

Su kalitesinin iyileştirilmesinde ozon kullanımı ve kimyasal etkileri

Use of ozone for improving of water quality and its chemical effects

Sibel UZUN¹

ÖZET

Ozon günümüzde su kalitesinin arttırılmasında sıklıkla kullanılan bir dezenfektandır. Ancak yarılanma ömrü kısa ve sudaki çözünürlüğü nispeten düşük olduğundan dağıtım sırasında ortamdaki varlığının sürekliliği mümkün değildir. Bu nedenle ozon ancak primer dezenfektan olarak kullanılabilir. Ozonlamadan sonra dağıtım sistemindeki dezenfeksiyon işleminin tamamlanabilmesi için klor, klordioksit, monokloramin gibi sekonder bir dezenfektan kullanılması gerekir. Ozon sudaki kokun, demir ve mangan gibi inorganik maddelerin yanı sıra herhangi bir sebeple suya karışan organik maddeleri, ilaç kalıntılarını ve pestisitleri etkin şekilde yükseltgeyerek ortamdan uzaklaştırır. Ozon, uygun şekilde ve doğru miktarlarda kullanıldığında etkin bir kimyasal ve mikrobiyolojik dezenfektandır. Buna karşılık uygun olmayan koşullarda veya yüksek miktarlarda kullanıldığında ise istenmeyen yan ürünlerin oluşmasına neden olabilir. Ozon dezenfeksiyon etkisini yükseltgen özelliği ve yüksek reaktivitesi aracılığıyla gösterir. Ozonun sudaki etki mekanizması pH başta olmak üzere pek çok parametreye bağlıdır. Asidik ortamda moleküler halde etki eden ozonun, daha yüksek pH değerlerinde hidroksil radikal formları baskındır. Her iki mekanizma sonucu oluşan yan ürünler birbirinden farklıdır.

ABSTRACT

In recent years, ozone is a disinfectant frequently used for enhancing water quality. However, since its short half-life and relatively low solubility in water, it is not possible to ensure its presence continuously in distribution system. Hence, ozone can only be used as a primary disinfectant. After ozonization, in order to complete the disinfection process in the distribution system, a secondary disinfectant like chlorine, chlorodioxide and monochloramine must be used. As well as odor in water, and inorganic materials such as iron and manganese, ozone effectively removes organic matter, drug residues and pesticides mixed into the water for any reason by oxidation from media. When used appropriately and in the correct amount ozone is an efficient chemical and microbiological disinfectant. However, when ozone is used in unfavorable conditions and/or in large quantities, it can cause the production of unwanted by-products. Ozone shows its disinfection effect through oxidation properties and high reactivity. The effect mechanism of ozone in water is depended on many parameters, mainly on pH. While ozone effects in molecular form at acidic conditions, hydroxyl radical forms are dominant in much higher pH values. By-products formed by both of the mechanisms are different from each other.

¹ Refik Saydam Hifzısıhha Merkez Başkanlığı, Gıda Güvenliği ve Beslenme Müdürlüğü, ANKARA

İletişim / Corresponding Author : Sibel UZUN

Refik Saydam Hifzısıhha Merkez Başkanlığı, Gıda Güvenliği ve Beslenme Müdürlüğü, ANKARA

Tel : +90 312 458 21 45

E-posta / E-mail : sibel.uzun@rshm.gov.tr

Geliş Tarihi / Received : 21.09.2010

Kabul Tarihi / Accepted : 07.02.2011

Ozonlama yan ürünü olan organik asitler ve aldehitler kolayca özümlebilir organik karbon veya biyobozunur karbon türevlerine dönüşebilirler. Bu nedenle ozonlama işlemine biyolojik aktif prosesin eşlik etmesi biyobozunur yan ürünlerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırır. Ozonlamanın uygun şekilde yapılması için sudaki ozon ihtiyacının belirlenmesi gerekir.

Anahtar Sözcükler: İçme suyu, ozon, ozon ihtiyacı, dezenfeksiyon, su kimyası

Organic acids and aldehydes which are by-products of ozonization can easily be converted to the assimilable organic compounds or to the biodegradable carbon derivatives. Thus the application of the biological active process with ozonization makes easier removal of the biodegradable by-products. To apply ozonization appropriately, it is needed to determine the ozone demand in water.

Keywords: Drinking water, ozone, ozone demand, disinfection, chemistry of water

GİRİŞ

Endüstride; içme suyunun iyileştirilmesi, atık su yönetimi, saf su eldesi, balıkçılık, tarım, kağıt, gıda ve boya sanayi gibi pek çok uygulama alanı bulunan ozon (O₃) özellikle kaynak sularında dezenfektan olarak, gıdalarda tazeliğin korunması ve depolama ömrünün uzatılması amacıyla kullanılan bir maddedir (1).

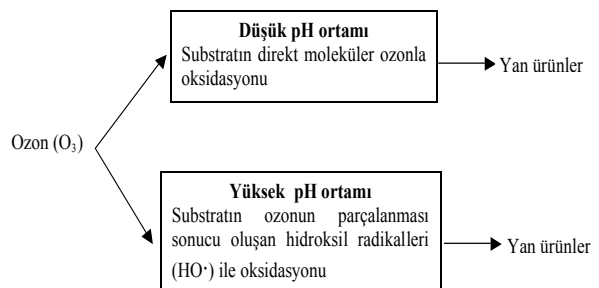
Organik maddeler, canlı organizma faaliyetleri, inorganik bileşikler, endüstriyel atıklar, klorlama, yüksek mineral konsantrasyonu, çözünmüş gazlar gibi faktörler suda kötü tat ve kokuya neden olurlar. Uygun koşul ve miktarlarda olmak koşuluyla ozonlama işlemi yapılarak suda renk giderimi, koku ve tat kontrolünü sağlamak mümkündür. Tablo 1’de sudaki bazı önemli estetik parametreler ve etkileri ilgili değerlendirmeler verilmiştir (2,3).

1. OZON KİMYASI

Ozon (O₃; triatomik oksijen CAS No: 10028-15-6); oda koşullarında renksiz ve keskin kokulu bir gazdır. Hem gaz hem de çözelti halinde oldukça reaktif ve güçlü bir yükseltgen olan ozonun sudaki çözünürlüğü 570 mg/L’dır. Yine bir dezenfektan olarak kullanılan klor gazının sudaki çözünürlüğü ise ozondan 12 kat fazladır.

Ozon, suda direkt moleküler ozon (O₃) olarak kompleks yapılar oluşturmak suretiyle ve/veya

ozonun parçalanma ürünü olan hidroksil radikalleri aracılığıyla olmak üzere iki farklı mekanizma ile yükseltgen etki gösterir (Şekil 1). Moleküler ozon ve hidroksil radikalinin sudaki bulunuşu ortamın pH’sına bağlıdır. Asidik ortamda etkili yükseltgen tür moleküler ozon iken daha yüksek pH’larda radikalik türleri baskındır. Düşük pH’da ozon öncül yan ürünler oldukça etkin şekilde parçalar. Ancak bazı kritik pH değerlerinin üstünde ozonun etkinliği azalır ve yan ürün miktarı artar. pH 7,5 civarında oluşan hidroksil radikalleri üzerinden gerçekleşen oksidasyonun hızı çok yüksektir. Hidroksil radikali, moleküler ozona göre daha güçlü yükseltgendir. Ancak yarılanma ömrü daha kısa olduğundan sudaki miktarı 10-12 M’ı geçmez. UV ışını veya hidrojen peroksit kullanılması da radikal türün baskın olmasına neden olur. 1 mol ozon 1,5 mol hidroksil radikali oluşturur (4).



Şekil 1. Ozonun pH'ya bağlı olarak değişen yükseltgen türleri (4)

Tablo 1. Su ile ilgili bazı estetik parametreler ve etkileri (2,3)

Fiziksel parametreler	Etkileri
Renk	Dışarıdan yabancı bir madde eklendiği konusunda şüphelerini arttırır.
Tat ve koku	Kendiliğinden meydana gelen kirlenmeyi gösterir.
Sıcaklık	Yüksek sıcaklık damak tadı açısından kabul edilemeyeceği gibi mikroorganizmaların gelişimine neden olur.
İnorganik	
Alüminyum	Bulanıklık oluşturur (alüminyum flokları).
Klorür	Kötü tat nedenidir.
Bakır	Galvenizli demir ve çelik bağlantı ekipmanlarının korozyonunu arttırır. Çamaşırlarda ve sıhhi malzemelerde boyamaya neden olur.
Sertlik	Borularda ve buhar kazanlarında tortuların yerinden oynamasına ve yüksek miktarda sabun kullanımına neden olur. Kötü tat oluşturur.
Hidrojen Sülfür	Koku ve kötü tat nedenidir.
Demir	Ferrik demir suya kırmızı-kahve renk verir. Demir, çamaşırları ve boru ekipmanlarını boyar. Borularda tortuya neden olan "demir bakterilerinin" gelişimini tetikler.
pH	Önemli bir işlem parametresidir, örneğin klorür ve ozonun dezenfeksiyonunu etkinliği pH değerine bağlıdır.
Sülfat	Eşlik eden katyona bağlı olarak suya kötü tat verir.
Toplam çözünmüş katı maddeler	Tat üzerinde etkilidir.
Organik	
Diklorobenzenler	Koku
Etilbenzen	Koku
Monoklorobenzen	Koku ve kötü tat
Stiren	Koku
Toluen	Koku
Triklorobenzen	Koku
Ksilen	Koku ve kötü tat
Deterjanlar	Köpük oluşumu, koku ve kötü tat
Dezenfektanlar ve dezenfeksiyon yan ürünleri	
Klor	Koku ve kötü tat
Klorofenoller	Koku

1.1 Ozonun Sulu Ortamdaki Reaksiyonları

Suda ozon ile reaksiyona giren organik ve inorganik türler ozon ihtiyacını belirler. Ortam koşulları ozonun etkinliği üzerinde önemli rol oynadığından, ortamdaki organik ve inorganik bileşiklerle olan reaksiyon mekanizmaları üzerindeki çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Özellikle son dönemlerde tüm dünya gündeminde olan su kirliliğindeki artış ve gelecekte temiz su bulma kaygısı bu çalışmaları hızlandırmıştır.

1.1.1 Organik türler

Ozon büyük organik maddeleri kısmi oksidasyona uğratarak daha küçük moleküllü bozunabilir veya özümlelenebilir türlerine dönüştürür. Oluşan bu biyobozunur türler biyolojik filtrelerden geçirildiğinde, tat ve koku giderimi sağlanarak, sudan uzaklaştırılmış olur.

Organik bileşikler ve halojenleri içeren suların ozonlanması sonucu meydana gelen yan ürünler arasında en sık rastlanan türler triholametan (THM)'lerdir. Ancak, ozonlamanın moleküler ozon mekanizması (pH 6-7) veya hidroksil radikalleri mekanizması (pH $\geq 7,5$) üzerinden gerçekleşmesine bağlı olarak oluşan THM bileşikleri birbirinden farklıdır. Alkalinite arttıkça ozonlama sırasında açığa çıkan hidroksil radikalleri tutularak reaktivitesi engellenir ve ozon molekülü tek oksidant olarak etkiyerek daha düşük oksidasyon basamaklarında THM'lerin oluşma potansiyelini arttırır. Yapılan çalışmalarda nötral pH'da 1 mg karbon için 0,2-1,6 mg ozon kullanılmasıyla THM oluşma potansiyelinde % 3-20 arasında azalma olduğu gözlenmiştir (4,5).

Herhangi bir sebeple suya karışan veya suda oluşan poliaromatik, fenolik, aromatik-heteroaromatik bileşikler, hümik asitler, pestisitler ve alifatik organik bileşikler ozonla yükseltgenerek biyobozunur türlerine dönüşürler (6,7). Tablo 2'de bazı organik bileşiklerin ozonla reaksiyonları sonucu oluşan yan ürünler verilmiştir.

Tablo 2. Bazı organik bileşiklerin ozonla reaksiyonları sonucu oluşan yan ürünler (6)

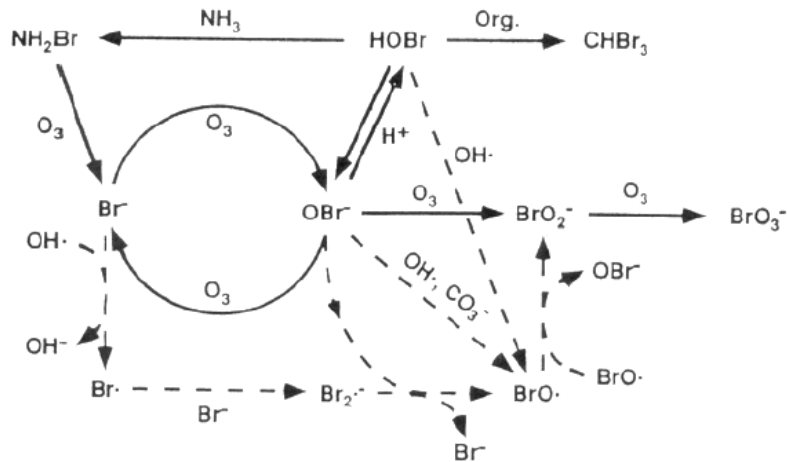
Substrat	Ürünler
Fenantren	2'-Formil-2-bifenilkarboksilik asit, 2'-Hidroksi metil-2-bifenil karboksilik asit, Difenid, Difenik asit
o,m,p-Krezoller	Salisilik asit, Maleik asit, Asetik asit, Okzalik asit, Glioksilik asit, Mezo tartarik asit, Glikolik asit
2,4-Diklorfenol	Formik asit, Okzalik asit, Klorür iyonu, Asetik asit Metil gliokzal
Fenol	Kinonlar, hidrokinonlar, rezorsinol, katekoller, gliokzalik asit, gliokzal
İndol	2-Amino-benzaldehit, 2-Amino-benzoik asit
Hümik asit	Malonik Asit, Süksinik Asit, Hekzanoik Asit, Benzoik Asit, Oktanoik Asit, Glutarik Asit, Adipik Asit

1.1.2 İnorganik türler

Ozon 2+ yüklü demir iyonlarını 3+, 2+ yüklü mangan iyonlarını ise 4+ yüklü türlerine yükseltir. Bu oksidasyon sonucu demir ve mangan iyonları hidroksitleri ve/veya oksitleri halinde çökerek ortamdan uzaklaşır. Çöken türün kimyasal formu işlem yapılan suyun özelliklerine, ortam sıcaklığına ve pH'ya bağlıdır. Örneğin 1 mg demiri uzaklaştırmak için 0,43 mg ozon gerekirken, 1 mg mangan için

0,88 mg ozona ihtiyaç vardır. Demir 6-9 gibi geniş bir pH aralığında oksitlenebilirken, mangan oksidasyonu pH = 8 civarında mümkündür. Bunun yanı sıra aşırı ozon kullanımı demir iyonu üzerinde etkili olmazken, mangan iyonunun tekrar çözünmesine neden olur.

Bromür iyonu içeren suların ozonlanması ile bromat, bromoform, bromlanmış asetik asitler, asetonitriller, bromopikrin ve eğer ortamda amonyak varsa siyanobromür gibi bromlanmış yan ürünler oluşur. Şekil 2'de bromür iyonu içeren sulardaki ozon ve hidroksil iyonları ile açığa çıkan bromlanmış yan ürünlerin oluşma mekanizmaları gösterilmiştir (8). 2 mg/L bromür iyonu içeren bir kaynak suyu için 2 mg/L ozon kullanıldığında 53 µg/L bromoform ve 17 µg/L dibromasetik asit oluşur. Bromür iyonu içeren suların ozonlanması ile ortamda bulunan hipobromit yükseltenecek karsinojen bromat iyonları oluşturur. Ozonlanmış suda ölçülen bromür iyonu ve dezenfeksiyon yan ürün miktarlarının toplamı ham suda mevcut olan bromür iyonunun 1/3'dür. Bu sonuç bromür içeren ham suların ozonlanması sonucu belirlenemeyen bromlanmış yan ürünlerin varlığını gösterir.



Şekil 2. Bromür iyonu içeren sulardaki ozon ve hidroksil iyonları ile açığa çıkan bromlanmış yan ürünlerin oluşma mekanizmaları (8)

2. OZONUN TEMEL KULLANIM AMAÇLARI

1940-1986 yıllarında Amerika, su tesislerinde ozonu başlıca koku ve tat giderimi için kullanmıştır. Günümüzde de iyi üretim uygulamaları (Good Manufacturing Practice: GMP) takip edildiği sürece ozonun kullanılmasında yasal bir engel bulunmamaktadır.

Yüksek miktarda kullanıldığında toksik ve korozif etkiye sahip olan ozon, suda hem inorganik hem de organik türleri yükseltgeyebilir. Ozon ihtiyacının belirlenebilmesi için sudan uzaklaştırılması istenen organik ve inorganik türlerin ve bunların miktarlarının bilinmesi gerekir. Suffet ve ark. (7) belirledikleri farklı özellikteki suları ozon ile muamele etmiş ve 2,5-2,7 mg/L ozonun 10 dakika içinde koku ve kötü tadı önemli ölçüde azalttığını belirlemiştir.

Uygun koşullarda yapıldığında ve doğru miktarlarda kullanıldığında içme sularının kalitesini arttıran ozonlama işleminin avantajları ve sınırlamaları aşağıda verilmiştir (10-12).

a) Ozon kullanımının avantajları:

1. Suda koku ve renk oluşturmaz.
2. Yüksek oksidasyon gücü nedeniyle birkaç saniye gibi kısa bir sürede jermeleri ve virüsleri öldürür.
3. Sudaki rengi, kötü tadı ve kokuyu yok eder.
4. Dezenfeksiyon sonrası sudaki oksijen miktarını artırır.
5. Kimyasal reaktif gerektirmez.
6. Demiri ve manganı yükseltgeyerek ortamdan uzaklaştırır.
7. Algleri öldürerek sudan uzaklaştırır.
8. Organik maddelerle reaksiyon vererek ortamdan uzaklaştırır.
9. Suda hızlı bozunarak uzaklaşır, böylece istenmeyen kalıntı oluşumuna neden olmaz.
10. Koagülasyona yardımcı olur.
11. Pek çok ham su üzerinde ön ozonlama ve/veya dahili ozonlama daha sonra kullanılacak klor ihtiyacını azaltır ve kararlı klor bileşikleri oluşmasını sağlar.

b) Ozon kullanımının sınırlamaları:

1. Toksik etkiye neden olabilir (toksik etki ozon konsantrasyonu ve maruz kalma süresine bağlıdır).
2. Ozonlama işlemi klorlama ile karşılaştırıldığında yüksek maliyetli bir işlemdir.
3. Ozonlama sisteminin kurulumu nispeten zordur.
4. Ozonun bazı organik maddelerle reaksiyonu sonucu istenmeyen aldehit ve ketonlar oluşabilir.
5. Karasız olduğundan dağıtım sisteminde klorlama işlemi gerektirir.
6. Çözünürlüğü klordan daha az olduğundan özel karıştırıcılar gerekir.
7. Bazı organik türler üzerinde hiç oksitleyici etkisi olmayabilir veya ihmal edilebilecek kadar az olabilir.
8. Ozon kullanımı sonucu açığa çıkan biyobozunur organik maddeler organizma gelişmesine neden olabilir. Bu ise biyolojik aktif filtrasyon işlemi uygulanmazsa dağıtım sisteminde korozyon hızının artmasına neden olur. Ozonlama filtrelemeden önce kullanıldığında, biyolojik gelişme filtreleri etkileyerek geri yıkama sıklığının artmasına neden olur.
9. Kullanılan ozon, klor, monokloramin, klordioksit gibi diğer oksidantlarla reaksiyona girebilir.
10. Ozon oksidasyonu sonucu demir ve mangan suda çözünmeyen bileşiklerine dönüştüğünden sedimentasyon veya filtreleme işlemi gerekir. Bu çözünmeyen katı türler filtreleri tıkayabilir ve böylece geri yıkama sıklığını arttırabilir.

2.1 Uygulama Noktaları

İşlemin uygulanacağı ham suyun kalitesi, bulanıklığı ve ozon ihtiyacı (tüm oksidasyon için gerekli olan yükseltgen miktarı) ozonun süreçte nasıl ve ne kadar kullanılacağını belirleyen parametrelerdir. Ozonlamanın sedimentasyon sonrası yapılması genellikle ihtiyaç duyulan ozon miktarını

ve oluşan yan ürün miktarını azaltır. Tablo 3’de bu parametrelere bağlı olarak arıtma tesisinde ozonun uygulama noktaları sunulmuştur.

1. Grupta, su kalitesi nispeten yüksek olduğundan ozonlama doğrudan ham suya yapılır. 2. Gruba giren sularda ozon ihtiyacının düşük olması suda organik maddelerin az, bulanıklığın yüksek olması ise alüvyon ve kil gibi inorganik maddelerin varlığını gösterir. 3. Gruba giren sularda ozon ihtiyacının yüksek olması ve buna karşılık bulanıklığın düşük olması suda çözülmüş (süspanse olmayan) organik maddelerin ve bromür, demir, mangan gibi inorganik türlerin varlığını gösterir. Yeraltı suları genellikle bu özelliklere sahiptir. Suda çözülmüş bu inorganik ve organik türler koku ve tat oluşumu yanı sıra genellikle renklenmeye neden olurlar. Böyle sularda ozonlama doğrudan ham ve/veya sedimentasyon sonrasındaki suya yapılır. Ozonlama sonrası organik türler biyobozunur ürünler açığa çıkardığından biyolojik işlem basamağı gereklidir (Bkz 2.4). Bu tip sularda kolay yükseltgenabilir organik madde veya bromür iyonu varlığı yapılan ozonlama sonrası dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşmasına neden olur. 4. Grup su, yüksek ozon ihtiyacı ve bulanıklığının yüksek olması nedeniyle dezenfeksiyonu en zor olan gruptur. Bu özellikler suyun yüksek miktarda organik ve inorganik partiküller içerdiğini gösterir.

Yüzey suları genelde bu özelliklere sahiptir. Bu grup sulara ozonlama, sedimentasyon sonrasında ve eğer filtreleme gerekli ise filtreleme basamağından sonra yapılmalıdır. Eğer suyun ozon ihtiyacı çok yüksek ise iki aşamalı ozonlama tercih edilmelidir. Dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşabileceği ve açığa çıkan biyobozunur ürünleri uzaklaştırmak için biyolojik işlem gerekeceği göz önüne alınmalıdır (4,7).

Ozonlama işleminin on-line izlenmesi ve kontrolü standart uygulama haline gelmiştir. Günümüzde, makul maliyetlerle, ozonun hem gaz halinde hem de sulu çözeltide ölçümü için son derece güvenilir teknikler geliştirilmiştir. Ozon çok kararsız olduğundan, bu parametrenin ölçümü için bir kalibrasyon standardı mevcut değildir. Ozon kalibrasyonu kolorimetrik veya diğer bağımsız ölçümlere dayanmaktadır ve örnekteki ozon konsantrasyonu değişmeden önce çok hızlı bir şekilde yapılmalıdır.

Daha önce de belirtildiği gibi ozon; klor, klordioksit, monokloramin gibi alternatiflerinden daha kısa sürede ve daha düşük konsantrasyonlarda dezenfeksiyon sağlayan güçlü bir yükseltgendir. Ancak sudaki çözünürlüğü daha az olduğundan dağıtım sırasında ortamda varlığının sürekli olarak sağlanması mümkün değildir. Bu nedenle

Tablo 3. Küçük sistemlerde ozonlama noktalarının seçim kriterleri (4)

Ham su kalitesi	Ozon uygulama noktası	Değerlendirme
1. Grup Bulanıklık < 10 NTU O ₃ ihtiyacı < 1 mg/L	Doğrudan ham suya veya sedimentasyon sonrası	Ozon ihtiyacı düşüktür. Dezenfeksiyon yan ürünü azdır. Biyobozunur organik miktarı düşüktür.
2. Grup Bulanıklık > 10 NTU O ₃ ihtiyacı < 1 mg/L	Sedimentasyon sonrası	Ozon ihtiyacı düşüktür. İnorganik partikül miktarı yüksektir. Biyobozunur organik miktarı düşüktür.
3. Grup Bulanıklık < 10 NTU O ₃ ihtiyacı > 1 mg/L	Doğrudan ham suya ve/veya sedimentasyon sonrası	Ozon ihtiyacı yüksektir. Dezenfeksiyon yan ürünleri fazladır. Biyobozunur organik madde oluşumu fazladır.
4. Grup Bulanıklık > 10 NTU O ₃ ihtiyacı > 1 mg/L	Sedimentasyon sonrası ve eğer gerekli ise ilk filtreleme basamağı sonrası	Ozon ihtiyacı yüksektir. Dezenfeksiyon yan ürünleri fazladır. Biyobozunur organik madde oluşumu fazladır.

ozon ancak primer dezenfektan olarak kullanılabilir. Ozonlamadan sonra dağıtım sistemindeki dezenfeksiyon işleminin tamamlanabilmesi için klor, klordioksit, monokloramin gibi sekonder bir dezenfektan gerekir. Tablo 4’de ortam sıcaklığına bağlı olarak ozonun yarılanma ömrü verilmiştir (5).

2.2 Dezenfeksiyon yan ürünleri

Ozonlama ile yükseltgenme/indirgenme reaksiyonları sonucu farklı türde organik/ inorganik yapılar oluşur. Organik bileşiklerin ozonla reaksiyonlarından genellikle aldehitler, ketonlar, asitler ve diğer organik bileşikler meydana gelir. Ozonla dezenfekte edilmiş içme sularındaki toplam aldehit konsantrasyonu, toplam organik karbon (TOC) miktarına ve uygulanan ozon miktarı/organik karbon miktarı oranına bağlı olarak 5 µg/L’den daha küçük veya 5-300 µg/L aralığındadır. Tablo 5’de sık karşılaşılan organik ve inorganik ozonlama yan ürünleri Şekil 3’de ise oluşma reaksiyonları verilmiştir. Normal koşullarda ortamda halojenler olmadığında ozonlama sonucu halojenli yan ürünler açığa çıkmaz. Ancak ham su da bromür iyonu varsa, ozonla yükseltgenerek sağlık üzerinde ciddi riskleri olan bromlu yan ürünler oluşur (4,6).

Ozon dağıtım sisteminde kalıntı olarak sekonder dezenfektan halinde muhafaza edilemez. Bu amaçla en çok tercih edilen sekonder dezenfektan; halojenlenmiş dezenfeksiyon yan ürünlerini en az miktarda oluşturan (veya hiç oluşturmayan) monokloramindir. Klor sekonder dezenfektanlardan biridir, ancak klor eklenmesinden önce biyolojik olarak etkin bir ön filtrasyon yapılmadığı takdirde ozonlama işlem sonucu oluşan organik maddelerin doğasına bağlı olarak klora işlemi sonucu az veya çok dezenfeksiyon yan ürünleri oluşabilir. Ozonlama işleminden sonra oluşan öncüller uzaklaştırılıp ortamdaki miktarları düşük seviyelere indirildikten sonra serbest klor uygulanarak suda dezenfeksiyon yan ürünleri oluşma potansiyeli azaltılır (4,6).

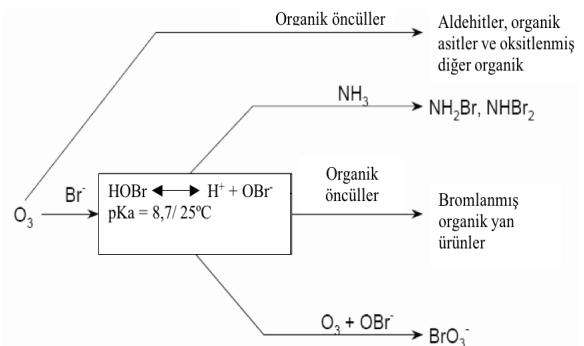
Tablo 4. Ozonun yarılanma ömrünün sıcaklığa bağlılığı (5)

Sıcaklık (°C)	Yarı ömrü (dk)
15	30
20	20
25	15
30	12
35	8

Tablo 5. Sık karşılaşılan organik ve inorganik ozonlama yan ürünlerinin bileşik sınıfları halinde gösterimi (9)

Dezenfeksiyon yan ürünleri	
1. Aldehitler Formaldehit Asetaldehit Glioksal Metil glioksal	2. Aldo ve keto asitler Pirüvik asit
3. Asitler Okzalik asit Süksinik asit Formik asit Asetik asit	4. Bromlanmış yan ürünler* Bromat iyonu Bromoform Bromlanmış asetik asitler Bromopikrin Bromlanmış asetonitriller
5. Diğer Hidrojen peroksit Aromatik bileşiklerin ve pestisitlerin yan ürünleri	

*Bromlanmış yan ürünler sadece bromür iyonu içeren sularda oluşur.



Şekil 3. Ozonlama sonucu oluşan önemli yan ürünlerin reaksiyonları (4)

Ozonlamayı takiben sekonder dezenfektan kullanılması durumunda dezenfektanlar arasındaki olası etkileşime dikkat edilmelidir. Örneğin ozonlama ile birlikte sekonder dezenfektan olarak klor kullanıldığında ozonlama yan ürünü olarak açığa çıkan asetaldehit sekonder dezenfektan ile etkileşerek kloral hidrat (klorlama yan ürünü) oluşturur. Ancak ozonlamadan sonra biyolojik filtrasyon uygulanıp daha sonra klorlama yapıldığında Kloral hidrat oluşumu bertaraf edilir. Benzer şekilde sekonder dezenfektan olarak monokloramin kullanıldığında oluşma olasılığı yüksek olan kloropikrin tehlikesi ozonlamadan hemen sonra biyolojik filtrasyon uygulanarak engellenir (4).

2.3 Ozonlama yan ürünlerinin kontrolü

Bromlanmış yan ürünlerin türlerini ve konsantrasyonlarını etkileyen en önemli faktörler ortam pH'sı, ozon/bromür iyonu oranı ve TOC/ bromür iyonu oranıdır. Bromat iyonu oluşumu asidik pH'larda ozonlama yapılarak ve böylece ortamda hipobromit iyonu yerine (BrO⁻), hipobromöz asit (HOBr) oluşumu sağlanarak kontrol edilebilir. Diğer taraftan yüksek pH'larda ozonlama sonucu hipobromöz asit bromat iyonuna yükseltgenir. Yüksek pH'larda bromat iyonu daha çok bulunurken, düşük pH'larda daha çok bromlanmış organik yan ürünler oluşur. Buna göre kaynak suyuna ozon uygulanması, içerdiği bromür iyonu konsantrasyonuna bağlıdır. Bromat iyonu oluşması bromür iyonları konsantrasyonu düşürülerek, kalıntı ozon miktarı azaltılarak ve daha düşük pH'da ozonlama yapılarak kontrol edilebilir. Ozonlama ile birlikte amonyak ilavesi ile ortamda oluşan bromaminler hem bromat iyonlarının hem de organik yan ürünlerin oluşumunu azaltır. Ancak amonyağın azot bakterileri için bir besin kaynağı olabileceğine dikkat edilmelidir (4).

Ozonlama yan ürünü olan organik asitler ve aldehitler kolayca biyobozunmaya uğrayabilir,

özümlenebilir organik karbon veya biyobozunur karbon bileşenlerine dönüşebilirler. Bu nedenle ozonlama işlemine biyolojik aktif prosesin eşlik etmesi biyobozunur yan ürünlerin uzaklaştırılmasını kolaylaştırır.

2.4 Biyolojik aktif filtrasyon

Ozon; büyük nötral organik molekülleri, küçük ve biyobozunur türlerine dönüştürür. Açığa çıkan bu biyobozunur çözülmüş organik maddeler, bakteri gelişimini hızlandırır ve eğer ortamdan uzaklaştırılmazlarsa bakteriler dağıtım sisteminden yayılırlar. Yapılan çalışmalar 100 ppb'den daha düşük özümlenebilir organik karbon miktarının ortamda bulunmasının bakteriyel büyümenin kontrol edilmesi için önemli olduğunu göstermiştir.

Ozonlama filtrasyon girişine uygulandığında ve çözülmüş oksijen, pH, sıcaklık gibi çevresel koşullar uygun olduğunda filtrede mikrobiyolojik aktivite artar, biyobozunur/özümlenebilir organik karbon uzaklaştırılması artar (4,13). Ozon ilavesi, çözülmüş organiklerin biyobozunurluğunu arttırması yanı sıra suya büyük miktarda oksijen katkısı sağladığından oluşan ortam biyolojik gelişme için mükemmel bir ortam sağlar. Biyolojik aktif türler; durgun kum filtreler (slow sand), ani hızlı filtreler (rapid rate filtre), granüler aktif karbon filtreler (GAC) gibi bakterilerin tutunabileceği ortamlar kullanılarak bertaraf edilebilir. Ozon kullanılan arıtma tesislerinde biyolojik aktif filtrasyonun avantajları aşağıda sıralanmıştır (4):

1. Dağıtım sisteminde ileri bakteriyel gelişmeyi engelleyerek biyolojik olarak stabil ortam yaratır.
2. Nötral organik maddelerin uzaklaşmasını sağladığından daha sonra uygulanacak olan klorlama sonucu oluşması muhtemel yan ürünler bertaraf edilir.
3. Biyolojik aktif filtrasyon işleminden önce birincil dezenfektan olarak uygulanan ozon, çözülmüş biyobozunur organik karbon konsantrasyonunu azaltarak biyolojik gelişmeyi düşürür.

4. Dağıtım sisteminde dezenfeksiyonun sürekliliğini sağlamak için kullanılan klor ihtiyacını azaltarak, yönetmelikte belirtilen maksimum kalıntı klor değerlerinin aşılma olasılığını azaltır.
5. Ozonlama yan ürünlerinin kontrolü sağlanır.

SONUÇ

Günümüze kadar elde ettiğimiz literatür verilerine dayanarak ozonun daha uzun süre vazgeçilmez bir dezenfektan olacağını söylemek mümkündür. Ancak

ozonlama işleminin doğru şekilde yapılmamasının önemli sağlık risklerini ortaya çıkaracağı da bir gerçektir. Oldukça karmaşık olan ozon kimyası, olası yan ürünler ve mikrobiyolojik aktiviteler hakkında bilgi sahibi olmak güvenli ozonlama uygulamaları için önemlidir. Bu nedenle sürecin doğru izlenmesi ve sistemin sıkı kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu kontrollerin sağlanması için günümüzde online izleme yapabilen teknolojiler mevcuttur. Bu yöntemlerle ozonlama işleminin riskleri bertaraf edilerek güvenli dezenfeksiyon sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. www.nutech-o3.com, Ozone: Its Properties and Industrial Uses. Jan.12, 2011.
2. www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506_8.pdf. Jan.12, 2011.
3. Solsona F. Guidelines for drinking water quality standards in developing countries. Lima: PAHO/CEPIS Pub. 2002.
4. Anonymous. Guidance Manuel Alternative Disinfectants and Oxidants. EPA ,1999; (3) 1-52.
5. Gray DM, Germain M. Ozone Measurement Technology in Pure Water Systems. 25th Annual Semiconductor Pure Water & Chemicals Conference. February, 1-8, Santa Clara, CA, 2006.
6. Anonymous. The Chemistry of Disinfectants in Water: Reactions and Products. Safe Drinking Water Committee. Drinking Water and Health, Washington: NRC, 1980 (2): 200-249.
7. Suffet, IH, Anselme C, Mallevalle J. Removal of Tastes and Odors by Ozonation. AWWA Seminar on Ozonation: Recent Advances and Research Needs, Denver, CO 1986.
8. Bollyky LJ. Benefits of Ozone Treatment of Bottled Water. International Ozone Association Proceedingsa Pan American Conference. Inc. Stamford, CT, 2002: 1-14.
9. Fawell JK, Giddings M, Magara, Y, Ohanian, E, Toft, P. Chemical Aspect. Guidelines for drinking-water quality. Third edition, Incorporating First and Second Addenda. Geneva: WHO, 2008; 145-196g.
10. www.spartanwatertreatment.com/disinfection-by-product-control.html. Jan.12, 2011.
11. Hill M. Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies. Fifth Edition. USA: American Water Works Association. 1999.
12. http://whqlibdoc.who.int/hq/2000/a68673_guidelines_2.pdf WHO, Seminar Pack For Drinking-Water Quality Disinfectants and Disinfection By-Products. Jan.12, 2011.
13. Escobar IC Randall AA. Assimilable organic carbon (AOC) and biodegradable dissolved organic carbon (BDOC): Complementary measurements. Water Research 18, 2001 (35): 18, 4444-54.