##### 4.1. Su Kalitesi Modelleme

Bir su dağıtım sisteminde, suyun hareketi sırasında maddelerin takip ettiği güzergahı ve uğradığı dönüşümü anlayabilmek için sadece izleme verilerinin kullanılması yeterli olamamaktadır. Orta büyüklükte bir şehir bile binlerce kilometrelik bir su dağıtım sistemine sahip olabilir ve bu da su kalitesi parametrelerini geniş ve detaylı bir şekilde izlemeyi imkânsız hale getirir. Abonelerin su tüketiminde meydana gelen değişiklikler, suyun takip ettiği rotayı ve şebeke borularındaki yolculuk sürelerini büyük ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, sistemde kullanılan depolama elemanları da değişkenliğin seviyesini arttırmaktadır. Bu nedenle, su dağıtım şebekelerinde su kalitesinin davranışını modellemek, izleme çalışmalarına daha uygun maliyetli bir ek araç olarak cazip hale gelmiştir. Su kalitesi modelleri, bir dizi su kalitesi bileşeninin su dağıtım şebekelerinde zamana ve mekâna bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek için kullanılır. Bunlar şu unsurları içerebilir:

- Belirli bir kaynaktan gelen suyun sistemdeki oranı,
- Sistemdeki suyun yaşı ve su yaşı haritası,
- Sisteme eklenen veya sistemden çıkarılan reaktif olmayan bir iz elementin (örneğin, florür) konsantrasyonu,
- İkincil bir dezenfektanın (örneğin, klor) konsantrasyonu ve kayıp oranı,
- Trihalometanlar (THM'ler) gibi dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumu ve büyüme oranı,
- Sistemdeki bakterilerin miktarı ve kütlesi.
- Ayrıca hidrolik bazlı su kalitesi modelleri, su kalitesi ile ilgili çeşitli çalışmaları yürütmek için kullanılabilir. Örnekler şunlardır:
- Hidrolik modellerin kimyasal iz elementlerle kalibrasyonunun yapılması,
- Depolama tesislerinin konumlandırılması ve boyutlandırılması, suyun yaşını azaltmak için sistem işletim şeklinin değiştirilmesi,
- Farklı kaynaklardan gelen suyun istenilen karışımını sağlamak için sistemin tasarım ve işletim şeklinin değiştirilmesi.

Su dağıtım sistemlerinin hidrolik analizine yönelik matematiksel modellerin kullanımı 1930'lara kadar uzanırken, su kalitesi modelleri üzerine yapılan çalışmalara 1980'li yıllarda başlanmıştır. Wood (1980), Males vd. (1986), Clark vd. (1988), Rossman vd. (1994) ve Vasconcelos vd. (1997) gibi araştırmacılar, su dağıtım sistemlerinde su kalitesi modelleme faaliyetini ilk icra edenler arasında sayılabilirler. Günümüzde su kalitesinin modellenmesi için geliştirilmiş olan pek çok yazılım bulunmaktadır. Açık kaynak kodlu olması ve arayüzünün kullanıcı dostu olarak tasarlanmasından ötürü EPANET (Rossman, 1994, 2000, 2010), bu yazılımlar arasında temayüz etmiş (Koşucu vd., 2022; Koşucu & Demirel, 2022), ve dünyada yaygın olarak kullanılabilir hale gelmiştir (Koşucu & Demirel, 2024).

Bir su dağıtım sistemi, borular, pompalar, vanalar, bağlantı parçaları ve depolama elemanlarından oluşur ve bunlar, suyun kaynak noktasından alınıp tüketicilere aktarılabilmesi amacıyla kullanılır. Su dağıtım sistemindeki su kalitesinin nasıl değiştiği, kütlenin korunumuna ve reaksiyon kinetiğine dayanan denklemlerle hesaplanır (Mays, 2000).

##### Advaktif Taşınma

Bir borudaki çözülmüş bir madde, taşıyıcı sıvının ortalama akım hızıyla aynı hızda ilerlerken aynı zamanda belirli bir oranda büyüyerek veya bozularak reaksiyona girer. Çözülmüş maddenin akım ortamındaki konsantrasyonunun akım hızı ve reaksiyonla olan ilişkisini veren ifade adveksiyon denklemi olarak isimlendirilmektedir (Grayman vd., 2000). Bu ifade Denklem (1)'de verilmiştir:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + r(C_i) \quad (1)$$

Burada  $C_i$  çözülmüş maddenin  $i$  no'lu borudaki konuma ( $x$ ) ve zamana bağlı ( $t$ ) olan konsantrasyonunu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $u_i$   $i$  no'lu borudaki akım hızını ( $\text{m}/\text{s}$ ), ve  $rC_i$  de konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak reaksiyon oranını ( $\text{kg}/\text{m}^3/\text{s}$ ) göstermektedir.

##### Ana Akım Reaksiyonları

Bir basınçlı akımda hareket halinde olan ya da bir depolama tesisinde bulunan bir madde, ortamdaki diğer bileşenlerle reaksiyona girebilir (Grayman vd., 2000). Reaksiyon hızı genellikle, konsantrasyonun bir üstel fonksiyonu olarak tanımlanabilir:

$$r = k C^n \quad (2)$$

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

Burada k reaksiyon hızı sabiti ve n ise reaksiyon derecesidir. Farklı reaksiyon hızlarına örnekler şu şekilde verilebilir:

- Klorun bozunması için  $r=-k C$  (Birinci dereceden bozunma)
- THM oluşumu için  $r=k (C^*-C)$  (Birinci dereceden artma. Burada  $C^*$  muhtemel maksimum THM konsantrasyonu)
- Su yaşı için  $r=1$  ve  $n=0$  (Sıfırıncı dereceden artma)
- Korunumlu maddeler (flor gibi herhangi bir tepkimeye girmeyen) için  $k=0$  ve  $r=0$ .

Su kalitesinin modellenmesi, bir su dağıtım sisteminin performansını optimum seviyeye getirmek ve sistemin su kalitesiyle ilgili sorunlarını çözmek için tercih edilmektedir. Modelleme çalışmaları, aşağıdaki gibi birçok uygulamanın gerçekleştirilebilmesi için yürütülmektedir:

- **Bakiye dezenfektan yönetimi:** Su kalitesi modelleme çalışması, su dağıtım sistemlerinin muhtelif bölgelerindeki dezenfektan kaybını tahmin etmek ve hangi bölgelerde dezenfektan ilave edilmesine ihtiyaç duyulduğunu belirlemek için kullanılabilir. Antalya'da yürütülen su kalitesi ve bakiye klor modelleme çalışması, modellemeyle bakiye dezenfektan yönetimine bir örnek olarak verilebilir (Karadirek, 2014; Karadirek vd., 2016).

- **Depoların boyutlandırılması ve işletilmesi:** Su kalitesi modelleri, su depolarının doğru boyutlandırılması ve su kalitesinin optimize edilmesi için su dağıtım şebekesinin nasıl işletilmesi gerektiğini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Depolarda suyun bekleme süresinin su kalitesini azalttığı bilinmektedir. Su kalitesi modelleme çalışmaları vasıtasıyla bekleme sürelerinin asgari seviyeye indirilmesi sağlanabilir.

- **Kirlilik takibi:** Su kalitesi simülasyonları kullanılarak sistemde bir kirlilik olayının nerede başladığı ve kirleticilerin hangi alanlara yayıldığı tespit edilebilir. Bu tür olaylar esnasında modelleme çalışmaları, kirleticilerin yayılma hızını ve rotasını tahmin etmeye, ve kirliliğe karşı gerekli müdahale stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir.

- **Su yaşı tahminleri:** Su kalitesinin modellenmesi sayesinde suyun dağıtım sistemindeki yaşını tahmin etmek mümkün hale gelebilir. Bu vesileyle su kalitesinin bozulmasını önlemek hususunda herhangi bir tedbir alınabilir. Bilindiği üzere, suyun uzun süre beklemesi, sistemdeki dezenfektan miktarının azalmasına ve biyofilm büyümesine yol açmaktadır. Ayrıca sistemdeki bütün düğüm noktalarındaki ve borulardaki su yaşı modelle ortaya konabileceğinden su yaşı haritasının çıkarılması da hidrolik model vasıtasıyla mümkün olabilmektedir.

- **Karışım analizi:** Farklı kaynaklardan gelen suların nasıl karıştığını ve sistem içinde hangi oranlarda bulunduğunu anlamak için su kalitesi modellerinden istifade edilebilmektedir. Bu tür su kalitesi analizi çalışmaları, farklı su kaynaklarının özelliklerini dikkate alarak, suyun kalitesiyle alakalı sorunların oluşmasını önlemeye yardımcı olabilir.

**Yan ürünlerin tahmini:** Su kalitesi modelleri, THM (trihalometanlar) ve diğer dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşum miktarını ve hızını tahmin etmek için kullanılabilir. Bu tahminler, su dağıtım sistemi boyunca hangi bölgelerde yan ürünlerin yüksek konsantrasyonlara ulaşabileceğini belirleyebilmek için önem arz etmektedir.

Su dağıtım sistemlerinde su kalitesi modelleme teknikleri, gerçek sistemlerdeki su kalitesi süreçlerinin anlaşılmasına ve bu gerçek sistemlerin optimize edilmesine yardımcı olmak için geliştirilmiştir. Bu modeller vasıtasıyla çeşitli senaryoların analiz edilmesi, su kalitesinin korunmasına yönelik stratejilerin belirlenmesine imkan tanır. Sonuç olarak su dağıtım sistemlerinde su kalitesinin korunabilmesi, bu sistemlerdeki hidrolik davranışın ve su kalitesi seviyesinin ne surette

teşekkül ettiğinin anlaşılması sayesinde mümkün olabilir. Su kalitesinin izlenmesi ve modellenmesi gibi enstrümanların etkin kullanımı, su dağıtım sistemlerindeki su kalitesi seviyesinin insan sağlığı için herhangi bir tehdit oluşturmayacak hale getirilmesini sağlayacaktır.

### 4.2. Bakiye Dezenfektan Tespiti

Bakiye dezenfektan, içme suyu dağıtım sistemlerinde mikroorganizmaların yeniden büyümesini önlemek ve suyun güvenliğini sağlamak için kritik bir parametredir. Dezenfektan bakiyesi, suyun dağıtım sistemine girişinden sonra zamanla azalmaktadır. Bu azalma, suyun organik maddelerle etkileşime girdiği, boru cidarlarında biofilm oluşumlarına tesadüf edilen ve bilhassa akım hızlarının asgari seviyelerde seyrettiği bölgelerde belirgin hale gelmektedir (Walski vd., 2007). Dağıtım sistemindeki her noktada dezenfektan bakiyesinin yeterli düzeyde olması, hem mikrobiyal büyümenin önlenmesi hem de tüketicilere güvenli su sağlanması için gereklidir.

Daha önce de belirtildiği üzere Türkiye'de içme sularının dezenfeksiyonunda klor kullanılmaktadır. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'le belirlenen esaslar mucibince su dağıtım sistemlerindeki klor konsantrasyonunun 0.2-0.5 mg/L aralığında yer alması gerekmektedir. Zira bakiye klor konsantrasyonunun 0.2 mg/L değerinin altına inmesi durumunda mikrobiyal kontaminasyon riski oluşmaktadır. Buna mukabil, klor konsantrasyonunun izin verilen maksimum değerden daha yüksek olması halinde ise dezenfeksiyon yan ürünlerinde istenmeyen artışların görülmesi muhtemeldir (Tamminen vd., 2008).

Klor bakiyesindeki azalma, dağıtım sistemindeki suyun yaşıyla yakından ilişkilidir. Daha yaşlı suyun bulunduğu bölgelerde klor miktarı azalmakta ve bu durum, özellikle sistemin uç noktalarında ve düşük talep bölgelerinde su kalitesi sorunlarına yol açabilmektedir. Bu azalma, hem tüketici güvenliği açısından hem de dezenfeksiyon yan ürünü oluşumunun artması riski nedeniyle önemli bir problem teşkil eder. Özellikle yaz aylarında sıcaklık artışları, dezenfektan bakiyesinin daha hızlı bozulmasına sebep olabilmektedir.

Bakiye dezenfektan tespiti için sahada numune alma çalışmaları, dağıtım sistemindeki belirli noktalarda düzenli ölçümler yapılarak yürütülmektedir. Bu ölçümlerle, sadece mevcut dezenfektan seviyesi değil, aynı zamanda yan ürün konsantrasyonları da tespit edilir. Buna mukabil, alınan numuneler, sistem genelindeki dezenfektan dağılımını tam olarak temsil etmeyebilir. Bu nedenle, hidrolik ve su kalitesi modelleme faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde fayda olduğu belirtilmelidir (Clark & Grayman, 1998).

Bakiye dezenfektan miktarının optimum seviyede olması, sistem güvenliği ve mikrobiyal kontaminasyon riskine karşı korunabilme açısından önemlidir. Özellikle suyun durgun olduğu bölgelerde hidrant ve tahliye vanası gibi şebeke elemanlarıyla hareketliliğin artırılması ve düşük talep noktalarında akım hızlarının artırılmasının sağlanması gibi operasyonel düzenlemeler, bakiye dezenfektan miktarının kaybında azalmayı sağlayacaktır. Geniş dönemli hidrolik simülasyonlar kullanılarak dezenfektan dinamiği ve davranışının analiz edilip iyileştirme stratejileri belirlenebilir.

### 4.3. Ara Klrlama

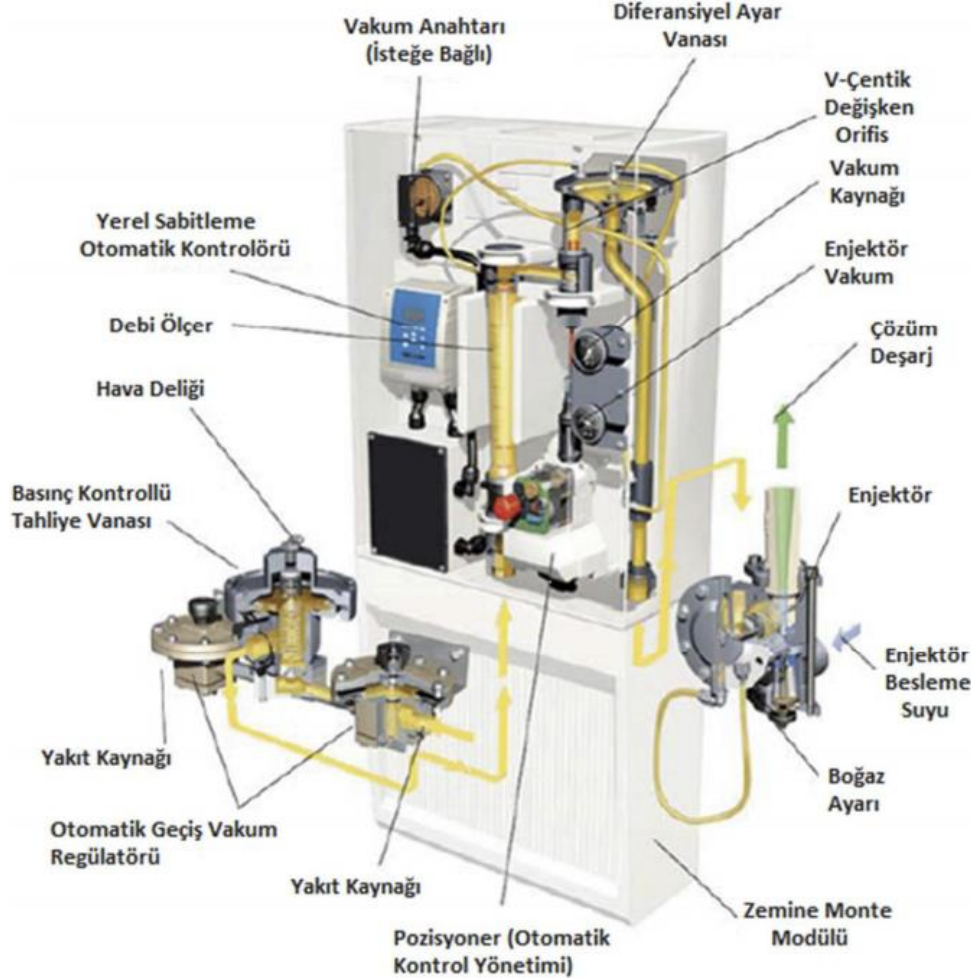
Ara klrlama, su dağıtım sistemlerinde dezenfektan bakiyesinin düştüğü veya tamamen sıfıra indiği bölgelerde ek dezenfektan uygulaması yapılmasını ifade eder. Özellikle uzun seyahat sürelerine sahip sistemler, depolama tanklarının

## Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

bulunduğu bölgeler ve eski borulardan oluşan su dağıtım sistemleri, dezenfektan bakiyesinin hızlı şekilde kaybedilmesine yol açabilmektedir. Bu tarz sistemler, mikrobiyal büyüme ve potansiyel kontaminasyon açısından yüksek risk taşımaktadır (Walski vd., 2007).

Ara klorlama, dezenfektan bakiyesini artırmayı ve sistemin muhtelif bölgelerinde etkili dezenfeksiyon sağlamayı amaçlar.

Klorlama işlemi, genellikle stratejik noktalara kurulan takviye klorlama istasyonları aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu sayede suyun arıtma tesisinden uzak noktalara taşınmasından kaynaklanan klor kaybının oluşturduğu riski bertaraf etmek mümkün olur. Ayrıca, ara klorlama vasıtasıyla arıtma tesislerine nispeten uzak olan bölgelerde dezenfeksiyon yan ürünlerinin miktarı azaltılabilmektedir. Bir gaz klorinatör ve ekipmanları Şekil 3'te gösterilmektedir:



Şekil 3. Bir gaz klorinatör ve ekipmanları (Çakmakçı vd., 2013).

Ara klorlama stratejisinin başarısı, doğru klor konsantrasyonlarının belirlenmesine ve sistemdeki klorlama noktalarının doğru belirlenmesine bağlıdır. Gelişmiş hidrolik ve su kalitesi modelleri, bu noktaların seçiminin ve klor dağılımının optimum surette belirlenebilmesine imkan tanımaktadır. Bunun yanında, klor seviyesinin düzenli izlenmesi ve abone taleplerine göre ayarlanması, doğru klorlama stratejisinin belirlenebilmesinde önemli rol oynar (Mays, 2000).

Ara klorlamanın en büyük zorlukları, klorlama noktalarının izlenmesi ve güvenliğinin sağlanmasıdır. Sahada kurulan klorlama istasyonlarının bakımı ve operasyonel sürekliliği, sistemin başarısını etkileyebilmektedir. Bu nedenle, modern teknolojilerden ve SCADA gibi otomasyon sistemlerinden yararlanılarak, ara klorlama faaliyeti daha etkili hale getirilebilir.

### 5. Sonuç ve Öneriler

Su arıtma tesislerinden tüketiciye kadar uzanan süreçte, suyun güvenilirliğini ve içilebilirliğini koruyabilmek için gerekli su kalitesi parametrelerinin izlenmesi ve yönetilmesi büyük

önem taşımaktadır. Suyun tat, koku ve renk gibi organoleptik özelliklerinin kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkileri dolayısıyla, su kalitesi ile tüketici algısı arasındaki ilişkinin doğru yönetimi önem taşımaktadır.

Su dağıtım şebekelerinde suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Boru malzemesi, korozyon ve dezenfektan türleri gibi unsurlar, suyun içilebilirlik seviyesini doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Ayrıca ölü noktalar ve biyolojik aktivitelerden kaynaklanan tat ve koku sorunları, dağıtım sistemlerindeki suyun kalitesine menfi yönde tesir edebilmektedir. Bu faktörlerin izlenmesi ve kontrol altında tutulması, içme suyunun kalitesinin sürdürülebilir bir şekilde sağlanması için kaçınılmazdır.

Farklı ülkelerde içme suyu kalitesini yüksek seviyede tutmaya yönelik uygulamalara bakıldığında, Japonya, Hollanda ve Kanada gibi ülkelerde modern teknolojilerin ve sıkı şekilde uygulanan yönetmeliklerin su kalitesinin sağlanmasında etkili olduğu görülmektedir. Hollanda'da klor kullanmadan dezenfeksiyon sağlanabilirken, biyolojik kararlılık ön planda tutulmaktadır. Buna karşılık, Çin, Japonya ve Güney Kore gibi

ülkeler, hızlı kentleşme ve artan su talebiyle baş edebilmek için hibrit teknolojilere yönelmiştir.

Türkiye’de Sağlık Bakanlığı tarafından yürütülen ve mahallî idarelerce ilgili hükümlerinin uygulanması sağlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik’le, su dağıtım sistemlerinde su kalitesinin korunması ve kalitede devamlılığın temin edilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede yüksek kalitede arıtılmış su, dağıtım şebekeleri vasıtasıyla tüketicilere düzenli olarak sunulmaktadır. Dağıtım şebekelerinde su kalitesinin sağlanması ve korunmasına yönelik yüksek farkındalığa, hassasiyete ve alınan ilave tedbirlere rağmen tüketicilerin ekseriyetle şebeke suyundan ziyade damacana ve plastik şişe sularını tercih ettiği görülmüştür. Türkiye’deki Sıfır Atık Hedefi stratejik programının başarıya ulaşabilmesinde bu hususun dikkate alınması önem arz etmektedir. Ayrıca plastik şişe kullanımının azaltılarak bu şişelerin çevreye verdiği zararları minimize etme hedefi doğrultusunda, sebillerin yaygınlaştırılması hem ekonomik hem de ekolojik açıdan önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Şehirlerde ve kamuya açık alanlarda sebil kullanımını arttırmak, hem tüketicinin şebeke suyuna olan güvenini temin edebilecek, hem de vatandaşları daha sürdürülebilir bir içme suyu tüketimi alışkanlığına yönlendirecektir. Bunun yanı sıra, su kalitesine dair daha fazla şeffaflığın sağlanması ve kamunun yeterince bilgilendirilmesi, tüketici algısını olumlu yönde değiştirebilmek için atılması gerekli adımlar arasında zikredilebilir.

Su kalitesinin sürekli izlenmesi, bakiye dezenfektan konsantrasyonlarının takibi ve ara klorlama yöntemlerinin uygulanması, su dağıtım şebekelerinde yaşanabilecek kalite bozulmalarının önüne geçilebilmesi için fazlasıyla önemlidir. Buna ilaveten hidrolik modelleme araçları, su kalitesinin zaman ve mekâna bağlı değişimini analiz edilebilmesi için faydalı bir enstrüman olarak dikkat çekmektedir. Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalar, EPANET gibi açık kaynak kodlu ve ücretsiz hidrolik modelleme yazılımlarının kirleticilerin yayılımını ve bakiye dezenfektan miktarını simüle etmede son derece etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Güvenli içme suyuna erişim, halk sağlığı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Türkiye’nin bu hedeflere ulaşabilmesi için su dağıtım şebekelerinin iyileştirilmesi, sebil kullanımının yaygınlaştırılması, hidrolik modelleme gibi modern teknolojilerin uygulanması ve tüketici bilincinin artırılması istikametinde kararlı ve net olunması elzemdir. Su dağıtım sistemlerinde su kalitesinin sağlanması ve korunması için dezenfeksiyon yan ürünlerinin azaltılması ve biyolojik aktivitenin kontrol altına alınması gelecekte ele alınması ve geliştirilmesi muhtemel potansiyel çalışma alanları olarak belirmektedir. Ayrıca tüketicilerin su dağıtım şebekelerinden gelen suya güvenini arttıracak yenilikçi stratejilerin geliştirilmesi, sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önem arz etmektedir.

## 6. Teşekkür ve Bilgi

Bu derleme çalışmasının yapılması için bize fikir veren ve bizi çalışmaya teşvik eden Prof. Dr. İzzet Öztürk hocamıza teşekkür ederiz.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 7. Kaynaklar

- Abbasi, N. A., Shahid, S.U., Majid, M., Tahir, A. (2022). Ecotoxicological Risk Assessment of Environmental Micropollutants, *Environmental Micropollutants*, 331-337.
- Abbaszadegan, M., Yi, M., & Alum, A. (2015). Stimulation of 2-Methylisoborneol (MIB) Production by Actinomycetes After Cyclic Chlorination in Drinking Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50(4), 365–371.
- Abhijith, G. R., & Ostfeld, A. (2021). Modeling the Formation and Propagation of 2,4,6-trichloroanisole, a Dominant Taste and Odor Compound, in Water Distribution Systems. *Water*, Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/w13050638>
- Abokifa, A. A., Yang, Y. J., Lo, C. S., & Biswas, P. (2016). Investigating The Role of Biofilms In Trihalomethane Formation in Water Distribution Systems With a Multicomponent Model. *Water research*, 104, 208–219. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.006>
- American Water Works Association (AWWA) (2002). Distribution Generated Taste and Odor Phenomena”. Colorado, USA, AWWA Research Foundation.
- Ataoui, R., Ermini, R., (2017). Risk Assessment of Water Distribution Service. *Procedia Engineering*.186, 514–521.
- Aydın, R. & Şirin, S. (2020). A Survey on Drinking Water Preferences and Point of Use Water Treatment Systems in Adana, Turkey, *Desalination and Water Treatment*, 125, 329-333.
- Bereskie, T.A. (2017). Drinking Water Management and Governance in Small Drinking Water Systems: Integrating Continuous Performance Improvement and Risk-Based Benchmarking. Doctoral dissertation. University of British Columbia.
- Bhutiani, R., Kulkarni, D.B., Khanna, D.R., Gautam, A. (2016). Water Quality, Pollution Source Apportionment and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of an Industrial Area in North India. *Exposure Health* 8, 3–18.
- British Columbia (1989). Chlorine Water Quality Guidelines (Reformatted Guideline from 1989), [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/bc\\_env\\_chlorine\\_waterqualityguideline\\_technical.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/waterquality/water-quality-guidelines/approved-wqgs/bc_env_chlorine_waterqualityguideline_technical.pdf) adresinden alınmıştır. Erişim Tarihi: 25.02.2025
- Brungs, W. A. (1976). Effects of Wastewater and Cooling Water Chlorination on Aquatic Life. Report No. EPA-600/3-76-098. U.S. Environmental Protection Agency, Duluth, Minnesota. 45 pp.
- CCME (2004). From Source to Tap: Guidance on the Multi-Barrier Approach to Safe Drinking Water, Canadian Council of Ministers of the Environment.

- Cho, Y.M. (2017). Tap Water Quality Inspection System by the Multiple Checks, <https://www.seoulsolution.kr/en/content/6379#:~:text=In%20order%20to%20reduce%20the,guidelines%20on%20clean%20tasting%20water.> adresinden alınmıştır. Erişim Tarihi: 25.02.2025
- Choi, I.-C., Shin, H.-J., Nguyen, T., & Tenhunen, J. (2017). Water Policy Reforms in South Korea: A Historical Review and Ongoing Challenges for Sustainable Water Governance and Management. *Water*, 9(717). <https://doi.org/10.3390/w9090717>
- City of Istanbul. (2024). Istanbul Population 2024 [Current and Historic]: <https://cityofistanbul.net/> adresinden alınmıştır.
- Clark, R., Grayman, W. M., & Males, R. M. (1988). Contaminant Propagation in Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 114(4), 929–943.
- Clark, R. M., & Grayman, W. M. (1998). Modeling Water Quality in Drinking Water Distribution Systems. American Water Works Association.
- Çakmakçı, M., Özkaya, B., Yetilmezsoy, K., & Demir, S. (2013). *Su Arıtma Tesislerinin Tasarım ve İşletme Esasları*, T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
- Douterelo I, Husband S, Loza V, Boxall J. (2016). Dynamics of Biofilm Regrowth in Drinking Water Distribution Systems. *Appl Environ Microbiol*82: <https://doi.org/10.1128/AEM.00109-16>
- Fakioğlu, M., Karpuzcu, M. E., & Öztürk, İ. (2018). İçme Sularında Alg Kaynaklı Tat ve Koku Sorununun Değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1141-1156.
- Faust S.D.A, Osman M. (1998). Chemistry of Water Treatment. New York, USA, Lewis Publishers.
- Government of Ontario. (2024). Procedure For Disinfection of Drinking Water in Ontario. <https://www.ontario.ca/page/procedure-disinfection-drinking-water-ontario> adresinden alındı. Erişim Tarihi: 19.10.2024.
- Grayman, W. M., Rossman, L. A., & Geldreich, E. E. (2000). 9. Water Quality. In L. Mays (Ed.), *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill.
- Gschwandtner, A., Jang, C., & McManus, R. (2020). Improving Drinking Water Quality in South Korea: A Choice Experiment with Hypothetical Bias Treatments. *Water*, 12(9), 2481.
- Güner, A. E. (2020). *İstanbul İlinde 2017 Yılı İçme ve Kullanma Sularının Değerlendirilmesi; İstanbul Halk Sağlığı Müdürlüğü Çalışmaları*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Hartmann, J., van Driezum, I., Ohana, D., Lynch, G., Berendsen, B., Wuijts, S., van der Hoek, J.P., de Roda Husman, A.M. (2020). The Effective Design of Sampling Campaigns for Emerging Chemical and Microbial Contaminants in Drinking Water and Its Resources Based on Literature Mining. *Sci. Total Environ.* 742, 140546.
- Hashemi, S., Park, J., Yang, M., Kim, J., Oh, Y., Pyo, H., & Yang, H. (2022). Long-Term Monitoring and Risk Assessment of N-Nitrosamines in The Finished Water of Drinking Water Treatment Plants in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 3930–3943.
- Ikhlaq, A., Kazmi, M., Hayder, S., Mian, H.R., Rustam, M., Sulheri, A.W., Saeed, A. (2014). Evaluation of Drinking Water Quality Parameters in The Areas of East-Lahore Pakistan: A Case Study. *J. Fac. Eng. Technol.* 21, 1–21.
- İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete (17.02.2005). 25730
- İSKİ (2024). 2023 Faaliyet Raporu, <https://iski.istanbul/kurumsal/stratejik-yonetim/faaliyet-raporlari/> adresinden alınmıştır. Erişim Tarihi: 13.12.2024
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (2024). Water Supply System: From Water Sources To Distribution. Retrieved November 18, 2024, from [https://www.jica.go.jp/Resource/english/our\\_work/thematic\\_issues/water/c8h0vm0000fgpuk7-att/materials\\_01\\_03.pdf](https://www.jica.go.jp/Resource/english/our_work/thematic_issues/water/c8h0vm0000fgpuk7-att/materials_01_03.pdf)
- Japan Water Works Association (JWWA). (2023). Water Supply in Japan 2023. Retrieved November 18, 2024, from [http://www.jwwa.or.jp/jigyoku/kaigai\\_file/2023WaterSupplyInJapan.pdf](http://www.jwwa.or.jp/jigyoku/kaigai_file/2023WaterSupplyInJapan.pdf)
- Jia, J., Rui, M., Cheng, X., Liang, H. (2023). Application Of Ultrafiltration Technology in Drinking Water Industry of China: A Comprehensive Assessment of Hybrid Membrane Processes, *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 72 (12): 2408–2421.
- Karadirek, İ. E. (2014). *İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Deterministik ve Veriye Dayalı Modelleme Teknikleri Kullanarak Yönetimi*.
- Karadirek, İ. E., Kara, S., Muhammetoglu, A., Muhammetoglu, H., & Soyupak, S. (2016). Management of Chlorine Dosing Rates in Urban Water Distribution Networks Using Online Continuous Monitoring and Modeling. *Urban Water Journal*, 13(4), 345–359. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.992916>
- Karakaş Ulusoy, C. (2024). The Importance of Being Returned from Bottled Water to TapWater in Turkey in Terms of Sustainable Development, *An Agenda for Sustainable Development Research*, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65909-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65909-6_16)
- Kitada, S. & Saito, H. (2020). Proper Management of Residual Chlorine Concentration in Tap Water for Reduce Chlorine Odor, <https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/files/items/30209/File/1-8.pdf> adresinden alındı. Erişim Tarihi: 18.10.2024.
- Kleiner, Y. (1998). Water Distribution Network Rehabilitation: Selection and Scheduling of Pipe Rehabilitation

- Alternatives. Doctoral dissertation. University of Toronto.
- Koç, S. (2014). Influence of System Parameters on The Disinfection Capability of Water Distribution Networks, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- Koşucu, M. M., Albay, E., & Demirel, M. C. (2022). Extending EPANET Hydraulic Solver Capacity with Rigid Water Column Global Gradient Algorithm. *Journal of Hydro-Environment Research*, 42, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2022.04.002>
- Koşucu, M. M., & Demirel, M. C. (2022). Smart Pressure Management Extension for EPANET: Source Code Enhancement with A Dynamic Pressure Reducing Valve Model. *Journal of Hydroinformatics*, 24(3), 642–658. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.172>
- Koşucu, M. M., & Demirel, M. C. (2024). Cost Efficiency Assessment of Four Pressure Management Methods in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(3). <https://doi.org/10.1061/jwrmd5.wreng-5984>
- Kowalska, B., Kowalski, D., & Musz-Pomorska, A. (2007). Chlorine Decay and Disinfection By-Products in Water Distribution Systems. Environmental Engineering - Proceedings of The 2nd National Congress of Environmental Engineering, 191–199.
- Lada, S. (2023). Nine Years Later: Water Crisis Settlement Claims Delayed, Residents Say Process is Unfair. Flint Beat. Retrieved April 30, 2024.
- Lahlou, Z. M. (2002). Water Quality in Distribution Systems. A National Drinking Water Clearinghouse Fact Sheet. University of West Virginia, USA.
- Lee, S., & Choi, G.-W. (2012). Governance in A River Restoration Project in South Korea: The Case of Incheon. *Water Resources Management*, 26, 1165–1182. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9952-5>
- Liu, S., Gunawan, C., Barraud, N., Rice, S. A., Harry, E. J., & Amal, R. (2016). Understanding, Monitoring, and Controlling Biofilm Growth in Drinking Water Distribution Systems. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8954-8976.
- Mays, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill.
- Mercer, T., Christensen, J. (2011). Measuring Performance of Water Systems in California. Stanford University, Woods Institute for the Environment. The Bill Lane Center for the American West [https://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/Working\\_Paper\\_on\\_Performance\\_Measurement\\_1.pdf](https://waterinthewest.stanford.edu/sites/default/files/Working_Paper_on_Performance_Measurement_1.pdf).
- Metro Vancouver (t.y.). Water Treatment and Facilities, <https://metrovancouver.org/services/water/water-treatment-facilities#:~:text=Metro%20Vancouver%20treats%20your%20drinking,it%20travels%20throughout%20the%20region>. adresinden alındı. Erişim Tarihi: 26.02.2025
- Mian, H.R., Saleem, S., Hu, G., Sadiq, R. (2019). Water Distribution Systems: Hydraulics and Quality Modeling, *Water Treatment and Supply*, <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0185>.
- Mian, H. R., Hu, G., Hewage, K., Rodriguez, M.J., Sadiq, R. (2021) Drinking Water Quality Assessment in Distribution Networks: A Water Footprint Approach, *Science of the Total Environment*, 775, 145844.
- Nadiroğlu, C. (2014). Qualitative Evaluations about the Disinfection Capabilities of A Water Distribution Network: A Model Study, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University.
- National Research Council (2006). *Drinking Water Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks*. National Academies Press, Danvers
- Nieminen, T. (2020). Efficacy requirements for drinking water disinfectants - survey and proposal Requirements according to Biocidal Products Regulation in relation to disinfection practices in the Nordic countries, Nourdic Council of Ministers.
- Omur-Ozbek, P (2012). Global Taste and Odor Survey of Water Utilities: Final Report to The American Water Works Association from the Taste and Odor Committee. AWWA, Denver.
- Park, J.H., Cox-Ganser, J. M., White, S. K., Laney, A. S., Caulfield, S. M., Turner, W. A., Sumner, A. D., Kreiss, K. (2017). Bacteria in A Water-Damaged Building: Associations Ofactinomycetes and Non-Tuberculous Mycobacteria with Respiratoryhealth in Occupants, *International Journal of Indoor Environment and Health*, 27: 24-33.
- Patel, A. I., Hecht, C. E., Cradock, A., Edwards, M. A., & Ritchie, L. D. (2020). Drinking Water in The United States: Implications of Water Safety, Access, and Consumption. *Annual Review of Nutrition*, 40, 345-373.
- Petrie, B., Barden, R., & Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A Review on Emerging Contaminants in Wastewaters and The Environment: Current Knowledge, Understudied Areas and Recommendations for Future Monitoring. *Water Research*, 72, 3–27.
- Rossman, L. A. (1994). EPANET Users Manual. USEPA.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 Users Manual. USEPA.
- Rossman, L. A. (2010). An Overview of EPANET Version 3.0. *Water Distribution System Analysis 2010*.
- Rossman, L. A., Clark, R., & Grayman, W. (1994). Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering ASCE*, 120(4).
- Saleem, S., Mian, H.R., Hu, G. (2019). Water Distribution System. In: Maurice, P. (Ed.), *Encyclopedia of Water* <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0194>.
- Sadiq, R., Kleiner, Y., Rajani, B., (2007). Water Quality Failures in Distribution Networks—Risk Analysis

- Using Fuzzy Logic and Evidential Reasoning. *Risk Anal. Int. J.* 27 (5), 1381–1394.
- San Francisco Public Utilities Commission (2021). Taste and Odor in Drinking Water. San Francisco Water Power Sewer.
- Selbes, M., Beita-Sandí, W., Kim, D., & Karanfil, T. (2018). The Role of Chloramine Species in NDMA Formation. *Water Research*, 140, 100–109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.033>
- Selek, B. (2020). Assessment of Surface Drinking Water Resources of Turkey in Terms of Water Quality Standards, *Journal of Water Chemistry and Technology*, (42)5, 415–426.
- Shi, X. (2020). The Safety of Drinking Water in China: Current Status and Future Prospects. *China CDC Weekly*, 210–215.
- Skjevrak, I., Lund, V., Ormerod, K., Due, A., & Herikstad, H. (2004). Biofilm in Water Pipelines; A Potential Source for Off-Flavours in The Drinking Water. *Water Science and Technology*, 49(9), 211–217.
- Smeets, P.W.M.H., Medema, G.J., van Dijk, J.C. (2009). The Dutch Secret: How to Provide Safe Drinking Water without Chlorine in The Netherlands, *Drink. Water Eng. Sci.*, 2, 1–14.
- Tamminen, S., Ramos, H., & Covas, D. (2008). Water Supply System Performance for Different Pipe Materials Part I: Water Quality Analysis. *Water Resources Management*, 22(11), 1579–1607. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9244-x>
- Tarkan, A. S. (2010). Effects of Streams on Drinkable Water Reservoir: An Assessment of Water Quality, Physical Habitat and Some Biological Features of The Streams, *Journal of Fisheries Sciences*, 4(1): 8-19
- Tuluk, B. ve Orhan, F. (2017). Comparison of Tap Water With Bottled Natural Spring Water in Terms of Some Quality Parameters in Erzurum, *Research Journal of Agricultural Sciences Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, E-ISSN: 1308-027X, 10(2): 27-32.
- Tomboulou, P., Schweitzer, L., Mullin, K., Wilson, J., & Khiari, D. (2004). Materials Used in Drinking Water Distribution Systems: Contribution to Taste-and-Odor. *Water Science and Technology*, 49(9), 219–226. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0575>
- Um, M.-J.; Kwak, S.-J.; Kim, T.-Y. (2002). Estimating Willingness to Pay for Improved Drinking Water Quality Using Averting Behavior Method with Perception Measure. *Environ. Resour. Econ*, 21, 285–300.
- URL-1: [https://smartwatermagazine.com/news/badger-meter/spanish-water-utility-tackles-disinfection-measurement-and-control-solutions\\_1](https://smartwatermagazine.com/news/badger-meter/spanish-water-utility-tackles-disinfection-measurement-and-control-solutions_1) Erişim Tarihi: 15.11.2024
- URL-2: <https://basq.livelarq.com/wellness/is-stockholm-sweden-tap-water-actually-safe-to-drink/> Erişim Tarihi: 16.11.2024
- Uyak, V., & Toröz, I. (2007). Investigation of Bromide Ion Effects on Disinfection By-Products Formation and Speciation in an Istanbul Water Supply. *Journal of Hazardous Materials*, 149, 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.017>
- Uyak, V., Ozdemir, K., & Toroz, I. (2008). Seasonal Variations of Disinfection By-Product Precursors Profile and Their Removal Through Surface Water Treatment Plants. *Science of the Total Environment*, 390, 417-424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.046>
- van der Kooij, D., van Lieverloo, J. H. M., Gale, P., and Stanfield, G. (2003). Distributing Drinking Water with a Low or Zero Disinfectant Residual, Operational and biological aspect, UKWIR (Ed.).
- van der Kooij, D., van Lieverloo, J. H. M., Schellart, J., and Hiemstra, P. (1999). Maintaining Quality without A Disinfectant Residual, *J. Am. Water Works Ass.*, 91(1), 55–64.
- van der Kooij, D., Hijnen, W. A. M., Drost, Y. C., Willemsen-Zwaagstra, J., Nobel, P. J., and Schellart, J. A. (1995). Multiple Barriers against Micro-organisms in Water Treatment and Distribution in the Netherlands, *Water Supply*, 13(2), 13–23.
- Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., & Clark, R. M. (1997). Kinetics of Chlorine Decay. *Journal of the American Water Works Association*, 89(7), 54–65. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1997.tb08259.x>
- Villanueva, C. M., Garfí, M., Milà, C., Olmos, S., Ferrer, I., & Tonne, C. (2021). Health and Environmental Impacts of Drinking Water Choices in Barcelona, Spain: A Modelling Study. *Science of the Total Environment*, 795, 148884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148884>
- Walski, T. M., Chase, D. V, Savic, D. A., Beckwith, S., Cattran, S., Hammond, R., Laptos, K., Lowry, S. G., Mankowski, R. F., Plante, S., Przybyla, J., & Schmitz, B. (2007). *Advanced Water Distribution Modeling And Management* (A. Strafaci, C. Totz, & K. Dietrich, Eds.; First Edit). Bentley Institute Press.
- Wang, G., Shen, J., Wei, S., Cai, D., Liu, J. (2022). Identification of Heavy Metals and Organic Micropollutants in Drinking Water Sources in Typical Villages and Towns in Northeast China, *Molecules*, 27, 8033.
- World Health Organization (WHO) (2022). Guidelines for Drinking Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda.
- Wood, D. J. (1980). Slurry Flows in Pipe Networks. *Journal of The Hydraulics Division: ASCE*, 106(1), 57–70. <https://doi.org/10.1061/jycej.0005359>
- Wu, J., Cao, M., Tong, D., Finkelstein, Z., & Hoek, E. M. V. (2021). A Critical Review of Point-of-Use Drinking Water Treatment in The United States. *npj Clean Water*, 4(40).
- Yong, Z. Y., Kim, K. Y., & Oh, J. E. (2021). The Occurrence and Distributions of Per-and Polyfluoroalkyl

Substances (PFAS) in Groundwater After A PFAS Leakage Incident in 2018. *Environmental Pollution*, 268, 115395.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115395>

Zhang, N., Xu, B., Qi, F., Kumirska, J. (2016). The Occurrence of Haloanisoles as an Emerging Odorant in Municipal Tap Water of Typical Cities in China, *Water Research* 98, pp. 242-249

Zhou, Q., Bian, Z., Yang, D., & Fu, L. (2023). Stability of Drinking Water Distribution Systems and Control of Disinfection By-Products. *Toxics*, 11(5).