

İçme sularında alg kaynaklı tat ve koku sorununun değerlendirilmesi Evaluation of algae related taste and odor problem in drinking water

Malhun FAKIOĞLU^{1*}, Mahmut Ekrem KARPUZCU², İzzet ÖZTÜRK³

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

Geliş Tarihi/Received: 13.12.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 17.04.2018
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.65290
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

İçme suyu, su kaynağından tüketici musluğuna ulaştırılana kadar birçok aşamadan geçmektedir. Suyun kalitesi; su kaynağındaki su kalitesine, arıtma tesisinde uygulanan proseslere ve su dağıtım şebekesinin durumuna bağlıdır. Arıtılmış suda istenmeyen tat ve koku, tüketicideki içilebilir su algısını etkilemekte ve tüketicinin musluk suyu tüketimi ile sağlık riskini ilişkilendirmesine sebep olabilmektedir. Bu durum, su temini tesislerine olan tüketici güveninin azalmasına yol açabilmektedir. Söz konusu sorunun çözümü için su otoritelerince sorunun kaynağı araştırılmakta, buna eş zamanlı olarak arıtma tesislerine kolay entegre edilebilecek sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Bu bağlamda, havzada sorunun kaynağının tespiti ve sonrasında alınacak önlemler büyük önem taşımaktadır. Ayrıca su arıtma tesislerinde tesis işletiminden kaynaklanan tat ve kokunun önüne geçilmeye çalışılmakta, bunun yanısıra 10 ng/L konsantrasyonun altında bile insanlar tarafından algılanabilen 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin oksidasyon, adsorpsiyon veya biyofiltrasyon gibi proseslerle giderimi incelenmektedir. Öte yandan, arıtılarak şebekeye verilen suda biyolojik aktiviteden veya dezenfeksiyon yan ürünü oluşumundan kaynaklanan tat ve koku oluşumu da önlenmelidir. Bu çalışmada, suyun havzadan musluğa yolculuğu boyunca suda oluşabilecek tat ve koku probleminin etmenleri ve bu soruna yönelik çözüm yolları incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tat ve koku, İçme suyu, Geosmin, 2-MIB, Alg

Abstract

Source water goes through several processes before reaching to the customer's tap. Quality of water which flows through the tap is directly related to the water quality in the reservoir, processes used in the drinking water treatment plant and the condition of the present distribution system. Taste and odor in the treated water affects the perception of the drinking water for the customers and causes them to relate it with health risks. This results with a decline in consumer reliance to the water supply system. Water authorities are not only searching for the cause of the problem, but also trying to find a solution which can be integrated to the existing Water Treatment Plant system. In this context, problems related with watershed should be determined and precautions should be taken based on these issues. In WTP's, taste and odor problem caused by wrong plant operations should be avoided while treatment processes such as oxidation, adsorption and biofiltration processes should be tested for the removal of 2-MIB and Geosmin which can be perceived by the humanbeings even at 10 ng/L. Also, taste and odor occurrence in treated water caused by biological activity or DBP's in distribution systems should be avoided. In this study, potential causes of taste and odor occurrence during the travel of water from reservoir to consumer's tap is stated along with the solutions.

Keywords: Taste and odor, Drinking water, Geosmin, 2-MIB, Algae

1 Giriş

İçme sularında oluşan tat ve koku sorunu, artırılarak tüketiciye sunulan suyun güvenilirliğini azaltarak içme suyu olarak tüketimde isteksizliğe sebep olmaktadır. Güvenirliğin artırılması amacıyla su otoritelerince tat ve kokunun kaynakları araştırılmakta, buna eş zamanlı olarak giderim yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır [1].

İçme suyunda tat ve koku sorununun çözümü için öncelikle sorunun kaynağının/kaynaklarının doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Su kaynağından tüketici musluğuna gelene dek içme suyunda tat ve kokunun oluşabileceği üç temel nokta bulunmaktadır: (1) Rezervuar (Baraj gölü) (2) Su arıtma tesisi ve (3) Su dağıtım şebekesi. Rezervuar kaynaklı tat ve koku sorunu havza koruma önlemleriyle azaltılmaya çalışılırken, su arıtma tesislerinde tat ve koku sorununa sebep olan bileşiklerin giderim verimini arttıracak çözümler geliştirilmekte (mevcut sisteme ileri oksidasyon prosesi entegrasyonu veya toz aktif karbon ilavesi gibi), öte yandan şebekede oluşan tat ve koku sorununun kaynağı araştırılmaktadır [2]. Farklı noktalarda oluşan tat ve koku, bazı biyolojik ve/veya antropojenik kaynaklardan ileri gelmektedir. Başlıca biyolojik kaynaklar olan alg (siyanobakteri) ve aktinomisetlerin (filamentli bakteriler), 2-MIB (2-metilizoborneol) ve geosmin

gibi suya topraksı ve küflü bir tat veren bazı tat ve koku bileşikleri ve toksinlerinin potansiyel üreticisi olduğu bilinmektedir [3]. Çözünmüş 2-MIB ve Geosmin, 10 ng/L konsantrasyonunun altında bile insanlar tarafından algılanabilmektedir [4]. Öte yandan, antropojenik bazı organik ve inorganik bileşikler (demir ve mangan gibi bazı metaller, halojenler, aldehit ve ketonlar) suda keskin ve çürük kokulara sebep olmaktadır [5].

Su kaynaklarında tat ve koku üreten siyanobakterilerin (mavi-yeşil algler) yoğunluk ve görülme sıklığının artışı, giderek büyüyen bir küresel sorundur [6]. Sıcaklık artışı gibi iklim değişikliği etkileri ve tarımsal besi maddesi yükü gibi insan aktiviteleri alg patlamasını arttırmaktadır. Bu bileşiklerin varlığı dünya çapında tüketici şikayetlerinin başında gelmektedir. İstanbul'da da İstanbul Su Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) baraj göllerinde alg ürünlerinden kaynaklanan tat ve koku sorunu 2011-2016 yılları arasında Mayıs - Ağustos döneminde ortaya çıkmıştır [6]. Özellikle barajları besleyen akarsu/dere ağzlarından başlayarak alg gelişiminin artması ile birlikte son yıllarda İstanbul'un önemli su kaynaklarında Geosmin ve 2-MIB değerleri 10 ng/L eşik değerinin üzerine çıkmaktadır (2-MIB>170 ng/L ve Geosmin>20 ng/L) [6].

Su arıtma tesislerinde tat ve kokunun uygun prosesler yardımıyla giderilebilmesi için dünya çapında bilimsel

araştırma çalışmaları yürütülmektedir. Tesislerde tat ve kokunun giderimi amacıyla aktif karbon adsorpsiyonu, ileri oksidasyon prosesleri ve biyolojik arıtma sistemleri ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [1].

Rezervuar ve su arıtma tesisinin yanısıra, tat ve koku sorununda su dağıtım şebekelerinin durumu da oldukça önemlidir. Tüketiciye sağlanan su, şebekede uygun basınçta dağıtılmasının yanı sıra, arıtma tesisinden tüketiciye ulaştırılana kadar dağıtım şebekesi boyunca da kalitesini kabul edilebilir bir seviyede korumalıdır. Dağıtım şebekesindeki su kalitesi bozulmaları, suyun organoleptik karakteristiğini etkileyerek tüketici şikayetleriyle sonuçlanabilir. Amerika'daki 300 su arıtma tesisinde yürütülen bir araştırmaya göre, tesislerin %65'inde tat ve koku sorununun birincil nedeni olarak su dağıtım sistemi gösterilmiştir [7].

İçme suyundaki tat ve koku yalnızca suyun içilebilirliğine ait kaygılara değil, içme suyunun sağlık ve güvenlik açısından uygunluğunun sorgulanmasına da yol açmaktadır. Bu durum, şişelenmiş su (damacana ve PET) kullanımında ve çeşitli tip ve büyüklükteki su arıtma filtre ve sistemlerine yönelişte artışa sebep olmaktadır. Tat ve koku problemleri ortaya çıktığında tüketicileri ve kamuoyunu bilgilendirecek bir planın olması bu açıdan kritik görülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde tüketicilerle yapılan anketlerde, tüketicilerin büyük bir çoğunluğunun tat ve koku problemlerinin neden kaynaklandığını bilmedikleri ortaya çıkmıştır. Tüketicilerin %29'u tat ve koku probleminin kirlilikten kaynaklandığını, %34'ü yetersiz arıtmadan kaynaklandığını, %10'u su borularındaki problemlerden kaynaklandığını düşündüğünü belirtmiş, kalan %37'lik kesim ise bir fikrinin olmadığını söylemiştir [8].

Bu çalışmada, su kaynağından tüketiciye ulaştırılan suda tat ve kokuya sebep olan etmenler kapsamlı biçimde incelenmiştir. İnceleme sonucunda havza, arıtma tesisi ve şebeke bazında alınması gereken tedbirler ve yapılması gereken eylemler belirtilmiştir. Bu çalışmada ortaya konan tedbirler, mevcut havzalarda tat ve koku sorununun ortaya çıkmasının önlenmesi açısından önem teşkil etmektedir. Çalışmada, tat ve koku probleminin su arıtma tesislerinde (SAT) giderimini sağlayan güncel proseslere ait maliyet ve uygulanabilirlik değerlendirilmiş olup, söz konusu değerlendirme tat ve koku sorunu yaşayan mevcut SAT'lerine yol gösterici niteliktedir. Bunların yanısıra bu çalışma, şebekede oluşabilecek tat ve kokunun sebepleri ve bu sebeplerin oluşumunun nasıl engellenebileceği konusunda otoritelere ışık tutmaktadır.

2 İçme suyu sistemlerinde tat ve kokunun kaynakları

2.1 Rezervuar kaynaklı tat ve koku

2.1.1 Biyolojik kaynaklar

Özellikle rezervuarlarda biriktirilen yüzeysel su kaynaklarında, aktinomisetler ve algler gibi bazı biyolojik etkenlerden dolayı sıklıkla tat ve koku problemi yaşanmaktadır. Bunun yanı sıra tat ve kokuya protozoa, mantar ve diğer sucul mikrobiyotanın da sebep olduğu bilinmektedir. Bu tür tat ve koku; "balıksı", "topraksı", "odunsu", "küflü", "somon", "gübre" ve "sardunya" gibi tanımlanmaktadır. En sık bildirilen topraksı-odunsu-küflü tat ve kokuların, belirli mavi-yeşil algler ile aktinomisetler ve birkaç mantardan kaynaklandığı bilinmektedir [5]. Eskiden tat ve koku ile ilgili olarak sadece mikrobiyal açıdan incelemeler yapılmışken, daha sonraları tat ve kokudan sorumlu belirli

bileşikleri belirleme/izole etme çalışmaları da yürütülmüştür. Bu çalışmalar, Geosmin ve 2-MIB gibi bileşiklerin aktinomiset kültürlerinden keşfini sağlamıştır. 1970 yılı sonrası ise tat ve koku çalışmaları aktinomisetlerden mavi-yeşil alglere kaymıştır [5].

2.1.1.1 Algler (siyanobakteriler)

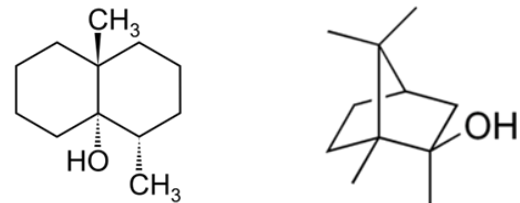
Siyanobakteriler, mavi-yeşil alg, mavi-yeşil ve siyanofita gibi birçok şekilde adlandırılmaktadır. Biyologlara göre siyanobakteriler teknik olarak alg olmayıp, fotosentetik bakteri sınıfına girmektedir. Bu durum, teknolojik gelişmelerle birlikte siyanobakterilerin daha gelişmiş mikroskoplarla incelenmesi ile ortaya çıkmıştır. Buna rağmen "mavi-yeşil alg" adlandırması hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Siyanobakterilere ötrofik sularda (nütrient bakımından zengin sular) ve sığ rezervuarlarda sıklıkla rastlanmakta ve siyanobakteriler yüzey köpüğü, bentik (taban) örtüsü ve sucul ot formunda görülebilmektedirler. 1960'lı yıllarda siyanobakterilerin hücre içi yan ürün olarak geosmin ve MIB ürettiği keşfedilmiştir. Ötrofikasyonun meydana gelmesi halinde bakteriler öterek koku bileşiklerini suya bırakmaktadır [9].

İçilebilir su üretiminde deneyimli kişiler, algleri ham su kaynaklarındaki tat ve kokunun en önemli sebebi olarak görmektedir. Algler bu kaynaklarda oldukça yaygındır ve içme suyunun organoleptik kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Mavi-yeşil algler ve kamçıllılar gibi bazı diatomlar başlıca sorun kaynakları olsa da, desmidleri de içeren bazı yeşil alglerin de, bu sorun kaynaklarından biri olduğu belirtilmektedir. Jüttner, içme sularında tat ve kokuyla ilişkilendirilen birçok alg türünü tabloşturmıştır [10].

2.1.1.2 Aktinomisetler

Aktinomisetler filamentli bakterilerdir. Göllerin su kolonu ve sedimentleri ile akarsular ve nehirler gibi çeşitli habitatlarda bulunarak alg ve sucul bitkilerle uyum içinde yaşamaktadırlar. İçme sularında çok sayıda aktinomiset kaynaklı tat ve koku problemi bildirilmiştir. Aktinomisetler belirli çevresel durumlarda bina iç tesisatında tipik topraksı ve küflü tatlar üretebildiklerinden su dağıtım/ısale şebekelerinde de soruna yol açabilirler. Aktinomiset büyümesi genelde 7-8°C'de başlar; fakat hızlı büyüme 20°C'nin üstüne çıkmadan başlamaz. 33-34°C civarlarında ise büyüme oldukça hızlı olsa da, göreceli olarak azalmaya başlar. 41°C'ye ulaşıldığında ise büyüme durur.

Aktinomiset kültürü çalışmalarında Gerber ve Lechevalier'in *Streptomyces* kültüründen izole ederek keşfettiği bir bileşik olan Geosmin molekülünün, topraksı küflü kokunun sebebi olduğu belirlenmiştir. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) adlandırması (4S, 4aS, 8aR)-4, 8a-Dimetil-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8-octa hidronaphthalene-4a-ol olan bu molekülün (C₁₂H₂₂O) moleküler yapısı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Geosmin (sağda) ve 2-MIB (solda) moleküllerinin moleküler yapısı [11].

Daha sonraları, küf kokulu diğer bir bileşik aktinomiset kültüründen izole edilmiş ve 2-metilizoborneol (2-MIB) olarak tanımlanmıştır. Bu bileşik *Streptomyces antibioticus*, *S. Praceox* ve *S. Griseus* adında üç aktinomisetin kültüründen izole edilmiştir. 2-MIB, IUPAC adıyla 1, 2, 7, 7-tetrametilbisiklo [2, 2, 1] heptan-2-ol'ün moleküler yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Tablo 1, Geosmin veya 2-MIB üreten aktinomisetleri göstermektedir [5].

Tablo 1: Geosmin ve 2-MIB üreten aktinomisetler [12].

Geosmin Üreticileri	2-MIB Üreticileri
<i>Actinomyces biwako</i> , <i>Microbispora rosea</i> , <i>Nocardia</i> <i>sp.</i> , <i>Streptomyces antibioticus</i> , <i>S.</i> <i>fradiae</i> , <i>S. griseus</i> , <i>S. odofier</i> , <i>S.</i> <i>alboniger</i> , <i>S. lavendulae</i> , <i>S.</i> <i>viridochromogenes</i> , <i>S.</i> <i>griseoluteus</i> , <i>S. chibaensis</i> , <i>S.</i> <i>fragilis</i> , <i>S. griseoflavus</i> , <i>S.</i> <i>neyegawaensis</i> , <i>S. phaeofaciens</i> , <i>S. prunicolor</i> , <i>S. versipellis</i> , <i>S.</i> <i>werraensis</i> , <i>S. albidoflavus</i>	<i>Actinomadura sp.</i> , <i>Nocardiosis</i> (<i>Actinomadura</i>) <i>dassonvillei</i> , <i>Streptomyces</i> <i>antibioticus</i> , <i>S. griseus</i> , <i>S.</i> <i>praecox</i> , <i>S. griseoluteus</i> , <i>S.</i> <i>lavendulae</i> , <i>S. odofier</i> , <i>S.</i> <i>chilbaensis</i> , <i>S. fragilis</i> , <i>S.</i> <i>neyagawaensis</i> , <i>S.</i> <i>phaeofaciens</i> , <i>S.</i> <i>prunicolor</i> , <i>S. versipellis</i> , <i>S.</i> <i>werraensis</i>

2.1.2 Antropojenik kaynaklar

İçme sularındaki tat ve kokular, tek bir maddeden veya çeşitli maddelerin sinerjetik etkisiyle meydana gelebilmektedir. Bu maddelerin kaynağı çeşitlilik göstermekte, çoğunluğu endüstriyel üretim prosesi atık su deşarjlarından kaynaklanmaktadır.

Çok sayıda organik kimyasalın (saf bileşikler) KEK (koku eşik konsantrasyonu) değerleri laboratuvar çalışmalarıyla tespit edilmiştir. Bu kimyasallar (Tablo 2) endüstride yaygın kullanımları göz önüne alınarak seçilmiştir ve atık suda bulunması muhtemel bileşiklerdir [5].

KEK değerinin yanısıra, tat ve koku kalite ölçümü için birkaç metot ve az sayıda yönetmelik bulunmaktadır. En yaygın ölçüm sistemi olan toplam koku numarası (TON), seyreltim sonrası kokunun kalıcılığını esas alan bir yöntemdir. Diğer yöntemler; tat profil analizi (flavor profile analysis) ve mikrokirleticilerin kimyasal konsantrasyonların analitik ölçümüdür. Konu hakkında yönetmelik sayısı kısıtlı olup, Amerikan Çevre Koruma Ajansı (USEPA)'nın belirlediği ikincil maksimum konsantrasyon limiti, TON için 3'tür. Tat ve koku açısından birincil bağlayıcı faktörün tüketicinin kendi algısı olduğu belirtilmektedir [13].

2.2 Arıtma işlemlerinden kaynaklanan tat ve koku

Tat ve kokuyu etkileyen en önemli arıtma kademesi, klorlama ve ozonlama gibi oksidatif proseslerdir. Bu prosesler sonucunda, aynı zamanda en yaygın tat ve koku bileşiklerinden olan dezenfeksiyon yan ürünleri de oluşmaktadır.

2.2.1 Halojenler

Su tüketicilerinin çoğu, arıtılmış içme suyunda tat ve kokuya yol açan bileşiklerin klor dezenfektanları olduğunu düşünmektedir. Çok sayıda araştırmada klor, brom ve iyot için tat ve koku eşik değeri bulunmuş, bakiye klor için koku eşik değerlerinin önemli ölçüde pH'a göre değiştiği belirlenmiştir [5]. pH=5.0'da bakiye klor eşik değeri 0.075 mg/L iken pH=7.0'de eşik değerinin 0.156 mg/L ve pH=9.0'da ise 0.450 mg/L olduğu tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada,

hipokloröz asit ve hipoklorit iyonunun da benzer klorlu tat ve kokuya neden olduğu belirtilmiştir. Monokloramin çözeltileri klor benzer tat ve koku verirken, dikloraminin tat ve kokusunun, yüzmeye havuzu kokusuna benzer (klor veya çamaşır suyu gibi) olduğu belirtilmiştir [5].

Klor dioksit (ClO₂) geçmişte koku kontrolü, dezenfeksiyon, çözünebilir metallerin oksidasyonu ve TriHaloMetan (THM) oluşumunun azaltımı gibi sorunların çözümü için kullanılmıştır. Fakat son yıllarda su dağıtım şebekelerindeki kokular bu oksidanın varlığıyla da ilişkilendirilmiştir [7]. Bildirilen kokuların şebekede ara sıra görüldüğü ve rastgele dönemlerde meydana geldiği belirtilmektedir. Bu kokuların klor benzeri, gaz yağı ve kedi idrarı kokusuna benzediği ifade edilmektedir.

Dünya genelinde içme suyu şebekelerindeki minimum güvenli bakiye klor aralığının 0.2-0.5 ppm düzeyinde tutulması önerilmektedir. Halk sağlığı bakımından tehlike arz etmeyen azami bakiye klor seviyeleri ise 4-5 ppm civarındadır [14],[15].

Tablo 2: Çeşitli kimyasalların koku eşik konsantrasyonları (çok sayıda panelist ve gözlemden elde edilen sonuçlar) [5].

Kimyasal Adı	Ortalama KEK (ppm)	Aralık (ppm)
Asetik asit	24.3	5.07-81.2
Aseton	40.9	1.29-330
Asetofenon	0.17	0.0039-2.02
Asetonitril	18.6	0.0031-50.4
Allil klorür	14700	3600-29300
n-Amil Asetat	0.08	0.0017-0.86
Anilin	70.1	2.0-128
Benzen	31.3	0.84-53.6
n-Bütanol	2.5	0.012-25.3
n-Bütil Merkaptan	0.006	0.001-0.06
p-Klorofenol	1.24	0.02-20.4
o-Kresol	0.65	0.016-4.1
m-Kresol	0.68	0.06-4.0
Dikloroizopropileter	0.32	0.017-1.1
2,4-Diklorofenol	0.21	0.02-1.35
Dimetilamin	23.2	0.01-42.5
Etilakrilat	0.0067	0.0018-0.0141
Formaldehit	49.9	0.8-102
2-Merkaptoetanol	0.64	0.07-1.1
Mesitilen	0.027	0.00024-0.062
Metilamin	3.33	0.65-5.23
Metil Etil Piridin	0.05	0.017-0.225
Metil Vinil Piridin	0.04	0.015-0.12
β-Naftol	1.29	0.01-11.4
Oktil Alkol	0.13	0.087-0.56
Fenol	5.9	0.016-16.7
Piridin	0.82	0.007-7.7
Kinolin	0.71	0.016-4.3
Stiren	0.73	0.02-2.6
Tiyofenol	13.5	2.05-32.8
Trimetilamin	1.7	0.04-5.17
Ksilen	2.21	0.26-4.13

2.2.2 Klorofenoller

Arıtılmış içme sularında tespit edilen ilk dezenfeksiyon yan ürünlerinden biri, klor ve fenolün reaksiyonundan oluşan klorofenollerdir. Kentsel alanlardaki içme suyu aboneleri sıklıkla "iyot" veya "tıbbi" tattan dolayı şikayette bulunmuşlardır. Klorofenoller oldukça düşük KEK değerlerine sahipken, fenol (C₆H₅OH) KEK değeri (5.9 mg/L) daha

yüksektir. Artırılmış bir su kütlesi, arıtma tesisini kabul edilebilir tat ve koku konsantrasyonlarıyla terk etse bile, su eser konsantrasyonda (<1 mg/L) fenol içermekte ise su dağıtım sisteminde (şebekede) klorofenollü bileşikler oluşabilir.

2,4-DCP (diklorofenol), 2,6-DCP ve 2-CP (klorofenol) bileşiklerinin en yüksek tat ve kokuya sahip olduğu bilinmektedir [5]. Bu bileşiklerin oluşturduğu tat yoğunluğunun pH ile ilişkisi de araştırılan bir diğer konudur. Ayrıca, klorlama sonucu yoğun tada sebep olan bileşiklerin oluşumunun amonyak varlığında daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Bu durum uygun ortamda, arıtma tesisinde algılanamayan fakat şebeke sonundaki su tüketicisinin algılayacağı “tıbbi” tadın oluşumuyla sonuçlanabilir [5].

2.3 Su dağıtım şebekelerinde tat ve koku sorunu

Son 20 yılda tat ve koku kontrolünde büyük gelişmeler görülse de, sorunun daha çok su kaynağı veya arıtma esnasında oluşma ihtimali üzerinde yoğunlaşmıştır. Suyun şebekeye verilmek üzere arıtma tesisinden çıkışından sonraki zaman içerisindeki kalite değişimi hakkında oldukça az bilgi mevcuttur. Rezervuar veya arıtma tesisinde tat ve koku oluşumu gözlenirse dahi, dağıtım şebekesinde bu sorun meydana gelebilmektedir. Burlingame (1995)’in çalışması, bu güne dek dağıtım sistemlerinde yaşanan tat ve koku sorunu hakkında kapsamlı bilgiler içermektedir [16].

AWWA (American Water Works Association) tarafından, şebekede tat ve kokunun oluşumunda rol oynayan anahtar parametrelerin tanımlanması, kimyasal ve mikrobiyolojik etkenlerin belirlenmesi, özgül su kalite sorunlarına potansiyel çözümler getirilmesi ve su tesislerinin bu problemleri çözebilmesi veya önleyebilmesi için bir rehber hazırlanmıştır [7]. Söz konusu çalışmada tat ve kokuya yol açan etkenler biyolojik aktivite, dezenfektanlar, dezenfeksiyon yan ürünleri ve sürekli reaksiyonları, dağıtım şebekesi malzemelerinden (boru, vana vb.) salım ve farklı özellikteki suların karıştırılma faktörleri olarak sıralanmıştır.

Dağıtım şebekelerinde oluşan tat ve koku hakkındaki bir diğer çalışmada ise içme sularındaki mikroorganizmaların, tüketiciye ulaştırılan sudaki tat ve kokuya büyük oranda sebep olduğu belirtilmiştir. İçme suyu dağıtım sistemlerinin dezenfektan varlığında dahi biyofilmlere ve içerdikleri mikroorganizmalara ev sahipliği yaptığı ifade edilmiştir. Bu mikroorganizmalar tat ve kokuya sebebiyet veren bakteriler, fungi ve algler olup, suya kazandırdıkları tat ve koku bileşiklerini (Geosmin ve 2-MIB gibi) dolayısıyla kullanıcıya iletilen suyun organoleptik kalitesi üzerinde istenmeyen etkilere sebep olmaktadır [17]. Bu bağlamda heterotrof koloni sayımı (HKS), tat ve koku sorununun takibinde uygulanabilirliği yüksek ve düşük maliyetli bir yöntemdir. HKS’ler su ile taşınan çeşitli mikroorganizmaları kapsamayı amaçlayan birçok basit kültüre dayalı geliştirilen testlerdir. HKS popülasyonundaki değişimler, biyofilmlerdeki üremeye işaret etmekte; bu durum mikrobiyal kaynaklı organoleptik bileşiklerin üretimiyle ilişkilendirilebilmektedir [18]. Heterotrof koloni sayımı, şebekedeki tat ve koku şikayetlerini araştırmada Amerika’da yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Söz konusu yöntem, ülkemizde yaygın kullanılmamakta birlikte, tat ve koku sorununun takibinde kullanılmasında yarar görülmektedir.

2012’de yapılan küresel ölçekte bir çalışmaya göre iç tesisat, korozyon ve biyofilm büyümesi, şebeke ile ilişkili tat ve koku sorununun ana sebepleri olarak sıralanmıştır [19].

Biyofilmler 30 yıldır üzerinde yoğun çalışılan bir konu olmasına rağmen, dağıtım şebekelerindeki biyofilmlerden kaynaklanan sorun hakkında sayılı çalışma vardır [20]-[22]. Su kaynaklarındaki mikroorganizmalar tarafından üretilen tat ve koku birçok çalışmanın konusu olsa da, bu çalışmaların birçoğu boru hatları yerine göller [23],[24] rezervuarlar [25],[26] ve yeraltı suları [27] gibi doğal sulardaki bakteri ve algler ile ilgilenmiştir. Bir başka çalışmaya göre, istenmeyen tat bileşiklerinin oluşumuna sebep olan dağıtım şebekelerindeki mikrobiyal aktivite, tat ve koku sorununun %40’ını oluşturmaktadır [28]. Bu nedenle biyofilmler tat ve koku bileşiklerinin kaynağı olarak gösterilebilmektedir. Öte yandan, boru malzemesi veya korozyona kıyasla biyojenik tatlar, boru yüzeyindeki dirençli biyofilm örtüsü sebebiyle kolaylıkla kontrol edilememektedir.

İsale/dağıtım hattındaki ölü uçlar, suyun sirküle olamaması ve düzensiz tahliyeler nedeniyle, şebekede biyolojik aktivite meydana gelmektedir [5]. Önemli büyüme faktörlerinden biri olan besi maddesi, aktinomisetler tarafından boruların iç çeperinde (ve dış yüzeyinde) biriken organik maddeden sağlanabilmekte, bunun neticesinde tat ve koku sorunu meydana gelmektedir. Aktinomisetler, su dağıtım şebekelerindeki tat ve koku oluşumunda göz ardı edilebilen kaynaklardan biridir. Aktinomisetlere borulardaki durgun alanlarda sıklıkla rastlanılmış [29], aktinomistlerin spor oluşturabilme özelliklerinden dolayı diğer bakterilere göre dezenfektanlara daha dirençli oldukları tespit edilmiştir [30]. Birkaç aktinomiset türünün (*Streptomyces*, *Microbispora*, *Nocardia*, *Actinomadura*, *Thermoactinomyces* gibi) kokuya sebep olan bileşiklerini ürettiği kanıtlanmıştır [31]. Bunların arasında *Streptomyces*, büyük miktarda uçucu organik terpenoidleri (2-MIB, Geosmin), pirazinleri ve diğer istenmeyen tat veren bileşiklerini (dimetil sülfür, dimetil trisülfür, mucidone) üretebilmekte ve tat ve kokudan sorumlu ana tür olarak gösterilmektedir. Araştırmacılar *Streptomyces* türünü [döngüsel klorlamadan sonra] boru hatlarında aktinomisetlerden 2-MIB üretimini sağlamak amacıyla kullanmışlardır [22].

İçme suyunu ileten borulardaki mantarlar da tat ve koku üretiminde önemli kaynaklardan biridir. Birçok mantar türünün (örneğin *Chaetomium globosum* gibi) geosmin bileşiğini ürettiği tespit edilmiştir [17]. Dağıtım şebekelerinde tat ve koku bileşiklerini üreten başka mikroorganizma türleri de bulunmaktadır. Şebekedeki sülfürlü bileşiklerin temel nedeni tiyobakteri ve sülfat-indirgeyici bakterilerdir. Nutrient ve gün ışığı noksanlığı sebebiyle su dağıtım şebekeleri alglerin hayatta kalması için ideal koşullara sahip olmasa da, bazı özel alg türlerinin borularda yaşamını sürdürdüğü durumlar bulunmaktadır. Diatomlar gibi bazı algler, bitkilerden borulara taşınarak borulardaki biyofilm yüzeylerinde birikebilmekte, bu algler ışık geçirme özelliğine sahip polipropilen random (PP-R) boruların yüzeyinde yaşayabilmektedir.

İçme sularında, dağıtım şebekesi kaynaklı çözünmüş inorganik bileşikler sebebiyle oluşan tatlara da sıklıkla rastlanmaktadır. Su sıklıkla bakır, demir, mangan ve çinko gibi metallere dolaylı olarak “acı” ve “metalik” bir tat kazanır. Bu metallere Cu, Fe ve Zn gibi metaller, suyun iletildiği bakır ve çelik borulardaki korozyondan ötürü meydana gelmektedir. Bu tespit özellikle yumuşak ve asidik özellikteki sular için geçerlidir. Bu metallerin eşik değerlerinin tespit edildiği bir çalışmanın sonucu Tablo 3’te verilmiştir [5]. İçme suyu ile ilgili yönetmeliklerde metal tat konsantrasyon eşikleri belirlenirken bu değerler dikkate alınmaktadır.

Tablo 3: Distile suda algılanabilen konsantrasyon aralıkları [5].

Metal adı	Eşik Dağılımı	
	%5	%95
Çinko	4.3	62
Bakır	2.6	15.8
Demir	0.04	256
Mangan	0.9	487

3 Tat ve koku probleminin önlenmesi

3.1 Havzada izleme ve kontrol tedbirleri

3.1.1 Noktasal ve yayılı kirliliklerin önlenmesi

Su havzalarını kirleten kaynaklar noktasal ve yayılı kirlilik kaynaklarıdır. Bu kirlilik neticesinde su kaynağında ötrofikasyon meydana gelmekte ve çeşitli algal metabolitler suya istenmeyen tat ve koku vermektedir. Dolayısıyla, havzada alınacak önlemler, içme suyundaki tat ve koku sorununun oluşmasını önlemede oldukça kritik bir öneme sahiptir.

Toplam noktasal kirlilik yükü, kentsel atıksu ve arıtma taşınımından gelen yük ile köy arıtmasından gelen yükün toplamını ifade etmektedir. Yayılı kirletici kaynaklardan oluşan en önemli kirlilik parametreleri makro besi maddeleri olan azot (N) ve fosfor (P)'dur. Su kaynaklarındaki kalitenin iyileştirilmesi ve korunması için noktasal kirleticilerin yanı sıra, su ve havza kirlenmesi üzerinde büyük etkisi olan yayılı kirleticilerin belirlenmesi ve kontrolü de son derece önemlidir. Başlıca yayılı kirlilik kaynakları; tarım ve hayvancılık dışı arazi kullanımı, tarımsal faaliyetler, hayvancılık faaliyetleri, atmosferik taşınım, foseptikler ve düzensiz atık depolama alanları olarak sıralanabilir.

Ötrofikasyon riskinin azaltılabilmesi için havzalardaki noktasal ve yayılı kirletici kaynakların daha etkin kontrolü gerekmektedir. Bu kapsamda su havzalarında yer alan yerleşimlerde birleşik sistem atık su kanalizasyon sistemlerinin ayırık sisteme (atık su ve yağmur suyu için ayrı toplama şebekeleri) dönüştürülmesi, köy yerleşimlerine uygun arıtma tesisleri yapılması, tekil evler için daha etkin ve denetimli vidanjör hizmeti sunulması, havza koruma bölgeleri içindeki yapılaşmanın, tarımsal ve sanayi faaliyetlerinin engellenmesi, havzadaki tarım ve hayvancılık faaliyetlerinde iyi tarım ve hayvancılık prensiplerinin uygulanması ve organik tarımın teşviki öncelikle takip edilmelidir [6].

3.1.2 Göl ve baraj haznelarında alg kontrolü uygulamaları

Sucul bitkiler besinlerini çökelti/tortulardan veya su kolonlarından almaktadır. Bu besinler çökelti ve su bünyesinde yıl boyu çevrim halindedir. Göl veya haznelere dış kaynaklardan aşırı miktarda nütrient girişi olursa ötrofikasyon gerçekleşmektedir. Nütrient ve sedimentler (toplam katı madde, TKM) tarım, evsel ve endüstriyel atık su deşarjları, erozyon vb. sebeplerden artabilmektedir. Hareketli su seviyesi, su sıcaklığı, hareketsizlik, çeşitli kaynaklardan besi maddesi girişi (tarım vb.) ve diğer faktörler su kütlesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Söz konusu faktörler, içme suyu kaynaklarında alglerin aşırı çoğalmasına ve alg kaynaklı istenmeyen renk, koku ve tat oluşumuna sebep olmaktadır. Bu sorunun, rezervuarda bir takım alg kontrolü uygulamaları ile çözüme ulaştırılması mümkündür [6].

İstenmeyen sucul bitki türlerinin kontrolünde uygulanan en yaygın teknik kimyasal kullanımıdır. Bu yöntem mekanik kontrol işlemlerinden daha uzun süre ve etkili kontrol

sağlamaktadır. Ucuz olmasının yanı sıra, uygulama sırasında az işçilik ve ekipman gerektirmektedir. Bu yöntemin kullanıcıya esnek çalışma ve hareket kabiliyeti sağlaması da bir diğer üstünlük olarak görülmektedir.

Algisitler, hedeflenen alg kontrolünden kısa bir süre sonra parçalanır ve aktive olmazlar, ayrıca (doğru ve bilinçli uygulandıklarında) balıklarda biyobirikime sebep olmazlar [32]. Yaygın olarak kullanılan bazı algisitler; bakır sülfat, bakır esaslı şelatlı ürünler, benzalkonyum klorür ve simazindir. Bazı algisitlerin uygulamaları sırasında beklenmedik etkiler de görülebilir, bu yüzden uygulanacak algisit seçimi önemlidir. Zamyadi ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, alg patlaması olaylarına eğilimli su kütlelerindeki bakır sülfat dozlaması esasında, yüksek miktarda hücre içi bileşenlerin salındığı gözlemlenmiştir [3].

İSKİ Baraj haznelarında CuSO_4 ve/veya Algisit uygulamaları ile alg kontrolü çalışmaları genelde 10~20 ng/L Geosmin/2-MIB düzeyinden itibaren başlatılarak alg gelişimi baskılanmaya çalışılmaktadır. Su kaynağındaki bu çalışmalar öncelikle su alma ağız uzağında, dere ağızları civarındaki sığ kesimlerde yoğunlaşarak istenmeyen mavi yeşil alg türlerinin gelişmesinin yavaşlatılması hedeflenmektedir [6].

Bakır sülfatın, çevreye zararlı etkisinden dolayı alg kontrolünde kullanılması önerilmemektedir. Bakır sülfat, balıklar ile diğer organizmalarda toksik etkiye neden olmaktadır [32]. Bu kimyasalın aşırı kullanımı, etkisini kaybetmesine sebep olmakta, ayrıca bakır, dip bölgelere çökerek sediment oluşturmaktadır.

Kimyasal kontrol 6 aşamadan meydana gelmektedir [32]:

Bitki Türlerinin Belirlenmesi: Algler, yüzen bitkiler, sualtı bitkileri, su altından yüzeye çıkan bitkiler gibi bitki türlerinin varlığının detaylı araştırmasının yapılması gerekmektedir.

Uygulama Alanının Tespiti: İstenmeyen alg ve bitki türleri tespit edildikten sonra, uygulama yapılacak alanın büyüklüğünün yaklaşık olarak tespiti yapılmalıdır. Sahil şeridi, dikdörtgen veya kare planlı su kütleleri, dairesel ve oval su kütleleri için yüzey alanı ve su hacmi belirlenmelidir.

Kimyasal tespiti: Kimyasal seçiminde bitki türünün doğru seçilmiş olması önemlidir. Ürünün etkisi, toksikliği, çevreye etkileri ve ekonomikliği, kimyasal seçiminde önemli diğer unsurlardır.

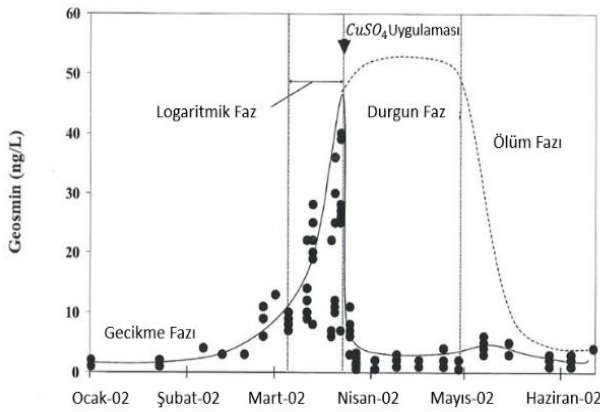
Ekipman seçimi: Uygulama alanı büyüklüğüne göre kimyasallar bot ya da motorize sprey tankı ile alana ilave edilebilmektedir. GPS teknolojisi ile uygulama alanı ve rota tespiti yapılabilir. Derinlik ölçüm aletleri kullanılarak gerekli ürün miktarı hesabı yapılabilir. Dijital debimetreler yardımıyla ne kadar ürün uygulandığının tespiti de mümkündür.

Kimyasal uygulaması: Uygulamadan önce ön hazırlık yapılarak çalışma alanı sınırları belirlenmeli, gerekli olması halinde kimyasal için seyreltme ve kalibrasyon yapılmalı ve doğru uygulama zamanı belirlenmelidir. Uygulama sığ sudan derin suya doğru yapılmalıdır.

Gözlem ve Takip: İlk uygulamayı takiben 10-30 gün içerisinde uygulamada gözden kaçan alanlar ve yeniden büyüyen alglerin kontrolü gereklidir. İlk uygulamada kullanılan miktarın %25'i kadarı yeniden uygulama için stokta bulundurulmalıdır. Uygulama sonrası takip ve elde edilen gözlem sonuçları neticesinde gidişatın belirlenmesi oldukça önemlidir [32].

3.1.3 Su kalitesi izleme programı oluşturulması

Tat ve koku problemlerinin kontrol altına alınmasında temel stratejilerden biri problem fazla büyümeden ve kullanıcılara yansımadan sorunun kaynağının tespit edilerek gerekli müdahalenin yapılmasıdır. Hassas kullanıcılar Geosmin ve 2-MIB maddelerinin çok düşük konsantrasyonlarında (~5 ng/L) bile rahatsızlık duyabilmektedir. Bu konsantrasyonlar rutin analitik metotlarla ölçülebilen limit değerlere (~1 ng/L) oldukça yakındır. Bu yüzden izleme programı kapsamında bu maddelerin doğru ve hassas şekilde ölçüldüğünden emin olunmalıdır. Alg büyüme eğrisi genel olarak bir gecikme (lag) fazı, hızlı (logaritmik) büyüme evresi, durgunluk evresi ve ölüm evresinden oluşmaktadır. Geosmin ve 2-MIB konsantrasyonları da bu evrelere paralel olarak değişim göstermektedir (Şekil 2).



Şekil 2: Alg büyüme eğrisi-Geosmin konsantrasyonu ilişkisine bir örnek (Perris Gölü, Kaliforniya, ABD) [8].

Lag veya gecikme fazı tat ve koku probleminin başlangıcını tespit etmek için en ideal zaman dilimidir. Geç kalındığı takdirde logaritmik büyüme evresinde durum hızla kontrolden çıkabilir. Problemin başladığını tespit etmek için 1-10 ng/L aralığında, mümkünse 1-6 ng/L aralığında konsantrasyon artış trendlerini iyi bir şekilde gözlemlemek ve takip etmek gerekmektedir. Önceki çalışmalarda konsantrasyon artış trendlerine önlem alınmazsa birkaç gün içerisinde göl suyunda 10 ng/L seviyelerinden 300-400 ng/L seviyelerine hızlı artışların olduğu gözlemlenmiştir [8]. Bu sürenin kısalığı göz önünde tutulduğunda, erken uyarı mekanizması oluşturulmasının önemli bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Sağlıklı bir erken uyarı mekanizması için ilk şart, tat ve koku bileşiklerini hassas, doğru ve çabuk bir şekilde ölçebilecek analitik yeterliliğe sahip olmaktır. Numune alınacak noktalar tespit edildikten sonra numune alma stratejisi belirlenerek, personel ve ekipmanlar iyi bir şekilde organize edilmeli ve alınan numuneler mümkün olan en kısa sürede analiz için laboratuvara ulaştırılmalıdır [8].

Düzenli izleme çalışmaları esnasında tat koku probleminin başladığına ait bulgulara rastlanırsa, problemi tanımlamak amacıyla (1) problemin kaynaklandığı noktayı bulmak, (2) problemin büyüklüğünü tespit etmek, (3) probleme yol açan türleri belirlemek gibi çözüme yönelik kritik bilgiler elde edilmelidir.

Fosfor, ötrofik göllerde siyanobakterilerin büyümesinde önemli rol oynayan kilit besi maddelerinden biridir. Bu nedenle fosfor konsantrasyonundaki artış, tat ve koku sorununun habercisi niteliğindedir. Sabater ve Vilalta [33] tarafından

yapılan çalışmada, azotun sınırlayıcı olduğu durumda yüksek fosfor seviyesi görülen su kaynağında (~0.4 mg/L), mavi yeşil alglerin kitlesel büyümesi için ideal koşulların oluştuğu görülmüştür. Watson [34] ve Downing [35], yaz ve sonbahar sonlarına tekabül eden dönemde orta derecede toplam fosfor seviyesinin siyanobakteriyel patlamaya sebebiyet verdiğini belirtmiş, 30 - 70 µg/L aralığındaki fosfor seviyesinin siyanobakteriyel büyüme için en ideal aralık olduğunu tespit etmiştir [11].

Newcombe [36], 2-MIB/Geosmin seviyeleri ile klorofil-a değerleri arasında doğrudan bir ilişki olduğunu (siyanobakteri türü mavi-yeşil alglerin ağırlıklı olduğu durumlar) gösteren bazı çalışmaların olduğunu [37]-[39] fakat diğer bazı çalışmaların klorofil-a ile Geosmin arasında herhangi bir ilişki/korelasyon bulunmadığını gösterdiğini belirtmektedir [11]. ABD'nin Kansas eyaletinde bulunan Big Hill rezervuarında yapılan bir çalışmada Geosmin konsantrasyonu ile klorofil-a arasında pozitif bir ilişki gözlemlenmiştir [40]. Bu tür parametre ilişkileri sayesinde tat ve koku bileşiklerinin oluşumu önceden tahmin edilebilmekte, bu ilişkiler bir tür erken uyarı görevi görebilmektedir.

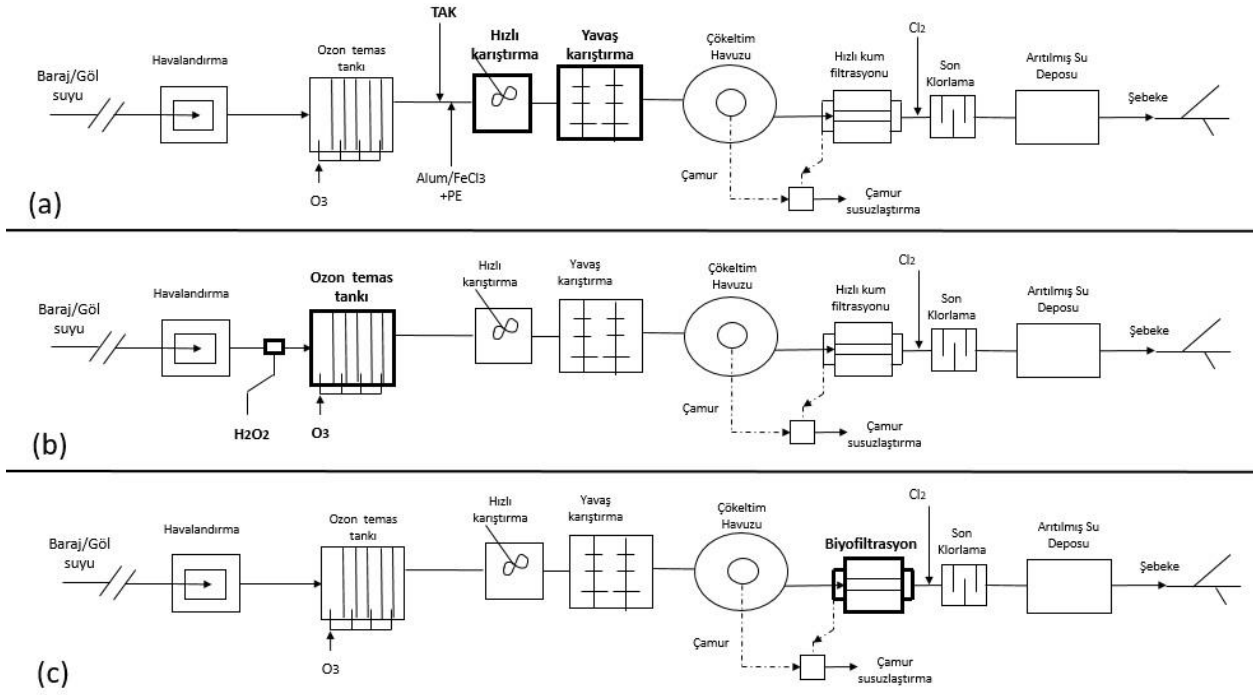
Geosmin/2-MIB bileşiklerine ait hücre içi/hücre dışı kirletici oranının incelendiği bir diğer çalışmada, alg patlamasının olduğu dönemde arıtma tesisinde çökeltme tankı veya çamur ünitelerinden düzenli numune alımı önerilmiştir. Bu numune alım işlemi, tat ve koku bileşikleri salımı riskini doğru tahmin etme ve önleyici tedbirleri başarılı bir biçimde uygulamada gerekli bir adım olarak görülmüştür [3].

3.2 Su arıtma tesislerinde tat ve koku giderim yöntemleri

Su arıtma tesislerindeki koagülasyon, çökeltme ve klorlama gibi konvansiyonel arıtma prosesleri 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin gideriminde etkisizken, toz aktif karbon, ozonlama, biyofiltrasyon gibi proseslerin başarılı olduğu önceki çalışmalarla gösterilmiştir [41]-[46]. Örnek akım şemaları, (a) Toz aktif karbon, (b) Perokson ve (c) Biyofiltrasyon prosesleri için Şekil 3'te verilmiştir.

Öte yandan, bazı faktörlerin su arıtma tesislerindeki 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin giderim verimini etkilediği tespit edilmiştir. Tat ve koku bileşiklerinin üreticisi olan siyanobakterilerin hücre içi/hücre dışı kirletici oranı ve türü, arıtma verimini etkileyen faktörlerden biridir. Örneğin bentik siyanobakterinin baskın olduğu mezotrofik ve oligotrofik su kütlelerinde hücre içi tat ve koku bileşikleri, bentik siyanobakteriler zemine tutunduklarından dolayı yüzey veya yüksek su seviyesinden su alan arıtma tesislerinde sorun oluşturmamaktadır. Konvansiyonel fizikokimyasal (koagülasyon-flokülasyon, çökeltme ve filtrasyon) ve dezenfeksiyon ünitelerini içeren arıtma proseslerinin, hücre dışı Geosmin ve 2-MIB gideriminin %20 gibi çok düşük bir değerde olması fakat hücre içi bozulmamış bileşiklerin gideriminde oldukça etkili olması (Tablo 4) bir diğer önemli husustur [3].

Pompalardan kaynaklanan hidrolik stres ve ön-okstitleme de dahil olmak üzere hücre yıkımı sonucu hücre içi tat ve koku bileşiklerinin salımı, bazı tesislerde ana riski oluşturan beklenmedik arıtma gereksinimi durumuna sebep olabilmektedir [47],[48].



Şekil 3: Tat ve koku bileşiklerinin gideriminde kullanılan arıtma proseslerine ait örnek akım şeması. (a): Toz aktif karbon, (b): Perokson, (c): Biyofiltrasyon [6].

Tablo 4: Çeşitli arıtma proseslerinin Geosmin ve 2-MIB giderim verimleri [3].

Giderim Prosesi	Geosmin Giderimi (%)		2-MIB Giderimi (%)	
	Toplam	Hücre dışı	Toplam	Hücre dışı
TAK	21±4	57±3	Negatif veya 0	38±5
Çökeltim	33±7	18±2	Negatif veya 0	0
Filtrasyon	45±5	57±5	38±3	0
GAK	-	100	-	70±5
Klorlama	-	0	-	13±3

*: Negatif yüzde giderimleri çok yüksek hücre içi 2-MIB değerinin çamur süpernatant geri devri esnasında eklenmesi nedeniyle gerçekleşmiş olabilir.

Alg kaynaklı organik maddenin (algal organik madde, AOM) hücre içi ve hücre dışı organik madde fraksiyonlarının dezenfeksiyon yan ürünü (DYÜ) oluşum potansiyelinin incelendiği bir çalışmada, hücre içi (HİOM) ve hücre dışı (HDOM) organik maddenin klorlanması sonucu organik kloraminlerin oluştuğu belirtilmiş, ancak bu bileşiklerin bir günün ardından ölçülemediği belirtilmiştir.

Doğal organik maddeye (DOM) kıyasla HİOM ve HDOM'nin klorlanmasıyla daha fazla azotlu DYÜ ve haloaldehit oluşurken, daha az karbonlu DYÜ oluşumu gözlenmiştir. Klorlama ve kloraminleme sonucunda HDOM'nin HİOM ve alg hücrelerine kıyasla daha az DBP ürettiği belirlenmiştir [49].

Glane Nehri (Fransa)'nde yapılan başka bir çalışmada, algal organik maddenin DOM'a kıyasla daha hidrofilik olduğu ve daha düşük SUVA (spesifik ultraviyole absorpsiyonu) değerine sahip olduğu belirlenmiştir [50]. Bu bilgiler ışığında klorlama veya kloraminlemenin DYÜ oluşumu açısından sakıncalı olabileceği, bunun yerine tesislerde ozon oksidasyonunun tercih edilmesinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin giderimini sağlayan başlıca prosesler bu bölümde özetlenmiştir.

3.2.1 İleri oksidasyon prosesleri

3.2.1.1 Ozon oksidasyonu

Ozon oksidasyonu, 2-MIB ve Geosmin gibi siyanobakteriyel metabolitlerin gideriminde kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Bu bileşiklerin gideriminde ozon oksidasyon reaksiyon mekanizmasının çok güçlü bir oksidan olan hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) üzerinden ilerlediği belirtilmiştir [51],[52]. Bu proses sonucunda elde edilen koku ve su kalite parametreleri giderim verimleri Tablo 5'te özetlenmiştir.

2-MIB ve Geosminin su ortamında ikinci derece reaksiyon kinetiğiyle parçalandığı birçok çalışmada belirtilmiştir [52]-[54]. Geosmin bileşiğinin yapısı dolayısıyla daha hızlı bir reaksiyon kinetiğine sahip olduğu ve 2-MIB'den daha hızlı okside olduğu belirlenmiştir [54]. Buna sebep olarak, Geosminin suda düşük çözünürlüğe sahip olması ve daha hidrofobik yapıda olması gösterilmiştir. Geosmin daha uçucu bir bileşiktir, sıvı fazdan gaz fazına geçişi daha kolaydır ve ozonla reaksiyona girmektedir. Aynı çalışmada bu iki bileşiğin oksidasyonunun pH, sıcaklık ve ozon dozunun yanı sıra, hidrojen peroksit ilavesiyle arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca 2-MIB ve Geosmin giderim veriminin, başlangıç tat ve koku bileşiği konsantrasyonundan bağımsız olduğu belirlenmiştir [54].

Tablo 5: Çeşitli çalışmalarda elde edilen ozon giderim verimleri.

Ozon (mg/L)	C ₀ (t&k bileşiği) (ng/L)	Giderim (%)	Temas süresi (dk.)	pH	Sıcaklık (°C)	Bulanıklık (NTU)	Alk. (mg/L CaCO ₃)	TOK veya ÇOK	Kaynak
2,5	Geosmin 100 2-MIB -	Geosmin 97 2-MIB -	20	8.11-8.39	21.1-24.9	2.2 – 7.6	-	2,49 – 2.67 (ÇOK)	[52]
3	Geosmin 100 2-MIB 100	Geosmin 90 2-MIB 77	10	7	20	-	Çök.110 Ham su 120	Çökelmiş 1,93 Ham su 2,91 (TOK)	[53]
3,75	Geosmin 50 2-MIB 50	Geosmin 95 2-MIB 93	20	7,6	24±1	-	59	3,0 (TOK)	[54]
4,19	Geosmin 100 2-MIB 100	Geosmin >90 2-MIB >90	20	7,3	25±1	-	-	-	[55]

Bir başka çalışmada, deiyonize suda başlangıç Geosmin konsantrasyonu 400 ng/L ve ozon konsantrasyonu 0.35 mg/L iken 20 dakikalık temas süresi sonunda pH 5, 7 ve 9'daki giderim verimlerinin sırasıyla %61.1, %95 ve %99.9 olduğu bulunmuştur [53]. Bu sonuca göre yüksek pH değerinin yüksek Geosmin giderim verimi sağladığı söylenebilir, bunun nedeni artan pH ile daha fazla hidroksil radikali oluşmasıdır.

Qi ve Xu [56], 2-MIB molekülünün ozonlanmasına yoğunlaşmış ve hidroksil radikalının temel oksidasyon mekanizmasını oluşturduğunu tespit etmiştir. Aynı zamanda 2-MIB'nin parçalanması sonucu oluşan yan ürünlerin tespiti üzerinde durulmuştur. İlginç bir şekilde, bu yan ürünlerden bazı aldehit türlerinin tat sorununa neden olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada bu bileşiklerin giderilmesi için ayrıca arıtma uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

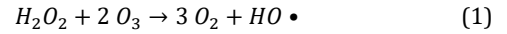
Suda bulunan doğal organik maddenin varlığı, ileri oksidasyon prosesini etkilemektedir. Ho ve Newcombe [57], doğal organik madde (NOM) karakteristiğinin ozon giderim verimine etkisini araştırmıştır. Yüksek moleküler ağırlıklı fraksiyon içeren DOM'a sahip suların daha yüksek spesifik ultraviyole absorbanı (SUVA) değerine sahip olduğu ve daha yüksek O₃ gerektirdiği, böylece verilen temas sürelerinde ozonlama sırasında daha çok hidroksil radikale dönüştüğü belirlenmiştir. Bu durum, en yüksek moleküler ağırlıklı NOM fraksiyonuna sahip suda en düşük temas süresinde en yüksek 2-MIB/Geosmin gideriminin (%98) gözlenmesiyle sonuçlanmıştır. Ancak bu sonuçla çelişen deneysel veriler de rapor edilmektedir [57].

Bir diğer çalışmada, ozon oksidasyonu ile SUVA (spesifik UV absorbanı) arasındaki ilişki araştırılmıştır [58]. Çalışmada yüksek çözünmüş organik karbon (ÇOK), hidrofobik organik bileşik fraksiyonu (hüyük bileşikler) ve SUVA değerlerinin yüksek ozon kullanımına neden olduğu belirtilmiş olup, Geosmin ve 2-MIB gibi bileşiklerin parçalanma hızlarının yüksek aromatiklik/fenoliklik ve yüksek SUVA değerleriyle arttığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, ham suda ozonlama esnasında O₃ ve •OH'in alg hücrelerini parçalamada önemli rol oynadığı ve hücre dışı organik maddenin suya salınmasına neden olduğu belirtilmiştir [58].

3.2.1.2 Hidrojen peroksit-ozon (perokson) oksidasyonu

Perokson prosesinin temel prensibi, ozon (O₃) ve hidrojen peroksit (H₂O₂) bileşiklerinin birlikte kullanılması sonucunda oksitleyici radikallerin oluşumudur. Zaviska [59] tarafından açıklandığı üzere, hidrojen peroksit, oldukça reaktif olan HO•

radikalini üreten ozon molekülünün parçalamaya etkisini arttırmaktadır [60],[61]. Bu nedenle perokson prosesi, yalnızca ozonun kullanımına kıyasla daha etkili olmaktadır. Ozon varlığında hidrojen peroksit, ozonun parçalanmasını başlatmakta ve ilerletmektedir. Bunun sonucunda, bir dizi kompleks reaksiyon sonucunda hidroksil radikali oluşmaktadır [62],[63]:



Ferguson [42]'un Colorado Nehri'nden alınan örneklerle yaptığı pilot ölçekli çalışmada, ozon ve perokson proseslerinin farklı temas sürelerinde karşılaştırılmasının yanı sıra, perokson prosesinde kullanılacak ozon ve hidrojen peroksit oranının optimizasyonu üzerinde de durulmuştur. Çalışmanın sonuçlarına göre perokson prosesi sadece ozonun kullanıldığı sisteme kıyasla 2-MIB ve Geosmini oksitlemek için önemli ölçüde (~%50) daha az ozon dozajı gerektirmektedir. Ozon veya perokson kullanıldığında (ikincil dezenfeksiyon kloraminle yapıldığında) DBP (dezenfeksiyon yan ürünleri) oluşumu seviyesinin düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca perokson (H₂O₂:O₃ oranı ≤ 0.3) mikroorganizmaların inaktivasyonunda ozonla kıyaslanabilir düzeydedir. Yapılan pilot çalışmaya göre 2-MIB gideriminde %90'a ulaşılması için 4 mg/L ozon gerekirken, aynı giderim verimini elde etmek için 2 mg/L peroksonun (H₂O₂:O₃ oranı 0.2) yeterli olduğu görülmüştür. Çalışılan temas süresi aralığında (6-12 dk) tat ve koku bileşikler oksidasyonunun reaktör temas süresinden etkilenmediği görülmüştür [42].

Mizuno ve Ohara [64]'nın perokson prosesi ile alg kaynaklı bileşiklerin giderimi ve bromat oluşumunun kontrolünü araştırdığı bilimsel çalışmada, sürekli akışlı temas tankında, ön artılmış ham suya geniş aralıkta (39-515 µg/L) bromür iyonu ve 2-MIB-Geosmin bileşikler (58-609 ng/L) ilave edilerek 0-3.7 mg/L H₂O₂ doz aralığında (O₃: 2mg/L) çeşitli deneyler yürütülmüştür. 10 dakikalık temas süresinde ozonun tek başına 2-MIB ve Geosmin giderimini 10 ng/L'nin altına, bromat oluşumunu da 10 µg/L'nin altına indiremediği, ancak H₂O₂ ilavesiyle (perokson prosesi) standartlara uygun değerlere inilebildiği görülmüştür.

Irabelli ve Jasim [65]'in Detroit Nehri (Ontario, Kanada) ham suyu ile yürüttüğü pilot ölçekli çalışmada, ozon ve perokson proseslerinin trihalometan oluşumu açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmada 3 farklı H₂O₂:O₃ oranı (0.1, 0.2 ve 0.35) kullanılmış; hidrojen peroksit ilavesinin ozon öncesi ve sonrasında yapılması durumunda elde edilen sonuçlar

karşılaştırılmıştır. Yapılan gözlemlere göre, ozon öncesi veya sonrasında yapılan H_2O_2 ilavesi THM oluşumunu arttırmış, aynı zamanda artan $H_2O_2:O_3$ oranında THM oluşumu artmıştır. Sonuçlara göre, THM oluşumunun kontrolü ozon öncesi peroksit ilavesinde, ozon sonrasında ilaveye göre daha iyi sağlanmıştır. Bunun yanı sıra, ham sudaki ÇOK (çözünmüş organik karbon) gideriminde ozonun tek başına kullanımına kıyasla perokson prosesinin daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Perokson prosesi ile ilgili bir başka çalışmada, bromat ve koku kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır [66]. Mevcut sistemde, Huangpu Nehri ham suyundaki karakteristik septik/bataklık kokusunun tamamen gideriminin ancak ozon (4.0 mg/L) + biyolojik aktif karbon (O_3 -BAK) prosesiyle sağlanabildiği, bu durumun yüksek bromür içeriğinden dolayı karsinojenik bromat oluşumuna sebep olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada, nehir suyundaki bromat ve septik kokunun, O_3 -BAK prosesi öncesi H_2O_2 (hidrojen peroksit) eklenerek giderimi incelenmiştir. $H_2O_2:O_3$ oranının (w/w) 0.5 ve üstündeki değerlerde olduğu durumlarda, bromat konsantrasyonunun etkili bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, septik kokunun da hidrojen peroksit ilavesiyle azaldığı görülmüş fakat her bir ozon dozu için $H_2O_2:O_3$ oranının ayrıca optimizasyonunun gerekliliği belirtilmiştir. Bu çalışmada, 2 mg/L ozon dozu ve $H_2O_2:O_3=0.5$ 'te koku tamamen giderilmiştir [66].

3.2.1.3 Ultraviyole-hidrojen peroksit oksidasyonu

Ultraviyole (UV) ve hidrojen peroksit ile oksidasyon, Geosmin ve 2-MIB giderimi için kullanımı nadir fakat söz konusu koku bileşiklerini gidermede oldukça etkili bir yöntemdir. UV kullanılarak Geosmin giderimi, 254 nm'nin altındaki dalga boylarında en iyi sonucu vermektedir. 250 nm dalga boyunda Geosmin molekülüne bağlanan elektromanyetik alan ile radyasyonla bağlanan elektromanyetik alan arasındaki fotokimyasal reaksiyon, etkili olabilecek güçtedir. Hidrojen peroksitin eklenmesiyle, $HO\cdot$ radikali oluşmakta, bu da Geosmin gideriminin yükselmesini sağlamaktadır. Peter ve von Gunten tarafından yürütülen bir çalışmada, bu prosesin reaksiyon kinetiği incelenmiş ve UV/ H_2O_2 kullanıldığında Geosmin için ikinci dereceden reaksiyon hız sabiti 0.1 (mol/L)/s bulunmuştur [67]. Aynı çalışmada Geosmin ve 2-MIB için Zürih Gölü ve Greifensee (İsviçre)'den alınan numunelerde giderim veriminin %50-70 arasında olduğu belirlenmiştir [11].

3.2.1.4 Ultraviyole-ozon prosesi ile oksidasyon

Bu tür bir birleşik oksidasyon, insani tüketim amaçlı suda küflü koku giderimi için ilk olarak Kato [68] tarafından Japonya'da denenmiştir. Ozon ve UV radyasyonu, Geosmin ve 2-MIB gibi organik bileşikler gidermek için kullanılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, Geosminin ($C_0 = 22$ ng/L) %100 ve 2-MIB'nin ($C_0 = 130$ ng/L) %90 verimle giderimi, 5 mg/L ozon ile veya UV ile birlikte kullanılan 4 mg/L ozon ile sağlanmıştır. Buna ek olarak söz konusu suda koku giderimi için gerekli ozon dozunun O_3 /UV kombinasyonu sayesinde %20-40 arasında azaldığı görülmüştür [68].

İleri oksidasyon prosesleriyle (O_3 /UV ve O_3/H_2O_2) tat ve koku bileşiklerinin giderim verimindeki artış, ozonun suda parçalanmasını tetikleyen öncülerin (H_2O_2 ve UV) mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Bu öncüler su çok düşük radikal süpürücü (HCO_3^- , CO_3^{2-}) seviyesine sahipken oldukça reaktif olan hidroksil radikalini üretmektedir.

İtalya'daki bir içme suyu arıtma tesisine ait ham su numunesiyle yapılan bir çalışmada, suya 2-MIB (0.2-0.4 µg/L) ve Geosmin (0.5 µg/L) ilave edildiğinde her iki bileşiğin de %50 verimle giderildiği, fakat ozonu UV'nin takip ettiği durumda giderimin %90'a yakın bir değere ulaştığı gözlenmiştir [69]. Moleküler ozon bu bileşiklerle reaksiyona sınırlı oranda girmekte fakat uygulanan UV radyasyonu ozon molekülünün hidroksile dekompoze olmasını sağlamaktadır. Böylelikle hidroksil radikalinin bileşiklerle kolaylıkla reaksiyona girebilmesi giderim verimini arttırmaktadır.

Enerji gereksinimi: Ozonlama ve ileri oksidasyon prosesleri ile mikrokirletici gideriminde enerji ihtiyacı, oksidanları tüketen etmen olan su matriksi (temelde çözünmüş organik maddenin çeşidi ve konsantrasyonu) ve giderilmesi hedeflenen bileşenin ozon ve $\cdot OH$ radikali ile reaksiyonun hız sabitine bağlıdır [70]. Genellikle konvansiyonel ozonlamaya kıyasla perokson prosesi ile enerji tüketiminde ~%25 artış tahmin edilmektedir (ozon ve hidrojen peroksit için üretim enerjisi sırasıyla 15 kWh/kg ve 10 kWh/kg) [71].

3.2.2 Aktif karbon adsorpsiyonu

Aktif karbon, sıvı veya gaz fazdaki iyon veya moleküllere konsantre halde birikebilecekleri bir yüzey sağlayan adsorbent bir malzemedir. Aktif karbon içilebilir sularda organik maddeleri gidermede yaygın olarak kullanılır. Aktif karbon adsorpsiyonu; tat ve koku bileşikleri, dezenfeksiyon yan ürünleri, alg toksinleri, sentetik organik bileşikler, endokrin bozucular, ilaç ve kişisel bakım ürünleri gibi birçok bileşiği gidermede etkili bir metottur [72].

Aktif karbon iki farklı formda mevcuttur: toz aktif karbon (TAK) ve granüler aktif karbon (GAK). TAK ve GAK'ın adsorptif özellikleri por büyüklüklerine, porların iç yüzey alanına ve toplam partikül boyutundan bağımsız diğer yüzey özelliklerine bağlıdır [72].

3.2.2.1 Toz aktif karbon

Toz aktif karbon (TAK), içme suyu arıtımında sıklıkla tercih edilen bir fizikokimyasal arıtım yöntemidir [72]. Toz aktif karbon ile Geosmin ve 2-MIB gibi tat ve koku oluşturan bileşiklerin giderilmesinin incelendiği birçok çalışmanın [11], [41],[73],[74] yanı sıra TAK ile kombine sistemlerin denendiği birçok laboratuvar, pilot ölçekli ve tam ölçekli çalışma [75]-[78] bulunmaktadır.

Tat ve koku giderimi ile ilgili bir çalışmada, TAK kullanımında meydana gelen sorunlar ele alınmıştır. Aktif karbon adsorpsiyonunu mikrofiltasyon ünitesinin takip ettiği su arıtma tesislerinde mühendislerin sıklıkla yaşadığı sorunlardan biri; gerçek tesislerde tat ve koku bileşikler giderim veriminin laboratuvar çalışmalarında elde edilen giderim verimlerine kıyasla çok daha düşük olmasıdır. Bunun sebebinin filtre çeperi yüzeyinde halihazırda varolan siyanobakterilerin hücrelerinin içindeki Geosminin yüksek basınç altında (dinamik koşullarda) suya salınması olduğu, TAK'ı koagülasyon ve seramik mikrofiltasyonun takip ettiği pilot çalışma ile kanıtlanmıştır [79].

Yürütülen bir çalışmada, hidrolik flokülütör konsepti temel alınarak, perdeli kanallı TAK temas tankı, hızlı karıştırma ünitesi öncesine konulup, içme sularında tat ve kokuyu gidermek amacıyla tasarlanıp değerlendirilmiştir [80]. Temas süresi ve karıştırma hızı ile diğer tasarım parametreleri pilot tesiste ham su örneklerine kinetik test uygulanarak seçilebilmektedir. Çalışmada hız gradyanı aralığı 18-83 s⁻¹

olarak denenmiş ve karıştırmanın TAK adsorpsiyon kinetiğine sınırlı oranda etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Yatay perdeli kanallı TAK temas tankında 2-MIB ve Geosmin giderim verimlerinin (dönüşlerdeki perde ucu açıklığından bağımsız olarak) perde sayısı, TAK dozu ve temas süresi arttıkça arttığı tespit edilmiştir. Pilot ve laboratuvar ölçekli bir takım çalışmalarla belirli bir debide tasarım kriterleri (hidrolik bekleme süresi, güvenlik faktörü gibi) belirlenerek perde sayısı ve perdeler arası boşluk miktarı bulunmuş ve yük kaybı hesaplanmıştır [80].

Cook ve Newcombe [41]'nin 4 farklı Avusturalya su kaynağında yaptığı çalışmaya göre ham sudaki doğal organik madde (DOM) konsantrasyonu aktif karbonun doğrudan 2-MIB ve Geosmin giderim verimini etkilemektedir. Örneğin klorlama neticesinde DOM'un parçalanması ile ortaya çıkan daha küçük moleküller, yapısal olarak 2-MIB molekülüne benzerlik gösteriyor olsa da, adsorpsiyon prosesi sırasında bu moleküller uygun adsorpsiyon yerlerine bağlanma hususunda 2-MIB ile yarışabilmekte ve giderim verimini azaltmaktadırlar.

Aynı başka çalışmada, 2-MIB ve Geosmin gideriminin bu kirleticilerin başlangıç konsantrasyonundan bağımsız ve sadece TAK dozuna bağlı olduğu belirtilmiştir [41]. Fakat ortamda DOM (doğal organik madde) gibi yarışan bir bileşik olduğunda, adsorpsiyon izotermi kirleticinin başlangıç konsantrasyonundan oldukça etkilenmektedir. Kirletici (2-MIB ve Geosmin) başlangıç konsantrasyonu düştüğünde adsorpsiyon izotermi düşük yüzey konsantrasyonlarına geçiş yapmakta ve kirletici için adsorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.

Miyun (Pekin, Çin) rezervuarına ait ham su ile 5 farklı toz aktif karbon ile yapılan 2-MIB ve Geosmin giderimi çalışmasında, meyve kabuğu bazlı karbon, odun ve bitümlü kömür bazlı karbonlardan daha yüksek adsorplama göstermiştir [81]. Bu sonuç, TAK ürününün en yüksek mikropor hacmine sahip olmasına bağlanmıştır. Çalışmada, Spearman sıra korelasyon tekniği ile 2-MIB ve Geosmin adsorpsiyon kapasitesinin mikropor hacmiyle güçlü bir korelasyona sahip olduğu bulunmuştur. Anılan çalışmada aktif karbon kalitesini değerlendirmede sıklıkla kullanılan iyot numarası, metilen mavisi numarası, mezopor ve toplam por hacmi, yüzey alanı, O ve C-O içeriğinin ise adsorpsiyon kapasitesiyle korelasyonunun önemsiz olduğu tespit edilmiştir.

İSKİ'nin su arıtma tesislerinde arıtılmış sudaki Geosmin ve 2-MIB seviyelerinin 15~20 (ön ozonlamanın olduğu tesislerde 40-50) ng/L'yi aştığı andan itibaren hızlı karıştırıcı girişine 5~10 mg/L toz aktif karbon (TAK) beslenerek tesise ilave tat/koku giderim kapasitesi kazandırılmaktadır. TAK çökeltim havuzundaki çamurla birlikte tesisten atılmaktadır. TAK uygulaması genelde Ağustos ayı sonundan itibaren (en geç Eylül ortası) durdurularak normal işletme moduna geri dönülmektedir [6].

3.2.2.2 Granüler aktif karbon

Su arıtma tesislerinde, esas olarak organik kirleticilerin gideriminde granüler aktif karbon (GAK) ile adsorpsiyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir tesiste halihazırda varolan bu teknolojiyi tat ve koku bileşiklerinin gideriminde de kullanmak mantıklı bir stratejidir. Su arıtma tesisleri GAK'ı, filtre yatakları halinde sürekli olarak işletmektedir [46].

Granüler aktif karbon filtre adsorplayıcı sistemlerin, kaynak suyundan kokuyu etkili biçimde giderdiği bilinmektedir. Yatak ömrü 1 ila 5 yıl arasında değişebilse de, bazı durumlarda çok daha düşük olabilir [82]. Yatak ömrünün; tat ve koku

bileşiklerinin türü, konsantrasyonu ve gerçekleşme sıklığına bağlı olmasının yanı sıra, adsorpsiyon bölgeleri için yarışan organiklerin varlığına ve arıtılmış suda kabul edilebilir hedef çıkış konsantrasyonuna da bağlı olduğu belirtilmektedir. Tat ve kokuya sebep olan bileşikler de tam olarak bilinmediğinden, geçmişteki tat ve koku ile ilgili vaka bilgilerinin genel tasarım ve işletim pratikleri olarak tanımlanıp uygulanması doğru olmaz. Ayrıca tat ve kokunun kabul edilebilir seviyesi, toplumdaki topluma değişmektedir.

Gillogly [82], pilot tesis verileri yardımıyla kalan 2-MIB adsorpsiyon kapasitesinin, EBCT ve GAK hizmet verme süresinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Anılan çalışmada ayrıca, 2-MIB giderim veriminin giriş 2-MIB konsantrasyonundan bağımsız olduğu gözlemlenmiştir.

Adsorpsiyonun yanı sıra, GAK üzerindeki biyobozunmanın da 2-MIB ve Geosmin gideriminde katkısı olduğu birçok çalışmada belirlenmiştir [83]-[87]. Meyer ve çalışma arkadaşlarının [88] yürüttüğü bu çalışma ile, mikroorganizmaların 2-MIB'e çevresel konsantrasyonlarda (<500 ng/L) uyum sağlayabilmesi için birkaç ayın geçmesi gerektiği gösterilmiştir. 2-MIB ve Geosmin giderim mekanizması hipotezlerinden birine göre, bu moleküllerin GAK adsorplayıcısından geçmesini önlemek için adsorpsiyon kapasitesine ihtiyaç vardır. GAK üzerinde başlangıçtaki birikimin ardından, yüzeyde bu bileşikler parçalayabilen bir biyofilm oluşmakta, ardından bu bileşikler desorbe olarak biyofilme difüze olmakta ve burada biyolojik olarak oksitlenmektedir. GAK'ın kokuyu giderebilmesinin zamanla azalmasının sebebi ise adsorpsiyon bölgelerinin zamanla DOM tarafından doldurulması dolayısıyla 2-MIB ve Geosmin'in giderilememesidir. Adsorpsiyon kapasitesi bu yarışan bileşikler tarafından tüketildiğinde GAK değiştirilmelidir.

3.2.3 Biyolojik arıtma sistemleri

2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin kimyasal yapısı, biyolojik olarak bozunabileceklerini göstermektedir. Geosmin alisiklik bir alkol olup, bir seri dehidrojenaz ve monooksijenaz reaksiyonu ile okside olarak mineralizasyona ve merkezi metabolik ara ürünlere doğru gidebilir. 2-MIB bileşiği ise bisiklik bir bileşiktir. Bu bileşik, halka açılması ve mineralizasyonla sonuçlanan monooksijenasyon adımlarını takip ettiği tahmin edilmektedir. Çeşitli saha ve laboratuvar çalışmaları, biyofiltrasyon prosesleri ile 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin biyolojik olarak parçalanabildiğini göstermektedir [89],[90].

Biyofiltrasyon çalışmaları, yavaş kum biyofiltresi, hızlı kum biyofiltresi, granüler aktif karbon biyofiltresi ve biyofilm reaktörü gibi farklı şekillerde yürütülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Tablo 6'da özetlenmiştir [89].

Yagi ve Nakashima [91], Japonya'daki çok sayıda tam ölçekli su arıtma tesisinde 2-MIB ve Geosmin giderimini araştırmış; 2-MIB ve Geosmin giderimi için yavaş kum (biyolojik) filtrasyonunun oldukça etkili olduğunu; 25-69 ng/L başlangıç 2-MIB konsantrasyonlarının giderim veriminin % 88-100 aralığında, 360 ng/L başlangıç Geosmin konsantrasyonunun giderim veriminin ise ~%98 olduğunu tespit etmiştir.

Kesikli reaktörlerde ve yavaş kum filtresi kolonunda yapılan bir çalışmada, 2-MIB ve Geosmin'in (her iki sistemde de) biyobozunur olduğu görülmüştür [43]. Kesikli deneylerde 7 günün sonunda 2-MIB ve Geosminin giderim verimleri sırasıyla

Tablo 6: Biyofiltrasyon çalışmalarına ait özet tablo [89].

Reaktör/Ortam	Yükleme hızı (m/sa.)	Temas süresi (dk.)	Ham sudaki TOK (mg/L)	2-MIB başl. kons. ng/L	Biyolojik giderim (%)	Kaynak
Yavaş kum filtresi	-	-	-	69 25	100 88	[91]
Yavaş kum filtresi	0,025	480	8-9	50	>95	[92]
Cam yataklı CMBR*	0,25	19,8	1,1	10 ⁵ 10 ⁶	43,6 16,7	[84]
Lab. Ölçekli GAK biyofiltresi	0,0083	2,4	-	(1,6-1,7) 10 ⁶	56-58	[91]
Petekli tüp biyofiltre	0,0026-0,0101	120	2,6	114 98	46 33	[93]
Hızlı kum biyofiltresi	10	8,3	-	20-120	8-54	[94]
Porlu granüler seramikle pilot biyofiltre	7,1	12,7	-	50-750	60-80	[95]
Ön ozonlamalı hızlı GAK biyofiltre	7,7 5,5 7,1	14,4/9,6 20,2/13,4 15,6/10,4	2,0	17 9 14	46 29-64 26	[89]

*: Tam karışimli biyofilm reaktör.

%50 ve %78 olarak kaydedilmiştir. Simüle edilmiş yavaş kum filtresi (YKF) kolonunda kum yüzeyindeki mikroorganizmalar tarafından 2-MIB ve Geosmin bileşiklerinin parçalanarak giderimi %50 verimle gerçekleştirilmiştir. 5 m/gün (3-8 m/gün) filtrasyon hızına sahip YKF, 2-MIB bileşimini %48-69 arasında, Geosmini ise %87-96 arasında gidermiştir. YKF kolon testlerindeki 2-MIB ve Geosminin hızlı biyolojik ayrışmaya uğramasının sebebi, mikroorganizmaların 2-MIB ve Geosmine alıştırdığı Kinmen su arıtma tesisindeki (Taiwan) YKF ünitesindeki filtre kumlarının varlığı ile ilişkilendirilmiştir.

Ozonlamayı biyofiltrasyon ünitesinin takip ettiği sistem, oldukça etkili bir arıtma kombinasyonu sağlamaktadır. Ozonlama, 2-MIB ve Geosminin kısmi giderimini sağlasa da, aynı zamanda istenmeyen biyolojik kararsızlığa sebep olmaktadır. Ozonu takip eden biyofiltrasyon, kalan 2-MIB ve Geosmini gidermenin yanı sıra biyolojik kararsızlığı da ortadan kaldırmaktadır. Tam ölçekli arıtma tesisinde yürütülen bir araştırmaya göre birbirini takip eden ozonlama/biyofiltrasyon sistemi, 2-MIB konsantrasyonunu eşik konsantrasyonun altına (≤ 10 ng/L) etkin biçimde indirebilmekte ve biyofiltrasyon bu indirmede önemli rol oynamaktadır [89].

3.2.4 Nanopartiküllerle oksidasyon

Titanyum dioksit, şebeke suyundan Geosmin gideriminde umut vadetse de, henüz diğer giderim yöntemleri kadar yaygın değildir. Lawton ve Robertson [96]'un yaptığı çalışma neticesinde TiO₂ fotokatalizörü 60 dakikada Geosminin %99 giderilmesini sağlamıştır. Fotokatalitik proseslerden beklenildiği üzere giderim verimleri artan katalizör konsantrasyonuyla artmıştır.

Li [97]'nin yürüttüğü bir başka çalışmada da, Ti/RuO₂-Pt anot ile NaCl kullanımıyla Geosmin konsantrasyonunun 600 ng/L'den 6 ng/L'ye düştüğü görülmüştür.

2-MIB ve Geosmin gideriminde granüler aktif karbon adsorpsiyonu ile metal katkılı titanyum dioksitin kıyaslandığı çalışma sonuçlarına göre platin katkılı titanyum nanopartikül yatağının oldukça başarılı olduğu ve bu bileşikler %96'nın üzerinde giderdiği sonucu elde edilmiştir [98].

3.2.5 Proses maliyetleri

Perokson prosesi: Perokson prosesi, mevcut ön ozonlama sistemine kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Konvansiyonel ozonlamaya kıyasla O₃/H₂O₂ prosesi ile enerji tüketiminde ~%25 artış tahmin edilmektedir (ozon ve hidrojen peroksit için üretim enerjisi sırasıyla 15 kWh/kg ve 10 kWh/kg olarak verilmiştir) [64]. Yapılan bir çalışmada, 100.000 kişilik nüfusa hizmet eden bir su arıtma tesisinde mevcut ozonlama sistemine hidrojen peroksit sisteminin ilavesinin, 0,014 \$/m³'lük birim maliyete 0,00274 \$/ m³'lük ek birim maliyet getirmesi öngörülmektedir. Böylelikle ozon sisteminin perokson sistemine dönüştürülmesiyle ön ozonlama birim maliyetinde ~%20'lik bir artış beklenmektedir [2].

Aktif karbon: Aktif karbon sistemleri, mevcut su arıtma tesisine entegre edilebilmektedir. Toz aktif karbon prosesi düşük başlangıç maliyetine sahipken, granüler aktif karbon sistemi yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirmektedir [72].

Biyofiltrasyon: Biyofiltrasyon sisteminin ilk yatırım maliyeti, sistem mevcut yavaş/hızlı kum filtrasyonu veya granüler aktif karbon sisteminin modifiye edilmesiyle (hibrit sistem) kurulması halinde düşmektedir [99].

Tat ve koku gideriminde yaygın olarak kullanılan prosesler maliyet, giderim performansı ve uygulanabilirlik açısından Tablo 7'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 7: Tat ve koku gideriminde kullanılan proseslerin maliyet, performans ve uygulanabilirlik açısından göreceli karşılaştırılması.

Proses	İlk Yatırım Maliyeti	İşletme & Bakım Maliyeti	Toplam Maliyet	Giderim Performansı	Uygulanabilirlik
Perokson	++	++	++	+++	+++
Toz aktif karbon	++	++	++	++	+++
Granüler aktif karbon	+	+	+	++	++
Biyofiltrasyon	+	++	+	++	++

3.3 Dağıtım şebekelerindeki tat ve koku oluşumunu kontrol etme yöntemleri

Su dağıtım şebekelerindeki borularda mikroorganizmalardan kaynaklanan tat ve koku problemini tamamen gidermek, boru yüzeyinde halihazırda oluşmuş biyofilmleri gideren çeşitli mekanizmalar tam olarak bilinmediğinden dolayı, neredeyse imkansızdır. Fakat yine de bu sorunları kontrol edebilen, geciktirebilen veya önleyebilen bazı yöntemler mevcuttur. Bunlar: (1) şebekelerde alternatif dezenfeksiyon tekniklerinin kullanımı ve yeterli dezenfektan seviyesinin korunması, (2) şebekeye giren organik madde konsantrasyonunun minimize edilmesi, (3) ve dağıtım sistemlerinde en iyi inşaa ve işletim uygulamalarının kullanılması olarak sıralanabilir [17].

3.3.1 Kimyasal dezenfeksiyon ve alternatif teknikler

Klorun bazı olumsuzluklarından dolayı su dezenfeksiyonunda yeni ve alternatif tekniklerin bulunmasına ve geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ozonlama, UV radyasyonu, ileri oksidasyon prosesleri, ters osmoz ve mikrofiltrasyon gibi klor dezenfeksiyonuna alternatif veya onu tamamlayıcı yöntemler bulunmaktadır. Ozonlama, klorlamaya dirençli bazı mikroorganizmaların inaktivasyonunda oldukça etkili olan güçlü bir arıtma tekniğidir [100]. UV radyasyonu ise içme sularında bulunan tüm bakterilere, virüslere ve protozoa kistlerine karşı oldukça etkilidir [101] ve bu yöntemin kimyasal arıtma teknikleriyle kombinasyonunun içme suyundaki biyofilmleri yok etmede tekil kullanıma kıyasla daha etkili olduğu tespit edilmiştir [102]. Son zamanlarda içme suyu arıtımında dezenfektan olarak sodyum dikloroizosiyanat önerilmiş, bu kimyasalın borularda yavaş salındığı ve uzun ömürlü olduğu belirtilmiştir [103].

Son yıllarda ortaya çıkan diğer dezenfeksiyon yöntemleri; UV ve hidrodinamik kaviteasyon, elektron-ışın radyasyonu nanomateryaller (çitosan, karbon nanotüpler, fotokatalitik TiO₂, gümüş nanopartiküller gibi), sonokatalitik dezenfeksiyon, sıfır değerlikli demir olarak sıralanmakta, bu yöntemlerin şebekedeki mikrobiyal aktiviteyi giderip gidermediği incelenmektedir. Bu yöntemlerin yanısıra çevre dostu ve toksik olmayan bir alternatif yöntem olan bakteriyel sinyal sistemleri geliştirilmiştir [104],[105]. Tüm bunlara rağmen şebekelerde biyofilm oluşmasının önlenmesi, üzerinde daha çok çalışma yapılması gereken bir sorundur.

3.3.2 Şebekeye düşük organik madde içerikli suyun iletilmesi

Biyolojik olarak stabil suyun üretilmesi ve temini, birçok bakteri türünün büyümesinin, bu türlerin besin kaynağının sınırlandırılması/kontrolü sayesinde sağlanabilir [106]. Bu yaklaşımın avantajları; DBP'lerin oluşmaması (tat ve koku bileşiklerinin öncüleri de dahil) ve şebekede bakiye dezenfektana dirençli bakterilerin büyümesinin de etkili olarak kontrol edilebilir olmasıdır. Bu yaklaşımda bakteri büyümesini etkili şekilde inhibe edecek kadar düşük nütrient konsantrasyonunun sağlanması için arıtma proseslerinin verimi oldukça önem taşımaktadır. Hollanda, Almanya, Avusturya ve İsviçre gibi bazı Avrupa ülkelerinde büyüme için gerekli nütrientlerin sınırlandırılmasıyla mikrobiyal büyümenin kontrolü için arıtma proseslerinde daha etkili yöntemler (iyon değişimi, aktif karbon, ters osmoz, nanofiltrasyon, ultrafiltrasyon, mikrofiltrasyon gibi) kullanılmaktadır. Fakat bu yaklaşım, şebekelerdeki oligotrofik

çevrede dahi büyüeyebilen bazı bakteriler için etkisiz olabilmektedir.

3.3.3 Dağıtım şebekelerinde uygun inşaa ve işletim yöntemleri

Şebekelerdeki biyolojik stabiliteyi sağlama ve tat ve koku riskinin kontrolü açısından şebeke inşaa ve işletiminin en iyi uygulama yöntemleriyle yapılması gerekmektedir. Boru malzemeleri ihtiyatlı bir şekilde seçilmelidir. İnşada kullanılan malzemeler, içme suyu ile sürekli temas halinde olmaya uygun olan malzemelerden seçilmeli ve şebekelerde biyofilm üretim potansiyeli test edilmiş olan inşaa ürünleri kullanılmalıdır [107]. Buna ek olarak, su dağıtım şebekelerinde bekletme süresi, öncülerin olası istenmeyen tat ve koku bileşiklerini oluşturmak için ihtiyaç duyduğu reaksiyon süreleri göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Suyun şebekede uzun süre kalmasını önlemek için, suyun bekleme süresini arttırabilecek ölü uçlar, uzatmalar veya birleşim noktaları çeşitli inşaa önlemleri ile engellenmelidir. Bu inşaa önlemlerine ek olarak, dışarıdan su girişinin önlenmesi için etkin basınç seviyesinin korunması ve fiziksel ve kimyasal bütünlüğü sağlamak ve sızmayı sınırlandırmak için boruların iyi korunması, dış kaynaklı kontaminasyonun önlenmesi açısından elzemdir. Bazı araştırmacılar şebekedeki çökeltiyi gidermek için düzenli sifonlamayı önermişlerdir. Bu yöntemin mikrobiyal büyümeyi geciktirdiği ve su kalitesini arttırdığı bazı çalışmalarda [108] görülse de konu ile ilgili araştırmalar sürmektedir. Çökeltilerin oluşmasını engellemek için şebeke boyunca minimum hız kriterlerinin altına inilmemelidir.

Dağıtım şebekelerinde, Hidrolik Modelleme destekli olarak (debi, basınç, su hızları ve su yaşı dağılımları ışığında) ölü/kör noktalar belirlenerek su kalitesi düzeltici önlemler (periyodik tahliye, kapalı göz içine alma vb.) alınmalıdır. Şebekede, bakiye klor, THM ve tat/koku izlemesi çalışmaları, Hidrolik Modelleme desteği ile ilgili kurumda birimler arası etkin bir koordinasyon sağlanarak, eş zamanlı yürütülmelidir. Şebeke kaynaklı tat ve koku şikâyetleri kaydedilmeli ve derlenmeli ve sonrasında ileride referans olması açısından erişilebilecek bir veritabanı oluşturulmalıdır. Bu tür bir veritabanı, tekrarlayan kalite değişimlerinin temelleri ve nedenlerini kavramayı sağlayacaktır. Bakiye dezenfektanın oldukça düşük olduğu dağıtım sistemlerinde, klorlu kokuların sebeplerini belirlemek için ek çalışmalar yapılmalıdır. Dağıtım şebekesinde kullanılacak malzeme sertifikasyonu için malzeme onayından önce duysal ölçüm zorunluluğu getirilmelidir. Buna ek olarak borular da dahil tüm yeni aksam kullanılmadan önce kokusuz olduğuna dair testten geçirilmelidir [6].

Önemli önerilerden biri ise "tat ve koku oluşum potansiyeli testi" oluşturulması ve bu testin duysal değerlendirme temeline dayanmasıdır. Bekleme süresi, pH, bakiye dezenfektan ve sıcaklık gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Bu test özgül su matriksi ve değerlendirmeyi yapan tesis tarafından kullanılan özgül arıtma (sahaya özgül su) ile yürütülmeli, su kalite değişimlerini değerlendirmede söz konusu test düzenli olarak yapılmalıdır [2].

4 Sonuç ve öneriler

İçme sularında tat ve koku sorununun çözüme ulaştırılması için suyun temin edildiği kaynak, suyun artıldığı arıtma tesisi ve suyun tüketicilere iletiildiği dağıtım şebekesinin incelenerek sorunun kaynağı/kaynaklarının tespit edilmesi kritik öneme sahiptir. Sorunun muhtemel kaynağı olan noktalarda gerekli

önlemler alınarak tat ve kokunun meydana gelmesi engellenmelidir. Tat ve koku oluşumunun önlenemediği durumlarda ise yaygın tat ve koku giderim yöntemleri belirlenerek, mevcut duruma en uygun proses seçilmeli ve uygulanmalıdır. Bu çalışma kapsamında, mevcut bilgi birikimi ve uygulamalar ışığında tat ve koku kontrolü için çeşitli öneriler aşağıda özetlenmiştir:

Su havzalarında ötrofikasyon riskinin azaltılabilmesi için havzalardaki noktasal ve yayılı kirletici kaynakların etkin kontrolü önem taşımaktadır. Bu kapsamda su havzalarında yer alan mevcut yerleşim yerlerinde birleşik sistem atık su kanalizasyon sistemlerinin ayrık sisteme dönüştürülmesi, köy yerleşimlerine de yapay sulak alanlar gibi doğal arıtma yöntemleriyle desteklenen uygun AAT yapılması, tekil evler için daha etkin ve denetimli vidanjör hizmeti sunulması, havzadaki mevcut tarım ve hayvancılık faaliyetlerinde iyi tarım ve hayvancılık prensiplerinin uygulanması ve organik tarımın teşviki öncelikle takip edilmelidir. İklim değişikliği etkileri, gelecek dönemlerde baraj göllerindeki ötrofikasyon riskini daha da arttıracığı için özellikle noktasal toplam fosfor (TP) yüklerinin azaltımı sağlanmalıdır.

Su arıtma tesislerinde mevcut proses akışına entegre edilebilen sistemler kullanılabilir. Örneğin ozonlama ile ön oksidasyon yapılan tesislerde, tat ve kokunun yoğunlaştığı dönemde sisteme hidrojen peroksit ilavesi yapılarak sistem perokson prosesine dönüştürülebilir. Bunun dışında tat ve koku bileşiklerinin yüksek konsantrasyonda seyir gösterdiği dönemde mevcut koagülasyon-flokülasyon prosesinde toz aktif karbon ilavesi yapılarak sorun giderilebilir.

Su dağıtım şebekesinde, Hidrolik Modelleme vasıtasıyla ölü noktalar belirlenerek su kalitesini iyileştirici tedbirler alınmalıdır. Şebeke kaynaklı tat ve koku şikâyetleri kaydedilmeli ve derlenmeli, ileride referans olması açısından erişilebilecek bir veritabanı oluşturulmalıdır. Bakiye dezenfektanın oldukça düşük olduğu dağıtım sistemlerinde, klorlu kokuların sebeplerini belirlemek için ilave çalışmalar yapılmalıdır. Dağıtım şebekesinde kullanılacak malzeme sertifikasyonu için malzeme onayından önce duyuşal ölçüm zorunluluğu getirilmelidir. Bir diğer öneri ise "tat ve koku oluşum potansiyeli testi" oluşturulması ve bu testin duyuşal değerlendirme temeline dayanmasıdır.

İçme sularında tat ve koku problemleri ortaya çıktığında tüketicileri ve kamuoyunu bilgilendirecek etkin bir iletişim planı oluşturulmalıdır. Tat ve koku problemleri hakkında sıkça sorulan soruların ve cevapların ilgili kuruma ait web sitelerinde yayınlanması ve tüketicilerle içme suyu kalitesi hakkında anketler düzenlenmesi faydalı olacaktır. Bunun haricinde iletişimden sorumlu bir ekibin oluşturulması, ekiptekilerin görev tanımlarının yapılması, olay anında haberdar edilmesi gereken kurumların ve bu kurumlarla iletişimin hangi yollarla sağlanacağına belirlenmesi, iletişim ekibine ulaşabilecek e-posta adreslerinin ve telefon numaralarının halka ilan edilmesi tavsiye edilmektedir. Yukarıda bahsedilen anketlere benzer anketler düzenlemek de içme suyunu yönelik tüketici algısını anlayabilmek açısından önemlidir.

5 Kaynaklar

[1] Fakioğlu M. Perokson (Peroxone) Prosesi ile İçme Sularından Alg Kaynaklı Tat ve Koku Bileşiklerinin Giderimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2017.

- [2] Öztürk İ, Fakioğlu M. *İçme Sularından Tat ve Koku Giderimi*. İstanbul, Türkiye, İSKİ, 2017.
- [3] Zamyadi A. "Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants". *Water Research*, 83(1), 171-183, 2015.
- [4] Hobson P, Fazekas C, House J, Daly R, Kildea T, Giglio S, Burch M, Lin, TF, Chen YM. "Tastes and Odours in Reservoirs". *Water Quality Research Australia*, Adelaide, Australia, 2010.
- [5] Faust SDA, Osman M. *Chemistry of Water Treatment*. New York, USA, Lewis Publishers, 1998.
- [6] Toröz İ, Alp K, Karpuzcu E, Fakioğlu M. "İSKİ Su Arıtma Tesislerinde (SAT) Organoleptik Parametrelerde İyileştirme ve Suyun İçilebilirliğinin Arttırılmasının Araştırılması". *Arıt Çevre Teknolojileri*, İstanbul, Türkiye, 2016.
- [7] American Water Works Association. "Distribution Generated Taste and Odor Phenomena". Colorado, USA, AWWA Research Foundation, 2002.
- [8] Taylor WD, Losee RF, Torobin M, Izaguirre G, Sass D, Khiari D, Atasi K. "Early Warning and Management of Surface Water Taste-and-Odor Events". *AWWA Research Foundation*, Denver, USA, 2006.
- [9] Hoehn RC. "Odor Production by Algae". Conference Workshop Presentation: Understanding and Controlling the Taste and Odor of Drinking Water. *AWWA Annual Conference*, New Orleans, USA, 2002.
- [10] Jüttner F, Watson SB. "Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters". *Applied and Environmental Microbiology*, 73(14), 4395-4406, 2007.
- [11] Koester K. Measuring And Modeling Geosmin Removal From Horsetooth Reservoir Water by Powdered Activated Carbon for Selected Contact Times. MSc Thesis, Colorado State University, Colorado, USA, 2011.
- [12] Palmer CM. *Alg and Water Pollution*. 1st ed. London, England, Castle House, 1980.
- [13] United States Environmental Protection Agency. "Secondary Drinking Water Standards: Guidance for Nuisance Chemicals". <https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals> (02.03.2018).
- [14] World Health Organization. "Chlorine in Drinking Water". Geneva, France, 2003.
- [15] US Environmental Protection Agency. "National Primary Drinking Water Regulations". 2002.
- [16] Burlingame GA, Anselme C. "Distribution System Tastes and Odors". *Advances in Taste-and-Odor-Treatment and Control*. AWWA Research Foundation and Lyonnaise des Eaux, Colorado, USA, 1995.
- [17] Zhou X. "An ignored and potential source of taste and odor (T&O) issues-biofilms in drinking water distribution system (DWDS)". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(9), 3537-3550. 2017.
- [18] World Health Organization. "Heterotrophic Plate Counts and Drinking-water Safety". IWA Publishing, London, UK, 2003.
- [19] Ozbek PO. "Global taste and odor survey of water utilities: final report to the American Water Works Association from the Taste and Odor Committee". American Water Works Association, Denver, USA, 2012.

- [20] Skjevrak I. "Biofilm in water pipelines; a potential source for off-flavours in the drinking water". *Water Science and Technology*, 49(9), 211-217, 2004.
- [21] Skjevrak I. "Volatile organic compounds in natural biofilm in polyethylene pipes supplied with lake water and treated water from the distribution network". *Water Research*, 39(17), 4133-4141, 2005.
- [22] Abbaszadegan M, Yi M, Alum A. "Stimulation of 2-methylisoborneol (MIB) production by actinomycetes after cyclic chlorination in drinking water distribution systems". *Journal of Environmental Science and Health*, 50(4), 365-371, 2015.
- [23] Hamed AF, Shafik HM, Shaaban AS. "Phytoplankton and benthic communities of a small water body (Sacred Lake, Karnak Temple) Luxor, Egypt". *Acta Botanica Hungarica*, 45(1-2), 101-112, 2003.
- [24] Watson SB, Ridal J, Boyer GL. "Taste and odour and cyanobacterial toxins: impairment, prediction and management in the Great Lakes". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(8), 1779-1796, 2008.
- [25] Seligman K, Enos, AK, Lai HH. "A comparison of 1988-1990 flavor profile analysis results with water conditions in Two Northern California reservoirs". *Water Science and Technology*, 25(2), 19-25, 1992.
- [26] Catherine Q. "A review of current knowledge on toxic benthic freshwater cyanobacteria-Ecology, toxin production and risk management". *Water Research*, 47(15), 5464-5479, 2013.
- [27] Franzmann PD. "The formation of malodorous dimethyl oligosulphides in treated groundwater: the role of biofilms and potential precursors". *Water Research*, 35(7), 1730-8, 2001.
- [28] Zhang N, Xu B, Qi F, Kumirska J. "The occurrence of haloanisoles as an emerging odorant in municipal tap water of typical cities in China". *Water Research*, 98(1), 242-249, 2016.
- [29] Zacheus OM. "Soft deposits, the key site for microbial growth in drinking water distribution networks". *Water Research*, 35(7), 1757-1765, 2001.
- [30] Weyland H. Actinomycetales in North Sea and Atlantic Ocean sediments. London, England, Nature, 1969.
- [31] Zaitlin B, Watson, SB. "Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths". *Water Research*, 40(9), 1741-1753, 2006.
- [32] Applied Biochemists. "How to Identify and Control Water Weeds and Algae". Advantis Technologies, Inc, Germantown, USA, 1998.
- [33] Sabater S. "Ecological implications of mass growth of benthic cyanobacteria in rivers". *Aquatic Microbial Ecology*, 32(2), 175-184, 2003.
- [34] Watson SB, "Aquatic Taste and Odor: A Primary Signal of Drinking-Water Integrity". *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 67(20-22), 1779-1795, 2004.
- [35] Downing JA, Watson SB, McCauley E. "Predicting Cyanobacteria dominance in lakes". *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 58(10), 1905-1908, 2001.
- [36] Newcombe G. "International Guidance Manual for the Management of Toxic Cyanobacteria". London, England, 2012.
- [37] Chorus I. "Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. E & FN Spon, on behalf of UNESCO, WHO and UNEP". London, England, 1999.
- [38] Canada Health. "Cyanobacterial toxins-Microcystin-LR. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality". Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water, Ottawa, Kanada, Supporting Documentation, 2002.
- [39] Newcombe G, House J, Ho L, Baker P, Burch M. "Management strategies for cyanobacteria (blue-green algae): A guide for water utilities". Water Quality Research Australia, Adelaide, Australia, Research Report 74, 2010.
- [40] Dzialowski AR. "Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs". *Water Research*, 43(11), 2829-2840, 2009.
- [41] Cook D, Newcombe G, Sztajn bok 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Wang D. "UV/chlorine control of drinking water taste and odour at pilot and full-scale". *Chemosphere*, 136, 239-44, 2015.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Schmidt W. "Production of drinking water from raw water containing cyanobacteria-pilot plant studies for assessing the risk of microcystin breakthrough". *Environmental Toxicology*, 17(4), 375-85, 2002.
- [48] Schmidt W. "Use of cyanopigment determination as an indicator of cyanotoxins in drinking water". *Water Science and Technology*, 59(8), 1531-1540, 2009.
- [49] Fang J, Yang X, Ma J, Shang C, Zhao Q. "Characterization of algal organic matter and formation of DBPs from chlor(am)ination". *Water Research*, 44(20), 5897-5906, 2010.
- [50] Leloup M, Nicolau R, Pallier V, Feuillade-Cathalifaud G. "Eutrophication impacts on characteristics of natural organic matter: a laboratory approach based on *Euglena gracilis* and *Microcystis aeruginosa* cultivation". *Water Resources Management*, 171(7), 187-198, 2013.
- [51] Langlais B, Recklow DA, Brick DR. *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. Chelsea, England, Lewis Publishers Inc, 1991.
- [52] 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.
- [53] Liang C. "Kinetics Analysis on the Ozonation of MIB and Geosmin". *Ozone: Science & Engineering*, 29(3), 185-189, 2007.

- [54] Westerhoff P, Nalinakumari B, Pei P. "Kinetics of MIB and geosmin oxidation during ozonation". *Ozone: Science & Engineering*, 28(5), 277-286, 2006.
- [55] Yuan B. "Removal efficiency and possible pathway of odor compounds (2-methylisoborneol and geosmin) by ozonation". *Separation and Purification Technology*, 117, 53-58, 2013.
- [56] Qi F. "Efficiency and products investigations on the ozonation of 2-methylisoborneol in drinking water". *Water Environment Research*, 81(12), 2411-9, 2009.
- [57] Ho L, Newcombe G, Croue JP. "Influence of the character of NOM on the ozonation of MIB and geosmin". *Water Research*, 36(3), 511-8, 2002.
- [58] Huang WJ. "Ozonation of algae and odor causing substances in eutrophic waters". *Journal of Environmental Science Health*, 41(8), 1587-1605, 2006.
- [59] Zaviska F, Drogui P, Mercier G, Blais JF, "Proc'ed'es d'oxydation avanc'ee dans le traitement des eaux et des effluents industriels: Application `a la d'egradation des polluants r'efractaires". *Revue des sciences de l'eau*, 22(4), 535-564, 2009.
- [60] Oturan MA, Aaron JJ. "advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. a review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641, 2014.
- [61] Knol AH. "Conversion of organic micropollutants with limited bromate formation during the Peroxone process in drinking water treatment". *Drinking Water Engineering and Science*, 8(2), 25-34, 2015.
- [62] Knol AH. "Peroxone process in drinking water treatment". *Drinking Water Engineering and Science*, 8, 25-34, 2012.
- [63] Rakness KL. "Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation and Optimization". American Water Works Association, Colorado, USA, 2005.
- [64] Mizuno T. "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.
- [65] Irabelli A, Jasim S, Biswas N. "Pilot-Scale evaluation of ozone vs. peroxone for trihalomethane formation". *Ozone: Science & Engineering*, 30(5), 356-366, 2008.
- [66] Wang Y. "Addition of hydrogen peroxide for the simultaneous control of bromate and odor during advanced drinking water treatment using ozone". *Journal of Environmental Sciences*, 26(3), 550-554, 2014.
- [67] Peter A, Von Gunten U. "Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water". *Environmental Science and Technology*, 41(2), 626-631, 2007.
- [68] Kato M. "The further development in ozone application technology in potable water: ultraviolet or ultra-sonic assisted ozonation". *Water Supply*, 6(349), 1983.
- [69] Collivignarelli C, Sorlini S. "AOPs with ozone and UV radiation in drinking water: contaminants removal and effects on disinfection byproducts formation". *Water Science and Technology*, 49(4), 51-56, 2004.
- [70] von Sonntag C, von Gunten U. *Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment*. London, England, IWA Publishing, 2012.
- [71] Katsoyiannis IA, Canonica S, von Gunten U. "Efficiency and energy requirements for the transformation of organic micropollutants by ozone, O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂". *Water Research*, 45(13), 3811-3822, 2011.
- [72] American Water Works Association. *Water Treatment Plant Design*. New York, USA, McGraw-Hill, 2012.
- [73] Matsui Y. "Geosmin and 2-methylisoborneol adsorption on super-powdered activated carbon in the presence of natural organic matter". *Water Science and Technology*, 62(11), 2664-2668, 2010.
- [74] Sam V. The Occurrence And Removal of Cyanobacterial Metabolites Microcystin-Lr And Geosmin From Source Waters with Powdered Activated Carbon. MSc Thesis, Colorado State University, Colorado, USA, 2012.
- [75] Kim C. "Removal of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) by membrane system combined with powdered activated carbon (PAC) for drinking water treatment". *Journal of Water Process Engineering*, 4(1), 91-98, 2014.
- [76] Kim TK. "Removal of geosmin with inter-chlorination using powdered activated carbon in full-scale WTP". *Desalination and Water Treatment*, 53(10), 2850-2855, 2014.
- [77] Matsui Y. "Adsorptive removal of geosmin by ceramic membrane filtration with super-powdered activated carbon". *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 56(6-7), 411-418, 2007.
- [78] Park SM. "Application of air stripping to powdered activated carbon adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol". *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 59(8), 492-500, 2010.
- [79] Matsushita T. "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.
- [80] Kim YI, Bae BU. "Design and evaluation of hydraulic baffled-channel PAC contactor for taste and odor removal from drinking water supplies". *Water Research*, 41(10), 2256-2264, 2007.
- [81] Yu J. "Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin from natural water". *Separation and Purification Technology*, 56(3), 363-370, 2007.
- [82] Gillogly TET, Snoeyink VL, Vogel JC, Wilson CM, Royal RP. "Determining GAC bedlife". *Journal (American Water Works Association)*, 91(8), 98-110, 1999.
- [83] Silvey JKG, Roach AW. "Studies on microbiotic cycles in surface waters". *Journal (American Water Works Association)*, 56(1), 60-72, 1964.
- [84] Namkung E, Rittmann BE. "Removal of taste- and odor-causing compounds by biofilms grown on humic substances". *Journal of American Water Works Association*, 79(7), 107-112, 1987.
- [85] Meyer KJS, Westerhoff P, Metz D H. "Biofiltration for geosmin and MIB removal". *AWWA Annual Conference*, San Francisco, USA, 12-16 June 2005.
- [86] Chae S, Kim S M, Ahn H, Summers RS. "Biofiltration of MIB and geosmin under varying influent conditions". *American Water Works Association Water Quality Technology Conference*, Denver, USA, 5-9 November 2006.

- [87] Summers RS, Chae S, Kim SM, Ahn HW. *Biodegradation of MIB and Geosmin in Biological Sand and BAC filters: Acclimation, Steady-State and Varying Influent Conditions*. Editors: Gimbel NGR, Collins MR. Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes, 352-360, London, England, IWA Publishing, 2006.
- [88] American Water Works Association. *Water Quality and Treatment*. New York, USA, McGraw-Hill, 2011.
- [89] Nerenberg R, Rittmann BE, Soucie WJ. "Ozone/biofiltration for removing MIB and geosmin". *Journal (American Water Works Association)*, 92(12), 85-95, 2000.
- [90] Xue Q. "Geosmin degradation by seasonal biofilm from a biological treatment facility". *Environmental Science and Pollution Research*, 19(3), 700-707, 2012.
- [91] Yagi M, Nakashima S, Muramoto S. "Biological degradation of musty odor compounds, 2-methylisoborneol and geosmin, in a bio-activated carbon filter". *Water Science and Technology*, 20(8-9), 255-260, 1988.
- [92] Lundgren BV, Grimvall A, Savenhed R. "Formation and removal of off-flavour compounds during ozonation and filtration through biological active sand filters". *Water Science and Technology*, 20(8-9), 245-253, 1988.
- [93] Hattori K. "Water treatment systems and technology for the removal of odor compounds". *Water Science and Technology*, 20(8-9), 237-244, 1988.
- [94] Ashitani K, Hishida Y, Fujiwara F. "Behavior of musty odorous compounds during the process of water treatment". *Water Science and Technology*, 20(8-9), 261-267, 1988.
- [95] Terauchi N, Ohtani T, Yamanaka K, Tsuji T. "Studies on a biological filter for musty odor removal in drinking water treatment processes". *4th International Symposium on off-flavours in the Aquatic Environment*, Adelaide, Australia, 2-7 October 1994.
- [96] Lawton LA. "The destruction of 2-methylisoborneol and geosmin using titanium dioxide photocatalysis". *Applied Catalysis B: Environmental*, 44(1), 9-13, 2003.
- [97] Li M. "Removal of geosmin (trans-1,10-dimethyl-trans-9-decalol) from aqueous solution using an indirect electrochemical method". *Electrochimica Acta*, 55(23), 6979-6982, 2010.
- [98] Asghar A. "Comparison of adsorption capability of activated carbon and metal doped TiO₂ for geosmin and 2-MIB removal from water". *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-11, 2015.
- [99] Schneider O. "Biofiltration Benefits". <https://www.wwdmag.com/water-treatment/biofiltration-benefits> (04.05.2015).
- [100] Camel V, Bermond A. "The use of ozone and associated oxidation processes in drinking water treatment". *Water Research*, 32(11), 3208-3222, 1998.
- [101] Glaze WH, Kang JW, Chapin DH. "The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation". *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335-335, 1987.
- [102] Rand JL. "A field study evaluation for mitigating biofouling with chlorine dioxide or chlorine integrated with UV disinfection". *Water Research*, 41(9), 1939-1948, 2007.
- [103] Morgenthau A. "Assessment of the working range and effect of sodium dichloroisocyanurate on *Pseudomonas aeruginosa* biofilms and planktonic cells". *Biofouling*, 28(1), 111-20, 2012.
- [104] Galloway WR. "Quorum sensing in gram-negative bacteria: small-molecule modulation of AHL and AI-2 quorum sensing pathways". *Chemical Reviews*, 111(1), 28-67, 2011.
- [105] Feng L, Wu Z, Yu X. "Quorum sensing in water and wastewater treatment biofilms". *Journal of Environmental Biology*, 34(2), 437-444, 2013.
- [106] Van der Kooij D, Van der Wielen PW. *Organisms involved in taste and odour*. Editors: Van der Kooij D, Van der Wielen PW. Microbial growth in drinking water supplies, 430-431, London, England, IWA Publishing, 2013.
- [107] Peter A, von Gunten U. "Taste and odour problems generated in distribution systems: a case study on the formation of 2,4,6 trichloroanisole". *Water Supply Research*, 58(6), 386-394, 2009.
- [108] Lehtola MJ. "Removal of soft deposits from the distribution system improves the drinking water quality". *Water Research*, 38(3), 601-610, 2004.