

İçme sularından tat ve kokunun giderimi: İstanbul'daki kurulu su arıtma tesislerinde performans değerlendirmesi ve iyileştirilmesi

Removal of taste and odor from drinking water: performance evaluation and upgrade options for the treatment plants in Istanbul

Malhun FAKIOĞLU^{1*}, Mahmut Ekrem KARPUZCU², İsmail TORÖZ³, Fatih YILDIZ⁴,
İzzet ÖZTÜRK⁵

^{1,2,3,5}Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi İstanbul, Türkiye.
fakioglu@itu.edu.tr, karpuzcu@itu.edu.tr, toroz@itu.edu.tr, ozturkiz@itu.edu.tr

⁴İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, Su Arıtma Daire Başkanlığı, İstanbul, Türkiye.
fyildiz@iski.istanbul.gov.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.03.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 17.06.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 13.06.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.78949
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yaklaşık 15 milyon nüfusuyla dünyanın en kalabalık şehirlerinden biri olan İstanbul'a birçok yüzeysel su kaynağından su temin edilmektedir. Şehir, son yıllarda bazı su kaynaklarında 2-MIB ve Geosmin gibi alg kökenli bileşiklerden kaynaklanan tat ve koku sorunu yaşamaktadır. Bu çalışmanın amacı, su arıtma tesislerinde tat ve koku bileşiklerinin gideriminin ölçüm ve değerlendirilmesinin yanı sıra, halen kullanılan giderim yöntemlerinin etkinliğinin artırılmasına yönelik ilave tekniklerin tespit edilmesi ve yeni proseslerin önerilmesidir. Bu bağlamda ölçüm sonuçları değerlendirilerek, alternatif kimyasallar için çeşitli deneyler yapılmış ve önerilen yeni proseslere ait detaylı maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, İSKİ'ye ait 5 büyük su arıtma tesisinde 2013-2016 yılları arasında ozonlamanın sağladığı giderim veriminin TOK, 2-MIB ve Geosmin için sırasıyla %2-14, %35-62 ve %34-52 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneysel araştırma sonuçları, 10 mg/L toz aktif karbon uygulamasıyla 2-MIB (%50) ve Geosmin (%66) için en yüksek giderimim alum varlığında, en yüksek TOK gideriminin (%38) ise demir (III) klorür (FeCl₃) varlığında gerçekleştiğini göstermektedir. UV₂₅₄ parametresinin gideriminde her üç koagulanla %60-70 aralığında kalmıştır. Bulanıklık gideriminde ise alum ve FeCl₃'ün poli alüminyum klorüre (PACl) göre çok daha etkili olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında perokson prosesinin mevcut sisteme entegre edilebilirliği değerlendirilmiş, yapılan hesaplamalara göre kapasitesi 100,000 m³/gün olan bir su arıtma tesisinde (SAT) kurulacak perokson sistemi için birim maliyet 0.027 \$/m³ (0.14 TL/m³) olarak hesaplanmıştır. Bu değer ön ozonlamaya kıyasla %20 daha fazladır.

Anahtar kelimeler: İçme suyu arıtımı, Tam ölçekli tesis, Tat ve koku, 2-MIB, Geosmin.

Abstract

Istanbul, one of the most crowded cities in the world with approximately 15 million population, has various surface water sources. The city is recently having taste and odor problem originating from 2-MIB and Geosmin due to algal blooms occurring in these water sources. The aim of this study is not only to evaluate the removal of taste and odor compounds in water treatment plants, but also to improve the efficiency of existing removal processes along with suggesting new processes that are effective for the removal of these compounds. In this context; measurements were evaluated along with performing the experiments for the alternative chemicals and a detailed cost analysis were made for the proposed new processes. In 5 main water treatment plants of İSKİ, removal efficiencies with ozonation were 2-14% for TOC, 35-62% for 2-MIB and 34-52% for Geosmin, between the years 2013-2016. According to the experimental results, applying 10 mg/L powdered activated carbon with alum provided the highest removal efficiency for 2-MIB (50%) and Geosmin (66%) while TOC removal was higher with FeCl₃ (38%). UV₂₅₄ removal was within the range of 60-70% for all three coagulants. Turbidity removal was quite higher with FeCl₃ compared to PACl. Finally, the applicability of peroxone process to the existing plants were evaluated. According to the calculations, unit cost for a water treatment plant with a 100,000 m³/day capacity was found as 0.027 \$/m³ (0.14 TL/m³) for the peroxone system. This cost is 20% higher than a sole ozonation system.

Keywords: Drinking water treatment, Full scale treatment, 2-MIB, Geosmin.

1 Giriş

Arıtılarak tüketiciye sunulan suyun güvenilirliğini azaltan en önemli faktörlerden biri olan tat ve koku sorunu, suyun içme suyu olarak tüketiminde isteksizliğe neden olmaktadır [1]. Tüketicinin su otoritelerine güveninin sağlanması amacıyla tat ve kokunun kaynakları araştırılmakta, buna paralel olarak giderim yöntemleri ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir [2].

İçme sularında tat ve koku probleminin uygun bir çözümünün bulunması için kaynaklarının doğru bir şekilde belirlenmesi elzemdir. İçme suyunun su kaynağından tüketici musluğuna

dek süren yolculuğunda tat ve koku sorununun meydana gelebileceği üç temel nokta yüzeysel su kaynağı, arıtma tesisi ve dağıtım şebekesidir [3]. Su kaynağında oluşan tat ve koku sorunu algisit ilavesi gibi havza koruma tedbirleriyle minimize edilmeye çalışılırken, su arıtma tesislerinde, mevcut ünitelere toz aktif karbon (TAK) ilavesi veya ileri oksidasyon prosesinin entegre edilmesi gibi söz konusu soruna neden olan bileşiklerin giderimini arttırabilecek alternatifler belirlenmekte, bunun yanı sıra dağıtım şebekesinde meydana gelen tat ve koku probleminin kaynağı tespit edilmeye çalışılmaktadır. Çeşitli konumlarda oluşan bu soruna, bazı biyolojik ve/veya insan

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kökenli kaynaklar sebep olmaktadır. Geosmin ve 2-MIB (2-metilizoborneol) gibi suya küf benzeri ve topraklı bir tat veren bazı tat ve koku bileşikleri ve toksinlerinin, önemli biyolojik kaynaklardan olan alg ve aktinomisetler tarafından üretildiği bilinmektedir [4]. Geosmin ve 2-MIB, sudaki konsantrasyonu 10 ng/L değerine ulaştığında insanlar tarafından fark edilebilmektedir [2].

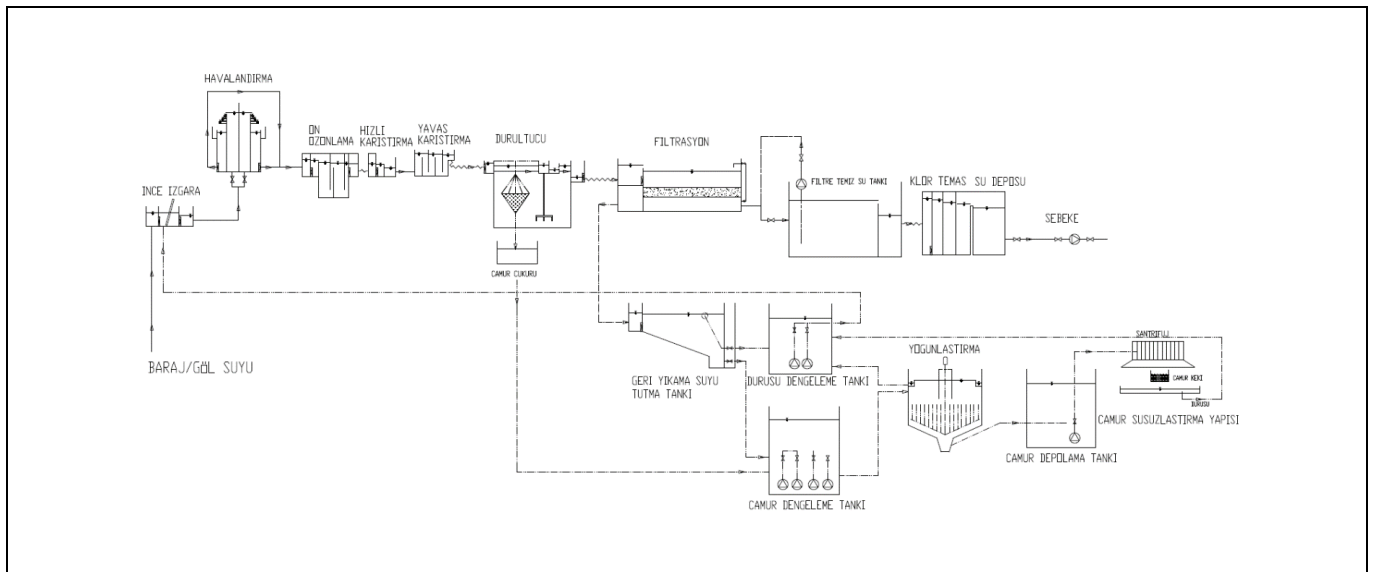
İçme sularından tat ve koku bileşiklerinin giderimi, birçok çalışma grubu tarafından incelenmiştir [5]-[8]. Koagülasyon, çökteltme ve klorlama gibi su arıtma tesislerinde bulunan konvansiyonel proseslerin Geosmin ve 2-MIB bileşiklerinin giderimini sağlamadığı; ozon ile oksidasyon, toz aktif karbon adsorpsiyonu ve biyofiltrasyon gibi proseslerin ise oldukça etkili olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır [6],[9]-[12]. Geosmin ve 2-MIB gibi algal metabolitlerin gideriminde etkili olması sebebiyle ozon ile oksidasyon, sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Yapılan çalışmalarda 2.5-5 mg/L ozon dozu ve 10-20 dk. temas süresi ile Geosmin giderim veriminin %90'ın, 2-MIB gideriminin ise %77'nin üzerinde olduğu görülmüştür [13]. Ozon ve hidrojen peroksitin birlikte kullanıldığı ileri oksidasyon prosesi olan perokson prosesinin de bu bileşiklerin gideriminde oldukça etkili olduğu, çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir [13]-[15].

2 İstanbul'daki su arıtma tesisleri ve kalite durumu

İstanbul, son yıllarda su kaynaklarında tat ve koku sorunu yaşamakta ve bu soruna geri havza ve su arıtma tesisinde çözüm aramaktadır. İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) baraj haznelarında alg kaynaklı tat ve koku problemi, bazı yıllarda Nisan-Ağustos aylarında konsantrasyonu 10-150 ng/L aralığında değişen Geosmin ve 2-MIB bileşiklerinden dolayı görülmektedir. Özellikle gölleri besleyen akarsu/dere ağzlarından başlayarak siyanobakteriyel oluşumun artması neticesinde Geosmin ve 2-MIB konsantrasyonları 10 ng/L eşik konsantrasyonunu aşmaktadır. Genellikle 10-20 ng/L Geosmin/2-MIB seviyesine ulaşıldığında göl haznesinde $CuSO_4$ ve/veya algisit uygulaması yapılarak alg gelişimi durdurulmaya çalışılmaktadır [16]. Ön ozonlamanın bulunduğu tesislerde

tesis çıkış suyundaki Geosmin ve 2-MIB konsantrasyonunun 40-50 ng/L, diğer tesislerde ise 15-20 ng/L'yi aştığı andan itibaren koagülasyon ünitesi girişine bulamaç halinde toz aktif karbon (TAK) beslenerek tesiste ek tat ve koku giderimi sağlanmaktadır. İSKİ su arıtma tesislerindeki (SAT) bulunan proseslere ait örnek şema, Şekil 1'de verilmiştir. Bu tesislerde toz aktif karbon ilavesi genellikle en geç Eylül ayı ortasında, genellikle Ağustos ayı sonundan itibaren durdurularak normal işletme sistemine geri dönülmektedir [16]. İSKİ'nin su arıtma tesislerinde (Tesis 1, Tesis 2, Tesis 3, Tesis 4 ve Tesis 5) organik bileşiklerin sebep olduğu tat ve koku sorununun çözümünde başarılı başlıca prosesler; havalandırma, fizikokimyasal arıtma, ön ozonlama, toz aktif karbon ilavesi olarak sıralanabilir. Özellikle uçucu organiklerde etkili olan havalandırma ve temelde ön dezenfeksiyon amacıyla tasarlanan ancak tat ve kokuya sebep olan organik bileşiklerin etkin giderimini sağlayan ozonlama biriminde başarı sağlanmaktadır. Bunun dışında hızlı karıştırma, yavaş karıştırmanın takip ettiği çökteltim ünitesinden oluşan fizikokimyasal arıtma ile (alum, $FeCl_3$ ve PE ilavesi) partikül ve çözünmüş yapıdaki organik kirleticiler önemli oranda giderilmektedir. Hızlı karıştırma ünitesinde 5-10 mg/L dozla beslenen toz aktif karbon sayesinde, tat ve koku sorununun arttığı Nisan/Mayıs-Ağustos döneminde çıkış suyunda 20 ng/L'nin altında 2-MIB/Geosmin seviyelerine inilebilmektedir.

İSKİ'nin Tesis 1'deki 4 su arıtma tesisinden biri (Tesis 1-a Darlık ve Yeşilçay sisteminden, diğer üçü (Tesis 1-b, Tesis 1-c ve Tesis 1-d) Ömerli baraj gölünden (bazı durumlarda Büyük Melen sisteminden) su almaktadır. Tesis 1'de bulunan su arıtma tesislerinde dönemsel tat ve koku problemi gözlemlenen su kaynağı Ömerli baraj gölüdür. Öte yandan, Yeşilçay ile Darlık su kaynaklarında konvansiyonel arıtma prosesleri (ozon ile ön oksidasyonsuz) dışında ek tat ve koku giderimi önlemi gerekmemektedir. Tesis 2'deki su arıtma tesisleri (Tesis 2-a) ve Tesis 2-b), Terkos, Istanca ve Sazlıdere sularının karışımından (büyük bölümü Terkos ve Istanca suları) su almakta, çoğunlukla halihazırda bulunan ön ozonlama ünitesi ile ek olarak toz aktif karbon ilave edilmeksizin, alg temelli tat ve koku giderilebilmektedir.



Şekil 1. İSKİ su arıtma tesislerinde tipik proses akım şeması.

Figure 1. Typical process flow chart for the İSKİ water treatment plants.

Terkos-Istranca-Alibeyköy sisteminden beslenen Tesis 3'teki iki tesiste ise (Tesis 3-a ve Tesis 3-b alg patlamasının sebep olduğu tat ve kokunun eliminasyonunda halihazırda bulunan ön ozonlama ünitesine ilaveten, söz konusu dönemlerde 5 mg/L seviyesinde giderimi artırıcı toz aktif karbon ilave edilmektedir.

Tesis 4 ise Büyükçekmece Gölü'nden beslenmekte, ön ozonlamasız klasik su arıtma prosesi, Nisan -Ağustos aylarında, alg kökenli tat ve koku sorununu gidermeyi hedefleyerek 5-10 mg/L konsantrasyonlarında toz aktif karbon eklenmektedir. Tesis 5 ise Elmalı 1 ve 2 barajlarından beslenmekte, ön ozonlama sayesinde kimyasal oksidasyonla alg temelli tat ve koku problemi kontrol altına alınmaktadır. Tat ve koku sorununun yoğun olarak yaşandığı ve Tesis 1'e su temin edilen ana su kaynağı olan baraj gölünden alınan ham su numunesindeki 2-MIB ve Geosmin değerleri, 2011-2015 yılları için grafikleştirilerek Şekil 2'de verilmiştir. Ortalama 2-MIB konsantrasyonu 2015 yılında, Geosmin konsantrasyonu ise 2014 yılında pik değerler göstermiştir.

İSKİ su arıtma tesislerindeki farklı ünitelerdeki temas süreleri ile bu ünitelerde uygulanan ortalama kimyasal madde (Ozon, Alum, FeCl₃, TAK, Klor) dozları Tablo 1'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere ön ozonlama 1.5-2.5 mg/L ozon konsantrasyonunda ve 5-10 dk. temas süresi ile, TAK ise

5-10 mg/L aralığında eklenmektedir. Buna ek olarak, filtrasyon ünitesinin öncesinde ve/veya sonrasında sırasıyla 1.5 ve 2.5 mg/L dozunda, 5-10 ve 30 dk. temas süresinde klor dozlanmaktadır.

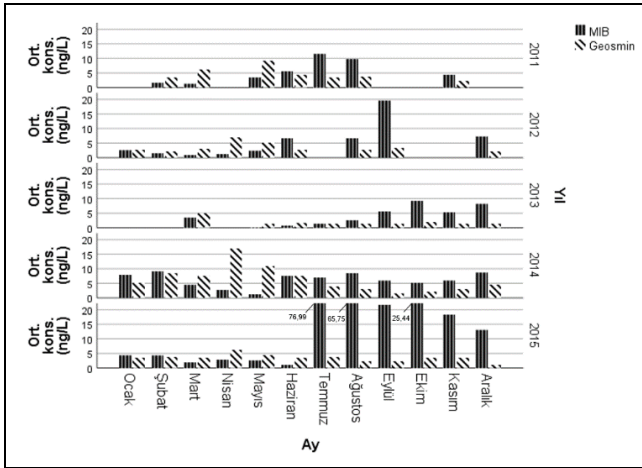
İstanbul'un su kaynaklarında meydana gelen tat ve koku sorununun, tüketiciye ulaştırılmadan önce İSKİ su arıtma tesislerinde gideriminin sağlanması, içme suyuna güvenilirliğin artırılması açısından oldukça kritik bir husustur. Bu çalışmanın amacı, İSKİ su arıtma tesislerinde tat ve koku bileşiklerinin gideriminin ölçülmesi ve değerlendirilmesinin yanı sıra, tesislerdeki giderim yöntemlerinin etkinliğinin artırılmasına yönelik ilave uygulamaların tespit edilmesi ve yeni proseslerin önerilmesidir. Bu bağlamda öncelikle tesislerde ozonlama ve toz aktif karbon ilavesi ile söz konusu bileşiklerin giderim verimleri tespit edilmiştir. Tesislerdeki mevcut giderim uygulamalarının etkinliğinin geliştirilmesi için çalışma kapsamında Üç farklı koagülan kullanılarak yürütülen deneylerde Tesis 1'den alınan ham su numunelerinde, toz aktif karbonun 2-MIB, Geosmin, toplam organik karbon (TOK), trihalometan (THM) ve SUVA₂₅₄ giderim verimleri incelenmiştir. Son olarak, perokson gibi tat ve koku bileşiklerinin gideriminde etkili olabilecek güncel yöntemler önerilmiş ve maliyet analizi ışığında değerlendirme yapılmıştır.

Tablo 1. İSKİ içme suyu arıtma tesislerinde kullanılan kimyasalların ortalama dozları.

Table 1. Average chemical dosages used in the water treatment plants of İSKİ.

Tesis Adı			Tesis 1				Tesis 2		Tesis 3		Tesis 4	Tesis 5
Üniteler/ Prosesler	Kullanılan Kimyasal	Dozaj/Temas Süresi	(a)	(b)	(c)	(d)	(a)	(b)	(a)	(b)		
	Klor	Dozaj (mg/L)	1.5	1.5	1.5	1.5			1	1	1.5	2-25
		Temas süresi (dk.)	5-10	5-10	5-10	5-10					25	10-15
Ozon	Ozon	Dozaj (mg/L)		1.5	1.5	1.5	1.5-2.2	1.5-2.2	2.5	2.5		3-5
		Temas süresi (dk.)		7	7	7	6	6	12	12		4
		Jeneratör Kapasitesi (kg/sa.)		12.5 (7 adet)				37.5	37.5	12.5 (4 adet)		
	Toz Aktif Karbon*	Dozaj (mg/L)	5	5	5	5			5	5		
		Temas süresi (dk.)										
Hızlı Karıştırma	Alüminyum Sülfat	Dozaj (mg/L)		30	30	30	50	50	60	60	50	35-60
		Temas süresi (dk.)			0.68	1.75	0.3	0.3		1	1.5-3.0	8-16
	Demir III Klorür	Dozaj (mg/L)	25									
		Temas süresi (dk.)	1									
Yavaş Karıştırma	Poli Elektrolit	Dozaj (mg/L)	0.1	0.06	0.05	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15-0.20
		Temas süresi (dk.)	4	4	4	4	4	4			5	1
Filtre Öncesi Klor	Klor	Dozaj (mg/L)	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1.5	1.5	1.5	2-25
		Temas süresi (dk.)	5-10	5-10	5-10	5-10					15	10-15
Son Klor	Klor	Dozaj (mg/L)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5-2	1.5-2	1.5	1.5	2.5	2-10
		Temas süresi (dk.)	5-10	5-10	5-10	5-10	30	30			99	60-120

*: Tat-koku problemine bağlı olarak uygulanmaktadır. Dozaj miktarı değişiklik göstermektedir.



Şekil 2. Tesis 1'in ana su kaynağından gelen ham suda 2011-2015 yılları arasında gözlenen tat ve koku bileşikleri konsantrasyonları.

Figure 2. Concentrations of taste and odor compounds for the raw water of Plant 1's main reservoir between the years 2011-2015.

3 Yöntem

3.1 Deneysel yöntem

İSKİ Tesis 1, Tesis 2, Tesis 3, Tesis 4 ve Tesis 5 su arıtma tesislerinde, tesis girişi, ozonlama ünitesi çıkışı ve tesis çıkışından belirli zaman aralıklarında numune alınmıştır. Bu numunelerin analiz sonuçları, tesisdeki toplam giderim verimi ve proses bazında giderim veriminin tespitinde kullanılmıştır. Eş zamanlı olarak tesis girişinden alınan ham su numunelerinde bulanıklık, alkalinite, pH ve bromür analizi yapılmıştır. Ozonlama sonucunda bromat oluşma riski bulunduğu için, ham suda bromür analizi yapılması gerekmektedir. Yüksek alkalitenin pH kontrolüne etkisinden dolayı, suyun pH değeri ile etkinliği doğrudan değişen ozon prosesi sırasında alkalinite de takip edilmelidir. Ayrıca sudaki bulanıklık ve organik madde ozon ihtiyacını arttırmaktadır [17]. Dolayısıyla ham suda söz konusu analizlerin yapılması oldukça önemlidir.

Arıtma tesislerindeki ham su analizlerinin dışında, Tesis 1 ham suyu ile jar (kavanoz) testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, 3 farklı koagülan varlığında (alum, FeCl₃ ve PACl), farklı konsantrasyonda (0, 5, 10, 15, 20 mg/L) odun bazlı aktif karbon ile yürütülmüştür. Bu deneylerde aynı aktif karbon dozunda, farklı koagülanlarla çalışılarak, bu koagülanların Geosmin, 2-MIB, TOK, THM, SUVA₂₅₄ ve bulanıklık giderimine etkisi tespit edilmiştir.

3.2 Analiz yöntemleri

3.2.1 Ham su analizi

Ham suda alkalinite (SM2320), bulanıklık (SM2130), bromür (SM4500) gibi parametreler, standart metotlara uygun olarak ölçülmüştür [18].

3.2.2 Geosmin ve 2-MIB analizi

Gaz Kromatografi analizi öncesinde Karıştırma Çubuğuyla Mikro Ekstraksiyon (Stir Bar Micro Extraction, SBSE) veya Katı Faz Mikro Ekstraksiyon (Solid Phase Micro Extraction, SPME) gibi yöntemler yardımıyla 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin

ekstraksiyonuna/ayırıştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. GC-MS öncesinde numune, Manyetik Karıştırılmalı Sorptif Ekstraksiyon (Stir Bar Sorptive Extraction, SBSE) yöntemi ile hazırlanmıştır.

SPSE ile gerçekleştirilen ekstraksiyonun ardından Gaz Kromatografi-Kütle Spektrofotometri (GC-MS) ile sudaki 2-MIB ve Geosmin konsantrasyonlarının tayini yapılmıştır. Söz konusu tayinler İSKİ Kağıthane İçme suyu Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir.

3.2.3 TOK analizi

Toplam organik karbon analizi, Shimadzu VCPH Model TOK analizörü (Shimadzu, Japonya) kullanılarak İSKİ Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir.

3.3 Hesaplama yöntemleri

3.3.1 Giderim verimi

İSKİ'nin halihazırda çeşitli arıtma birimlerinde kullandığı dozlar baz alınarak (Tablo 1) ham suda ölçümler yapılmış ve çeşitli prosesler için giderim verimleri hesaplanmıştır. Uygun yöntemle analiz edilen parametrelerin konsantrasyon değerleri kullanılarak giderim verimleri Denklem (1) yardımıyla hesaplanmıştır. Ortalama giderim verimi hesabı yapılırken $0 \leq \eta \leq 100$ aralığında kalan giderim verimleri baz alınmış olup, bu aralığın dışında kalan veriler, ortalama giderim verimi hesabına dahil edilmemiştir. n_x/n_{top} oranı, belirtilen aralıkta kalan verilerin toplam veri sayısına oranını temsil etmektedir.

$$\eta = \frac{C_{giriş} - C_{çıkış}}{C_{giriş}} \times 100 \quad (1)$$

3.3.2 İstatistiksel Analiz

Bütün istatistiksel analizler için SPSS v.24 (IBM, Armonk, New York, ABD) yazılımı kullanılmıştır. Ölçülen parametrelerde, birtakım faktörlere bağlı olarak önemli salınımlar gözlenebilmektedir. Söz konusu değişkenliğin izlenebilmesi amacıyla her bir parametrenin değişim aralığını temsil eden standart sapma değeri hesaplanmıştır.

4 Bulgular

4.1 Ham su kalitesi

İSKİ Su Arıtma Tesislerinde 2011-2015 döneminde yürütülen deneylerde kullanılan ham su kalitesi, Tablo 2'de topluca verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere türbidite, toplam organik karbon ve bromür konsantrasyonları sırasıyla <10 NTU (Tesis 4 dışında), < 5 mg/L (Tesis 3 ve 5 dışında) ve ≤ 0.2 mg/L (Tesis 3 ve 4 dışında) seviyelerindedir. Dönemsel etkilere bağlı olarak türbidite ve toplam organik karbon parametrelerinde kayda değer değişimler görülebilmektedir.

4.2 Giderim verimleri

4.2.1 Toz aktif karbonla giderim

İSKİ'nin mevcut su arıtma tesislerindeki proses birimlerine destekleyici imkanlarla TAK uygulaması 2013-2016 yılları arasında Ocak-Aralık döneminde yapılarak TOK, Geosmin ve 2-MIB ölçümleri yapılmış ve giderim verimleri tespit edilmiştir (Tablo 3). Söz konusu tabloda verilen n_x/n_{toplam} değeri kullanılabilir verinin toplam veri sayısına oranını göstermektedir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan ham su kalitesi (2011-2015 dönemi).

Table 2. Water quality of the raw water used in the experiments (between the years 2011-2015).

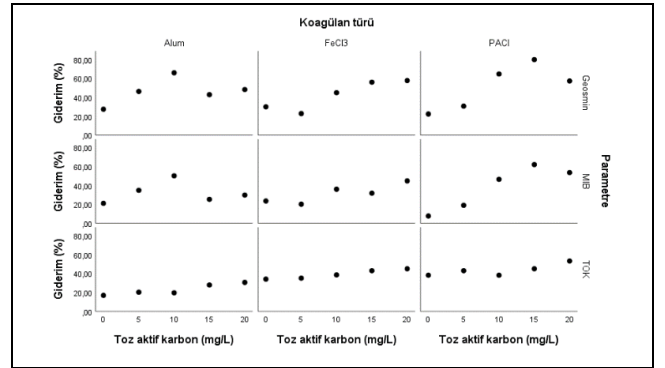
TESİS ADI	pH	Bulanıklık, NTU	Alkalinite, mg CaCO ₃ /L	TOK, mg/L	Bromür, mg/L
Tesis 1	7.74±0.27	2.3±1.48	107±17	3.27±0.44	0.05±0.02
Tesis 2 (Sazlıdere)	7.86±0.22	4.77±5.9	137±22	4.67±1.04	0.11±0.03
Tesis 2 - Tesis 3 (Terkos)	7.87±0.17	3.39±2.77	110±9	4.65±0.79	0.11±0.05
Tesis 3 (Alibeyköy)	7.88±0.27	3.53±1.96	106±15	5.14±0.96	0.26±0.07
Tesis 4	8.11±0.24	15.11±22.16	124±28	4.61±0.83	0.2±0.05
Tesis 5	7.88±0.47	7.61±7.29	108±20	6.03±1.04	0.05±0.03

Tablo 3. İSKİ su arıtma tesislerinde farklı proseslerin ortalama giderim verimleri (2013-2016 dönemi).

Table 3. Average removal rates of several processes in the water treatment plants of İSKİ (between the years 2013-2016).

Parametre	TOK (mg/L)				2-MIB (ng/L)				Geosmin (ng/L)				
	Ort	σ	ort % giderim	n _x /n _{top}	Ort.	σ	ort % giderim	n _x /n _{top}	Ort.	σ	ort % giderim	n _x /n _{top}	
Tesis 1	Ham su	2.43	0.28	-	-	5.67	4.01	-	-	2.47	1.29	-	-
	Ozon sonrası	3.26	1.37	4	31/60	18.04	22.71	37	44/97	1.86	1.13	46	52/97
	Çıkış	2.43	0.28	24	1	5.67	4.01	49	7/10	2.47	1.29	58	3/5
Tesis 2	Ham su	4.61	0.76	-	-	2.93	2.47	-	-	2.71	3.04	-	-
	Ozon sonrası	4.52	0.66	8	256/443	2.06	1.02	41	7/13	2.29	1.94	34	52/131
	Çıkış	3.11	0.46	51	65/66	1.36	0.42	47	3/7	1.71	1.01	45	7/12
Tesis 3	Ham su	4.68	0.79	-	-	2.58	2.25	-	-	2.92	3.02	-	-
	Ozon sonrası	4.56	0.71	14	201/226	1.87	1.28	35	32/63	2.2	1.35	45	19/33
	Çıkış	2.92	0.63	54	132/163	1.27	1.03	29	3/4	3.2	1.85	28	3/4
Tesis 4	Ham su	4.52	0.81	-	-	3.3	3.67	-	-	4.18	3.77	-	-
	Ozon sonrası	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Çıkış	3.37	0.55	35	117/119	1.58	1.05	19	1/3	3.96	4.29	49	4/7
Tesis 5	Ham su	5.7	0.54	-	-	4.7	7.76	-	-	5.07	2.56	-	-
	Ozon sonrası	5.87	0.58	2	13/61	1.69	0.82	62	7/18	2.61	1.01	52	5/11
	Çıkış	3.66	0.38	55	1	2.47	1.83	60	1/3	2.94	2.02	0	0

2013-15 döneminde tesis giriş-çıkış konsantrasyonlarına ait verilerde kullanılmayan verilerin bir kısmı, giriş konsantrasyonunun çıkış konsantrasyonundan küçük olduğu negatif verimlerden ileri gelmektedir. Bu değerlerin, alg hücreleri içinde bulunan 2-MIB ve Geosmin'in bir kısmının özellikle ön ozonlama sonucu salınımlı neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. Tesis 1'de tesis ham suyu ile 10 mg/L aktif karbon dozuyla yapılan jar testi çalışmasına göre, en iyi 2-MIB (%50) ve Geosmin (%66) giderimine, koagülan olarak alümin kullanıldığı deneylerde, en yüksek toplam organik karbon giderimine (%38) ise FeCl₃ kullanıldığında ulaşılmıştır. Toz aktif karbonun ilave edilmediği durumda yalnızca alümin ilavesiyle ortalama 2-MIB ve Geosmin giderimi sırasıyla %21 ve %27 olarak kaydedilmiştir. PACl varlığında ve 15 mg/L TAK dozunda ise 2-MIB ve Geosmin giderim verimlerinin sırasıyla %62 ve %80 seviyelerine kadar çıkabildiği görülmüştür (Şekil 3).



Şekil 3. Farklı koagülanlar varlığında toz aktif karbon dozuna karşılık 2-MIB, Geosmin ve TOK giderim verimleri.

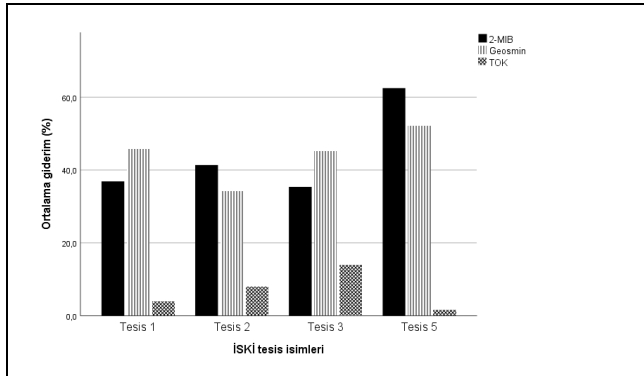
Figure 3. 2-MIB, Geosmin and TOC removal rates of several PAC dosages in the presence of different coagulants.

THM gideriminin tüm durumlarda sifıra yakın olduğu; sudaki organik bileşiklerin aromatikliği ile bağlantılı olan SUVA₂₅₄ giderim veriminin ise her üç koagulan varlığında % 60-70 aralığında kaldığı gözlemlenmiştir. Türbidite azaltımında ise FeCl₃ ve alumun, poli alüminyum klorüre göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 3'te görülmektedir.

4.2.2 Ozonlama ile giderim

İSKİ su arıtma tesislerinde 2013-15 döneminde yapılan ozonlama prosesi öncesi ve sonrasında alınan numunelerin ölçüm sonuçlarıyla elde edilen giderim verimleri Şekil 4'te verilmiştir. İSKİ Tesis 1, Tesis 2, Tesis 3 ve Tesis 5 su arıtma tesislerinin ortalama ozon temas süresi sırasıyla 7, 6, 12 ve 4 dk.; bu tesislerin ortalama ozon dozları ise sırasıyla 1.5, 1.85, 2.5 ve 4 mg/L'dir.

Tam ölçekli tesislere ait sonuçlara göre ozonlama ile 2-MIB ve Geosmin giderim verimleri sırasıyla %65 ve %50'nin altında kalmaktadır (Şekil 4). Mevcut tesislerde bulunan ozon ünitesinde tat ve koku bileşiklerinin gideriminin artırılması amacıyla, hidrojen peroksit ilavesi ile ozonun oksidasyon etkisinin artırıldığı perokson prosesi incelenmiştir. Bu kapsamda, İstanbul'daki su arıtma tesislerinden Tesis 1'de yapılan laboratuvar ölçekli çalışmaya göre, 2 mg/L ozon dozu ve 0.5 hidrojen peroksit-ozon mol oranında (H₂O₂:O₃ (n/n) = 0.5) 2-MIB ve Geosmin bileşikleri %99 oranında giderilmiştir. TOK giderimi ise söz konusu deney koşullarında %5'in altında kalmıştır [19].



Şekil 4. İSKİ SAT'lerinde 2-MIB, Geosmin ve TOK parametrelerinin ozonlama ile ortalama giderim verimleri.

Figure 4. Average removal rates of 2-MIB, Geosmin and TOC parameters with ozonation process in the WTPs of ISKI.

4.2.3 Tesislerdeki giderim verimleri

Tablo 3'te özetlenen veriler ışığında İSKİ su arıtma tesislerinde alg kökenli tat ve kokunun giderilmesinde başarıya ulaşılmış ile ilgili kapsamlı bir açıklama yapılmıştır. İSKİ'ye ait 5 tesiste 2011-15 ham su ortalama TOK konsantrasyonu 2.43 - 5.70 mg/L, 2-MIB konsantrasyonu 2.58 - 5.67 ng/L ve Geosmin konsantrasyonu ise 2.47 - 5.07 ng/L arasında ölçülmüştür. Ancak bazı tesislerdeki 2-MIB ve Geosmin değerleri dönemsel olarak sırası ile ~170 ng/L ve ~30 ng/L değerlerine (2015/16 dönemi ekstremeleri) ulaşabilmektedir. Tüm tesislerde 2013-16 yılları arasında ozon oksidasyonu sonucunda ulaşılan giderim verimi ise 2-MIB, Geosmin ve TOK için sırasıyla % 35-62, % 34-52 ve % 2-14 arasında değişmektedir (Şekil 5). 2013-2016 yılları arasında, bütün tesislerde görülen 2-MIB, Geosmin ve TOK giderim verimi sırasıyla % 19-60, % 28-58 ve % 24-55

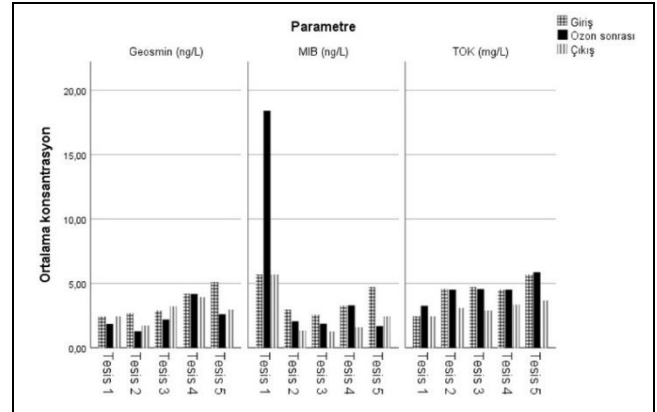
aralığındadır. Tesis bütününde elde edilen giderim değerleri, yaz mevsiminde (Mayıs-Ağustos) TAK ilavesinin yükselttiği giderimleri de kapsamaktadır. Söz konusu aylarda bütün arıtma tesislerinde koagülasyon ünitesine takriben 5 mg/L TAK eklenmekte, 2015 yılında Tesis 1'de görülen ötrofikasyon sebebiyle bu doz 15 mg/L'ye dek artırılmıştır.

4.3 Maliyet analizi

Çeşitli ülkelerde alg kaynaklı tat/koku sorununun çözümünde başarılı olduğu tespit edilen mevcut su arıtma seçenekleri, kullanım yaygınlığına göre şu şekilde sıralanabilir:

- Hidrojen peroksit ve ozon (perokson) prosesi,
- Ozon ve/veya toz aktif karbon,
- Granüler Aktif Karbon (GAK) veya ozon,
- Ozon ve UV.

Sıralanan prosesler ekseriyetle, ozon ile ön oksidasyon barındıran mevcut konvansiyonel arıtma tesislerinde, alg kökenli tat ve koku giderimini geliştirmek için kullanılan, entegre edilebilirliği basit olan proseslerdir. Bu teknolojilerden perokson prosesi ile tekil ozonun mali açıdan kıyaslaması yapılarak, mevcut tekil ozon sistemine entegre edilebilirlik açısından değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 5. İSKİ su arıtma tesislerinde farklı konumlardaki (giriş, ozon sonrası ve çıkış) ortalama 2-MIB, Geosmin ve TOK konsantrasyonları (Tesis 4'te ozon ünitesi bulunmamaktadır).

Figure 5. Average concentrations of 2-MIB, Geosmin and TOC for the different locations (influent, post-ozonation and effluent) in the water treatment plants of ISKI (Plant 4 does not include ozonation unit).

4.3.1 Tekil ozon ve perokson maliyeti karşılaştırması

Mühendislik ekonomisi analizi hesaplamalarından elde edilen sonuçlara göre, arıtma kapasitesi 100,000 m³/gün olan bir su arıtma tesisi için gereken perokson prosesi birim maliyeti 0.0267 \$/m³ (0.14 TL/ m³) olarak tespit edilmiş, bu değer ozonla ön oksidasyona göre %20 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir [20]. Günlük 100,000 m³ hacmin üzerinde kapasitesi olan arıtma tesisleri için perokson prosesi özgün toplam birim maliyeti, emniyet payıyla 0.0267 x 0.85 = 0.023 \$/m³ kabul edilebilir. Tesiste halihazırda bulunan ozonla ön oksidasyon biriminin perokson prosesine dönüşümüyle ortaya çıkan ek birim maliyet, ilk yaklaşımda 0.0027 x 0.85 = 0.0023 \$/m³ olarak alınabilir. Hesaplanan söz konusu maliyet değerleri ön değerlendirme seviyesinde tahmini değerler olup (±%20 olası sapma), benzer bir çalışma yapılması durumunda

ancak ilk yaklaşım değeri olarak alınabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Tesis 1’de perokson dönüşümü sonrasında, işletme-bakım ve birim ilk yatırım maliyetlerinin toplamı olan toplam arıtma maliyetinin, $1,000,000 \text{ m}^3/\text{gün} \times 0.0023 \text{ \$/m}^3 = 2300 \text{ \$/gün}$ (12,000 TL/gün) yükseleceği beklenmektedir.

Bu dönüşümün ardından, Mayıs-Ağustos ayları arasında ozonlama ile ön oksidasyon sistemi, hidrojen peroksit ilavesi ile perokson modunda işletilmek kaydıyla, %80’in üzerinde 2-MIB ve Geosmin giderimi elde edilerek, ilave toz aktif karbon uygulamasına ihtiyaç duyulmayabilir.

Uluslararası bilimsel araştırmalarda yeterli bilimsel kanıt olmakla birlikte, entegrasyon işlemine başlamadan önce yukarıda maliyeti özetlenmiş olan prosesin öncelikle pilot ölçekte denenmesi, sonrasında tam ölçekte işletilmeye başlanması önerilmektedir.

5 Tartışma ve sonuç

Çalışma kapsamında 2-MIB ve Geosmin giderimi amacıyla aynı tür aktif karbon varlığında farklı koagulan türleriyle çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonuçlarına göre Geosmin ve 2-MIB’in 10 mg/L TAK dozunda en fazla giderildiği koagulan alum iken, en fazla TOK giderimi FeCl_3 varlığında elde edilmiştir. Ancak PACI, maliyeti de göz önünde bulundurularak, ekonomik olduğu takdirde tesislerde alum veya FeCl_3 ’e alternatif bir koagulan olarak kullanılabilir. Zira deneysel sonuçlara göre 15 mg/L TAK dozu ile en yüksek 2-MIB ve Geosmin giderimi PACI varlığında elde edilmiştir. Ön ozonlamanın kolloidal destabilizasyonu artırıcı etkisi dolayısıyla son karar öncesinde benzer deneylerin ön ozonlama sonrası numunelerde daha fazla deneyle tekrarlanarak doğrulanmasında fayda görülmektedir. Ayrıca arıtımda DOM giderimini arttırmaya yönelik seçeneklerden biri olan katyonik sıvı polimer ilavesi, tesislerde halihazırda kullanılan anyonik sıvı polimere alternatif olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

İSKİ su arıtma tesislerinde çoğunlukla 1.5-2.5 mg/L ozon dozuna sahip ve 4-10 dk. temas süreli ön ozonlama sisteminin kullanıldığı göz önünde bulundurularak, alg kaynaklı tat/koku bileşiklerinin gideriminin artırılması için tesislerde uygulanması en makul proses geliştirme alternatifinin perokson prosesi olduğu düşünülmektedir. Zira perokson sisteminin, ozonun oksidatif etkisini ve dolayısıyla 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin giderimini arttırdığı, Tesis 1’de yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla gözlenmiştir.

İSKİ su arıtma tesislerinde görülen alg kökenli tat ve koku problemi, halihazırda bulunan ön ozonlama ünitesinin perokson prosesi sistemine dönüştürülmesiyle önemli derecede çözülebilir. Bu bağlamda, İSKİ Tesis 1, Tesis 2, Tesis 3 ve Tesis 5’teki ön ozonlama üniteleri, perokson prosesine dönüştürülebilir. Böyle bir entegrasyonla, söz konusu SAT’lerde Mayıs-Ağustos döneminde ön ozonlama birimlerinin perokson modunda işletilmesi sayesinde muhtemelen TAK uygulamasına ihtiyaç duyulmaksızın tesis çıkış suyunda (Tesis 5 hariç) $<10\text{-}20 \text{ ng/L}$ 2-MIB/Geosmin konsantrasyon değerlerine ulaşılacağı öngörülmektedir.

Çalışma sonuçlarına göre, alum veya FeCl_3 gibi bir koagulan ile birlikte makul miktarda (10 mg/L) TAK ilave edildiğinde 2-MIB ve Geosmin giderimi sırasıyla %21 ve %27’den %50 ve %66’ya yükselmiştir. Bu sebeple, bromat oluşma ihtimali sebebiyle ön ozonlama ünitesi bulunmayan Tesis 4’te ise Mayıs - Ağustos aylarında, ihtiyaç duyulduğunda aktif karbon ilave edilmesi

önerilmektedir. Bir diğer çözüm önerisi ise, İSKİ’nin su kaynaklarından görece daha iyi durumda olan bir su ile karıştırılması kaydıyla alg kaynaklı tat ve koku probleminin ortadan kaldırılabilmesidir.

6 Results and discussion

In this study, removal of 2-MIB and Geosmin with powdered activated carbon were investigated in the presence of different coagulants through several experiments. According to the results obtained from these experiments, the highest removal of Geosmin and 2-MIB with the 10 mg/L powdered activated carbon (PAC) dosage was in the presence of alum as a coagulant, while the highest total organic carbon (TOC) removal was achieved in the presence of FeCl_3 coagulant. It is recommended that the polyaluminum chloride (PACI) can be used as an alternative coagulant in the treatment plants to alum and FeCl_3 , considering the suitability from economical aspects. This recommendation was made according to the results which show that the highest 2-MIB and Geosmin removal achieved with 15 mg/L PAC was in the presence of PACI coagulant. For the decision of the most suitable coagulant, further studies should be made with the samples taken after the ozonation unit, considering the effect of pre-ozonation on the increase of colloidal destabilization. In addition to this, for increasing the DOM removal, liquid cationic polymer should be considered as an alternative to anionic polymer that used in the treatment plants.

Considering the fact that 1.5-2.5 mg/L ozone dosage and 4-10 min. contact time is preferred in the treatment plants of ISKI, the most suitable process improvement would be the peroxone process for enhancing the removal of algae-related taste and odor compounds. This recommendation was made according to the experimental results conducted in the Plant 1. Results indicate that the peroxone process increases the oxidative effect of ozone, therefore increasing the removal ratios of 2-MIB and Geosmin compounds.

Converting the pre-ozonation unit in the water treatment plants of ISKI to the peroxone process for the removal of algae-related taste and odor compounds might solve the taste and odor problem. In this context, the pre-ozonation units in the Plant 1, Plant 2, Plant 3 and Plant 5 can be converted to the peroxone process. The authors project that the recommended integration of operating the ozonation units in peroxone mode might not only provide 2-MIB/Geosmin concentrations in the effluent smaller than 10-20 mg/L (except Plant 5), but also eliminate the need of PAC addition for the May-August time period.

According to the results obtained in this study, an appropriate PAC dosage (10 mg/L) with a coagulant such as alum and FeCl_3 can increase the 2-MIB and Geosmin removal from 21% and 27% to 50% and 66%, respectively. In case of having the taste and odor problem in Plant 4, it is recommended that the addition of PAC is more suitable since this treatment plant does not include an ozonation unit. This lack of having a pre-ozonation unit in the Plant 4 is related with the high possibility of bromate formation due to the influent water characteristics. Another recommendation for all the treatment plants with the taste and odor problem is mixing the reservoir water with another water source of ISKI which has a better water quality.

7 Kaynaklar

- [1] World Health Organization. "Management of cyanobacteria in drinking-water supplies: Information for regulators and water suppliers". Geneva, Switzerland, 1st ed, Geneva, Switzerland, WHO, 2015.
- [2] Fakioglu M, Karpuzcu ME, Öztürk İ. "İçme Sularında Alg Kaynaklı Tat ve Koku Sorununun Değerlendirilmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1141-1156, 2018.
- [3] Lin TS, Watson S, Dietrich AM, Suffet IH. *Taste and Odour in Source and Drinking Water: Causes, Controls, and Consequences*. 1st ed. London, England, IWA Publishing, 2019.
- [4] Suurnakki S, Gomez-Saez GV, Rantala-Ylinen A, Jokela J, Fewer DP, Sivonen K. "Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds". *Water Research*, 68, 56-66, 2015.
- [5] Bruce D, Westerhoff P, Brawley-Chesworth A. "Removal of 2-methylisoborneol and geosmin in surface water treatment plants in Arizona". *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua*, 51(4), 183-198, 2002.
- [6] Hsieh ST, Lin TF, Wang GS. "Biodegradation of MIB and geosmin with slow sand filters". *Journal of Environmental Science and Health*, 45(8), 951-957, 2010.
- [7] Matsushita T, Matsui Y, Sawaoka D, Ohno K. "Simultaneous removal of cyanobacteria and an earthy odor compound by a combination of activated carbon adsorption, coagulation, and ceramic microfiltration". *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 57(7), 481-487, 2008.
- [8] Mizuno T, Ohara S, Nishimura F, Tsuno H. "O₃/H₂O₂ process for both removal of odorous algal-derived compounds and control of bromate ion formation". *Ozone: Science & Engineering*, 33(2), 121-135, 2011.
- [9] Cook D, Newcombe G. and Sztajn P. "The application of powdered activated carbon for mib and geosmin removal: predicting PAC doses in four raw waters". *Water Research*, 35(5), 1325-1333, 2001.
- [10] Ho L. "Optimising water treatment practices for the removal of Anabaena circinalis and its associated metabolites, geosmin and saxitoxins". *Journal of Water and Health*, 7(4), 544-556, 2009.
- [11] Srinivasan R, Sorial GA. "Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: A critical review". *Journal of Environmental Sciences*, 23(1), 1-13, 2011.
- [12] Wang Y. "Addition of hydrogen peroxide for the simultaneous control of bromate and odor during advanced drinking water treatment using ozone". *Journal of Environmental Science*, 26(3), 550-554, 2014.
- [13] Fakioglu M. Perokson (Peroxone) Prosesi ile İçme Sularından Alg Kaynaklı Tat ve Koku Bileşiklerinin Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [14] Ferguson DW, McGuire MJ, Koch B, Wolfe RL, Aieta E M. "Comparing PEROXONE and ozone for controlling taste and odor compounds, disinfection by-products, and microorganisms". *Journal AWWA*, 82(4), 181-191, 1990.
- [15] Water Quality and Treatment Solutions. "Evaluation of ozone and peroxone for water quality enhancement at the Del Valle and Patterson pass water treatment plants". California, USA, 402, 2009.
- [16] Toröz İ, Alp K, Karpuzcu E, Fakioglu M. "İSKİ Su Arıtma Tesislerinde (SAT) Organoleptik Parametrelerde İyileştirme ve Suyun İçilebilirliğinin Arttırılmasının Araştırılması". Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, Bilimsel Rapor, 2, 2016.
- [17] von Sonntag C, von Gunten U. *Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment*. 1st ed. London, England, IWA Publishing, 2012.
- [18] American Public Health Association. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". Washington DC, USA, 21st ed, 2005.
- [19] Fakioglu M. Perokson (Peroxone) Prosesi ile İçme Sularından Alg Kaynaklı Tat ve Koku Bileşiklerinin Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [20] Öztürk İ, Fakioglu M. İçme Sularından Tat ve Koku Giderimi. İstanbul, Türkiye, İSKİ, 2017.