



# İçme Suyu Kaynaklarının Klor ve Klor Dioksit ile Dezenfeksiyonu Sonucu Meydana Gelen Dezenfeksiyon Yan Ürünleri Oluşumunun Araştırılması: İstanbul Örneği

*Investigation of Disinfection By-Products Formation in Disinfection of Drinking Water Sources with Chlorine and Chlorine Dioxide: Istanbul Case Study*

Kadir Özdemir\*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

## Öz

Bu çalışmada içme suyu kaynaklarının klor ( $Cl_2$ ) ve klor dioksit ( $ClO_2$ ) ile oksidasyonu sonucu meydana gelen sırası ile trihalometan (THM), klorit ( $ClO_2^-$ ) ve klorat ( $ClO_3^-$ ) gibi dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) araştırılmıştır. Bu çalışmada analiz edilen su örnekleri İstanbul'un içme suyu kaynakları olan Terkos Gölü (TRG), Büyükçekmece Gölü (BÇG) ve Ömerli Baraj (ÖLB) sularından toplanmıştır. Su örnekleri  $Cl_2$  ve  $ClO_2$  ile oksitlenerek verilen reaksiyon süreleri sonunda meydana gelen THM oluşumları tespit edilmiştir. TRG, BÇG ve ÖLB su örneklerinde doğal organik madde (DOM) içeriği ise toplam organik karbon (TOK), 254 nm'deki ultraviyole absorban (UV254) ve spesifik ultraviyole absorban (SUVA) parametrelerinin ölçümleri ile ortaya konulmuştur. Klorlanan su numunelerinde 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda ve oda sıcaklığında (25 °C) ölçülen en yüksek THM konsantrasyonu (235,65 µg/l) TRG ham sularında gözlemlenmiştir.  $Cl_2$  ile oksitlenen sulardaki THM miktarlarında artış meydana gelirken  $ClO_2$  ile oksitlenen su numunelerinde ise azalma trendi gözlenmiştir. Diğer yandan bu çalışmada su örneklerinin  $ClO_2$  ile oksitlenmesi sonucu meydana gelen  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  gibi inorganik yan ürünlerin oluşumları değerlendirilmiştir.  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oluşum yüzdeleri sırası ile TRG'de %68,51-%13,21, BÇG'de %61,05-%12,28 ve ÖLB'de ise %69,87-%15,67 olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Klor dioksit, Klorlama, Trihalometan, Klorit, Klorat, İstanbul

## Abstract

In this study, formation of disinfection byproducts (DBPs), namely, trihalomethane (THM) during chlorine ( $Cl_2$ ) and chlorine dioxide ( $ClO_2$ ) oxidizing was investigated with reference to key controlling parameters. Terkos Lake Water (TRG), Büyükçekmece Lake Water (BÇG) and Ömerli Dam (OLB) were used as drinking water source in present study. Water samples were oxidized with  $Cl_2$  and  $ClO_2$  doses at the end of given reaction times to observe the formation of THMs in water sources. The structures of natural organic matter (NOM) in TRG, BÇG and ÖLB samples were revealed to the organic parameters, namely, total organic carbon (TOC), ultraviolet absorbance at 254 nm wavelength (UV254) and specific ultraviolet absorbance (SUVA). Among to the chlorinated drinking water sources, the highest THM concentration was observed as (235,65 µg/l) in TRG samples with dose of  $Cl_2$  (10 mg/l) at the end of reaction time of 24 h. Although THM amounts increased in waters oxidized with  $Cl_2$ , the trend of decreasing THM amounts with oxidized  $ClO_2$  was observed. On the other hand, formation of inorganic DBPs such as chlorate ( $ClO_3^-$ ) and chlorite ( $ClO_2^-$ ) was evaluated during  $ClO_2$  oxidizing.  $ClO_2^-$  and  $ClO_3^-$  levels were determined as 68,51%-13,21% for TRG, 61,05% -12,28% for BÇG and 69,87% -15,67% for OLB.

**Keywords:** Chlorine dioxide, Chlorination, Trihalomethane, Chlorite, Chlorate, İstanbul

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: [kadirozdemir73@yahoo.com](mailto:kadirozdemir73@yahoo.com)

Kadir Özdemir [orcid.org/0000-0003-1464-7078](https://orcid.org/0000-0003-1464-7078)



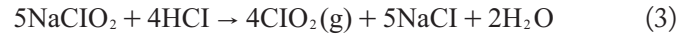
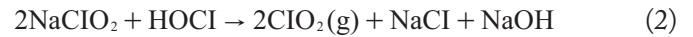
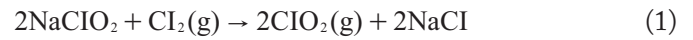
## 1. Giriş

Klorlama dünyada sadece içme suyu kaynaklarının dezenfeksiyonu için değil aynı zamanda termik santralleri, rafineriler, petrokimya endüstrisi ve kimyasal işletme tesisleri gibi endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan kirlenmenin önüne geçmek için de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Satpathy vd. 2019). Bununla beraber dünyada içme suyu ihtiyacı, kullanım amacı ve miktarına bağlı olarak göl, nehir ve tatlı su rezervuarları gibi farklı doğal su kaynaklarından karşılanmaktadır. Dezenfeksiyon, göl ve nehir gibi yüzeyel su kaynaklarından patojen mikroorganizmaları bertaraf ederek daha güvenli ve kaliteli bir su üretmek için gerçekleştirilmektedir (Agusa vd. 2009, Chowdury vd. 2014, Wang vd. 2018). İçme suyu kaynaklarının klorla dezenfeksiyonu sonucunda trihalometanlar (THMs) ve Haloasetik asitler (HAAs) gibi önemli dezenfeksiyon yan ürünleri meydana gelmektedir (Dickenson vd. 2008, Sadiq ve Rodriguez 2004). Amerika Birleşik Devletleri Çevre koruma Ajansı (USEPA 2006) tarafından insan sağlığı üzerinde kanserojen etkilere sahip olan THMs ve HAAs'ın içme sularında kontrolü için maksimum kirletici limit konsantrasyon değerleri sırası ile 80 µg/l ve 60 µg/l olarak belirlenmiştir. 17 Şubat 2005 tarihli resmi gazetede yayınlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te Toplam THM konsantrasyonu için belirlenen limit değer 100 µg/l'dir (Anonim 2005).

Son yıllarda içme suyu arıtımında söz sahibi olan ülkelerde klorlama sonrası meydana gelen DYÜ'nün oluşumunun minimize edilmesi ve kontrol altına alınması için, kloraminler, ozon (O<sub>3</sub>) ve klor dioksit (ClO<sub>2</sub>) gibi alternatif dezenfektanlar kullanılması düşünülmüştür (Han ve Zhang 2018). Bu oksidantlara kıyasla, kullanıldığı zaman önemli derecede THM ve HAA oluşumuna engel olan ClO<sub>2</sub>'in kullanımı daha fazla ön plana çıkmıştır (Gan vd. 2016). Aynı zamanda ClO<sub>2</sub> yüksek okside etme gücüne bağlı olarak, geniş pH aralıklarında (pH 2-10) sudaki patojenleri gidermede klora göre daha etkili bir dezenfektandır (Periera vd. 2008). Diğer yandan klorit (ClO<sub>2</sub><sup>-</sup>) ve klorat (ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ClO<sub>2</sub> ile gerçekleştirilen dezenfeksiyon işlemi sonucunda meydana gelen inorganik yan ürünlerdir (Gordon vd. 1990, Plewa vd. 2004). ClO<sub>2</sub> ile oksidasyon süresince ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> oluşumu ham su kaynağının kalitesine göre değişmektedir. Genellikle içme sularının dezenfeksiyonunda kullanılan ClO<sub>2</sub>'in yaklaşık % 60'ı ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> iyonuna %10'luk kısmı da ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> iyonuna dönüşmektedir (Al-Otoum vd. 2016). Bununla beraber sulara ClO<sub>2</sub> oksidasyonu sonucu görülen ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve

ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> iyonlarının insan sağlığı üzerinde akut, kronik ve nörolojik etkileri bulunmaktadır (Gill vd. 1989, WHO 2011). Bu nedenle USEPA (1998) içme sularında ClO<sub>2</sub>'in sulara bulunması gereken limit değeri 0,8 mg/l, ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> iyonunu ise 1,0 mg/l olarak tayin etmiştir.

İçme sularının dezenfeksiyonunda kullanılan ClO<sub>2</sub> genellikle sodyum klorit (NaOCl<sub>2</sub>) çözeltisi kullanılarak elde edilmektedir. ClO<sub>2</sub> klor gazı (Cl<sub>2</sub>(g)), hipokloröz asit (HOCl) veya hidroklorik asit (HCl) çözeltileri ile NaCl<sub>2</sub> çözeltisinin su içerisindeki reaksiyonları sonucunda elde edilebilmektedir (Aieta ve Berg 1986). Bu reaksiyonlar sırası ile Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 olarak verilmiştir;



Bu çalışmada, Cl<sub>2</sub>'ye alternatif olarak içme suyu kaynaklarının ClO<sub>2</sub> ile oksidasyonu sonucunda meydana gelen DYÜ'nün (THM, ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve ClO<sub>3</sub><sup>-</sup>) oluşum miktarları araştırılmıştır. Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile oksitlenen ham su örnekleri ise çalışma alanı olarak daha önce literatürde organik madde içerdiği bilinen Terkos Gölü (TRG), Büyükçekmece Gölü (BÇG) ve Ömerli Barajı (ÖLB) içme suyu kaynaklarından alınmıştır (Avsar vd. 2015; Uyak vd. 2014; Avsar vd. 2014).

İçme suyu dezenfeksiyonunda ClO<sub>2</sub> ve Cl<sub>2</sub> kullanılarak farklı miktarlardaki DYÜ oluşumu analizleri ile ilgili olarak yapılan bu çalışma ulusal ve uluslararası bilimsel literatüre dezenfeksiyon yan ürünleri ile ilgili önemli bir katkı sağlamakla beraber özellikle içme suyu arıtma tesislerinin optimizasyonu ile ilgili böyle bir araştırma yapılması bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

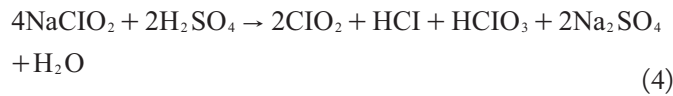
## 2. Gereç ve Yöntemler

### 2.1. Numune Toplama

Bu çalışmada deneysel çalışmalarda kullanılan ham su örnekleri sırası ile TRG, BÇG ve ÖLB sularından toplanmıştır. TRG, BÇG ve ÖLB İstanbul ilinin önemli içme suyu kaynakları olup, bu rezervuarlarından yaklaşık olarak günde 2,5 milyon m<sup>3</sup> su konvansiyonel arıtmadan geçtikten sonra içme suyu olarak kullanılmaktadır. Söz konusu içme suyu kaynaklarından tekil numune olarak toplanan su numuneleri deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, herhangi bir mikrobiyal aktiviteyi engellemek için +4°C'de laboratuvar ortamında bulunan buzdolabında saklanmıştır.

## 2.2. Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile Oksidasyon İşlemleri

İçme suyu kaynaklarından toplanan su numunelerinin Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile oksidasyon işlemleri 500 ml'lik kahverengi cam şişelerde gerçekleştirilmiştir. TRG, BÇG ve ÖLB numunelerinde pH düzenlenmesi, 5 mM'lik fosfat tampon çözeltisi ile pH 7'ye getirilerek yapılmıştır. Klorlama deneyleri APHA (2005)-5710-B'de yer alan iyodemetrik titrasyon metoduna göre %4'lük NaOCl ile 5 mg/ml'lik hazırlanan stok klor çözeltisinden 500 ml'lik şişelere 5 ve 10 mg/l'lik klor dozu ilave edilerek gerçekleştirilmiştir. Diğer yandan bu çalışmada su numunelerinin ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmesinde kullanılan 1000 mg/l'lik stok ClO<sub>2</sub> çözeltisi aşağıdaki Eşitlik 4'e göre üretilmiştir;



1000 mg L<sup>-1</sup>'lik stok ClO<sub>2</sub> çözeltisinden 2, 5, 8 ve 10 mg/l'lik çalışma dozları hazırlanarak ham su numuneleri oksitlenmiştir. Farklı ClO<sub>2</sub> dozları ile oksitlenen TRG, BÇG ve ÖLB numuneleri belirtilen reaksiyon sürelerinde (1-24 saat) meydana gelecek olan DYÜ oluşumunu tespit etmek amacı ile karanlık bir ortamda oda sıcaklığında bekletilmiştir.

## 2.3. Analitik İşlemler

Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile oksitleme işlemlerinden önce TRG, BÇG ve ÖLB suyu örnekleri 0,45 µm'lik membran filtre kâğıdından geçirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştiren bütün deneysel işlemlerde ve analizlerde kullanılan standart çözel-

tileri hazırlamada ultra saf su (Sartorius Co., Germany) kullanılmıştır. TOK ölçümleri APHA (2005)-3510-B'de belirtilen yüksek sıcaklıkta yakma metoduna göre Shimadzu-5000A TOK analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bununla beraber UV<sub>254</sub> ölçümleri ise Shimadzu 1601 UV Visible spektrofotometre cihazı ile yapılmıştır. THM bileşiklerini içeren analizler EPA 551 metodunda yer alan sıvı-sıvı ekstraksiyon yöntemine göre; DB-1 kapiler kolona sahip (30 m×0.32 mm I.D.×1.0 µm, J&W Science) GC µECD (Hewlett Packard Gas, 6890 Seri 2) cihazıyla yapılmıştır. Bu çalışmada su örneklerindeki ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> ile Br<sup>-</sup> iyonları miktarları USEPA 300.1 metoduna göre AS-19 analitik kolon ve AG-19 guard kolondan oluşan Dionex ICS-3000 iyon kromatografi cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Bakiye oksidant konsantrasyonları ise DPD- kolorometrik metodu ile tespit edilmiştir (Chang vd. 2010; Yang vd. 2017).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Çizelge 1'de TRG, BÇG ve ÖLB suları ile ilgili su kalite parametre değerleri verilmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü üzere her bir içme suyu kaynağından toplanan su örnekleri üzerinde yapılan su kalite parametre analizlerinin neticesinde; pH: 6,88-8,43; Bulanıklık: 1,8-7,7 NTU; İletkenlik: 220-687 µS cm<sup>-1</sup>; Toplam sertlik: 85-194 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; Bromür: 60-270 µg L<sup>-1</sup> ve sıcaklık parametresinin ise 5.4-26.9°C arasında değiştiği gözlenmiştir.

Buna göre TRG, BÇG ve ÖLB alınan su örneklerinde sıcaklık parametresi değer aralıklarının birbirine yakın oldu-

Çizelge 1. Ham su kalite parametre değerleri.

Parametreler	Birim	Terkos Gölü		B.Çekmece Gölü		Ömerli Barajı	
		(TRG)		(BÇG)		(ÖLB)	
		Min-Maks.	Ortalama	Min-Maks.	Ortalama	Min-Maks.	Ortalama
pH	-	7,50-8,13	7,74	7,97-8,43	8,13	6,88-7,53	7,29
Bulanıklık	NTU	3,1-8,6	4,2	1,8-7,7	3,7	1,7-4,6	3,1
İletkenlik	µS/cm	285-596	423	311-687	522	220-375	265
Alkalinite	mg/l CaCO <sub>3</sub>	88-132	118	104-139	130	67-102	89
Toplam Sertlik	mg/l CaCO <sub>3</sub>	123-171	135	132-194	149	85-113	98
Sıcaklık	°C	5,3-25,8	15,8	7,4-26,9	16,4	6,5-24,2	15,3
Klorür	mg/l	41-75	54	63-125	79	25-58	38
Bromür	µg/L	83-210	140	110-270	200	60-110	80
TOK	mg/l	4,15-6,27	5,47	3,81-6,32	4,85	3,38-4,85	4,02
UV <sub>254</sub>	cm <sup>-1</sup>	0,09-0,15	0,12	0,07-0,13	0,1	0,05-0,1	0,07
SUVA	L/mg.m	2,17-3,61	2,85	1,88-3,41	2,55	1,52-2,95	2,11

ğu görülmekte olup bunun yanında en yüksek pH değeri BÇG ham su numunelerinde görülmüştür. Klorür ve bromür miktarları ise Marmara denizine kıyısı en yakın olan ve dolayısı ile diğer su kaynaklarına göre tuzluluk girişi daha fazla olan BÇG ham sularında gözlenmiştir. Uyak vd. (2008) tarafından İstanbul iline içme suyu sağlayan su kaynaklarının klorlanması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmada BÇG su kaynağının Marmara Denizine yakın olması sebebi ile tuzlu su girişinin fazla olduğu ve dolayısı ile bromür ve klorür konsantrasyonlarının yükseldiği tespit edilmiştir. Bu bölgede konu ile ilgili geçmişte yapılan araştırmalar bu sonucu doğrulamaktadır (Uyak ve Toröz 2005). TRG ve ÖLB ham su örneklerinde ise en yüksek klorür miktarları 75 mg/l ve 58 mg/l olarak, bromür miktarları ise 210 µg/l ve 110 µg/l olarak ölçülmüştür. Diğer yandan, söz konusu içme suyu kaynaklarında DOM'u temsil eden TOK parametresinin ortalama değerleri sırası ile 5,47 mg/l, 4,85 mg/l ve 4,02 mg/l olarak tespit edilmiştir. En yüksek TOK ve UV<sub>254</sub> değeri (6,32 mg/l – 0,15 cm<sup>-1</sup>) TRG ham sularında görülürken, en düşük TOK ve UV<sub>254</sub> değeri (3,38 mg/l – 0,05 cm<sup>-1</sup>) ÖLB ham sularında gözlenmiştir. BÇG ham su numunelerinde ise en yüksek TOK ve UV<sub>254</sub> değerleri 6,27 mg/l ile 0,13 cm<sup>-1</sup>, en düşük TOK ve UV<sub>254</sub> değeri ise 3,81 mg/l ve 0,07 cm<sup>-1</sup> olarak ölçülmüştür. En yüksek SUVA (SUVA=UV<sub>254</sub> \*100/TOK) değeri ise 3,61 L mg. m olarak TRG ham su örneklerinde bulunmuştur. BÇG ve ÖLB sularında bulunan en yüksek SUVA değerleri ise 3,41 L/mg.m ve 2,95 L/mg.m'dir. TOK, UV<sub>254</sub> ve SUVA parametreleri içme suyu kaynaklarındaki DOM miktarlarını ve yapısını temsil etmek için kullanılan organik parametrelerdir. TOK, su içerisindeki DOM konsantrasyonunu (mg/l) gösterirken UV<sub>254</sub>, 254 nm dalga boyunda DOM'un yapısındaki aktif fonksiyonel organik bileşiklerin absorban değerini gösteren önemli bir organik parametredir. Bu çalışmada olduğu gibi literatürde de bazı araştırmacılar DOM konsantrasyonunda meydana gelen değişimleri yerinde ve sürekli olarak izlemek için UV<sub>254</sub> ve TOK ile DOM arasındaki korelasyonlardan faydalanmışlardır (Benjamin vd. 1997, Özdemir vd. 2015). Diğer yandan konu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda farklı DOM karakterine sahip su kaynaklarındaki UV<sub>254</sub> değerlerinin klorlama prosesi sonucunda meydana gelen THM miktarlarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür (Matilainen vd. 2002, Guary vd. 2005). SUVA, DOM'un organik içeriğinin tahmininde en fazla kullanılan organik bir parametre olup, aynı zamanda DOM içeren suların klorlanması sonucu oluşan THM gibi DYÜ oluşum potansiyelinin de önemli bir göstergesidir (Yoon vd. 2012, Özdemir vd. 2015). Literatürde konu ile ilgili yapılan su kalitesi çalışma-

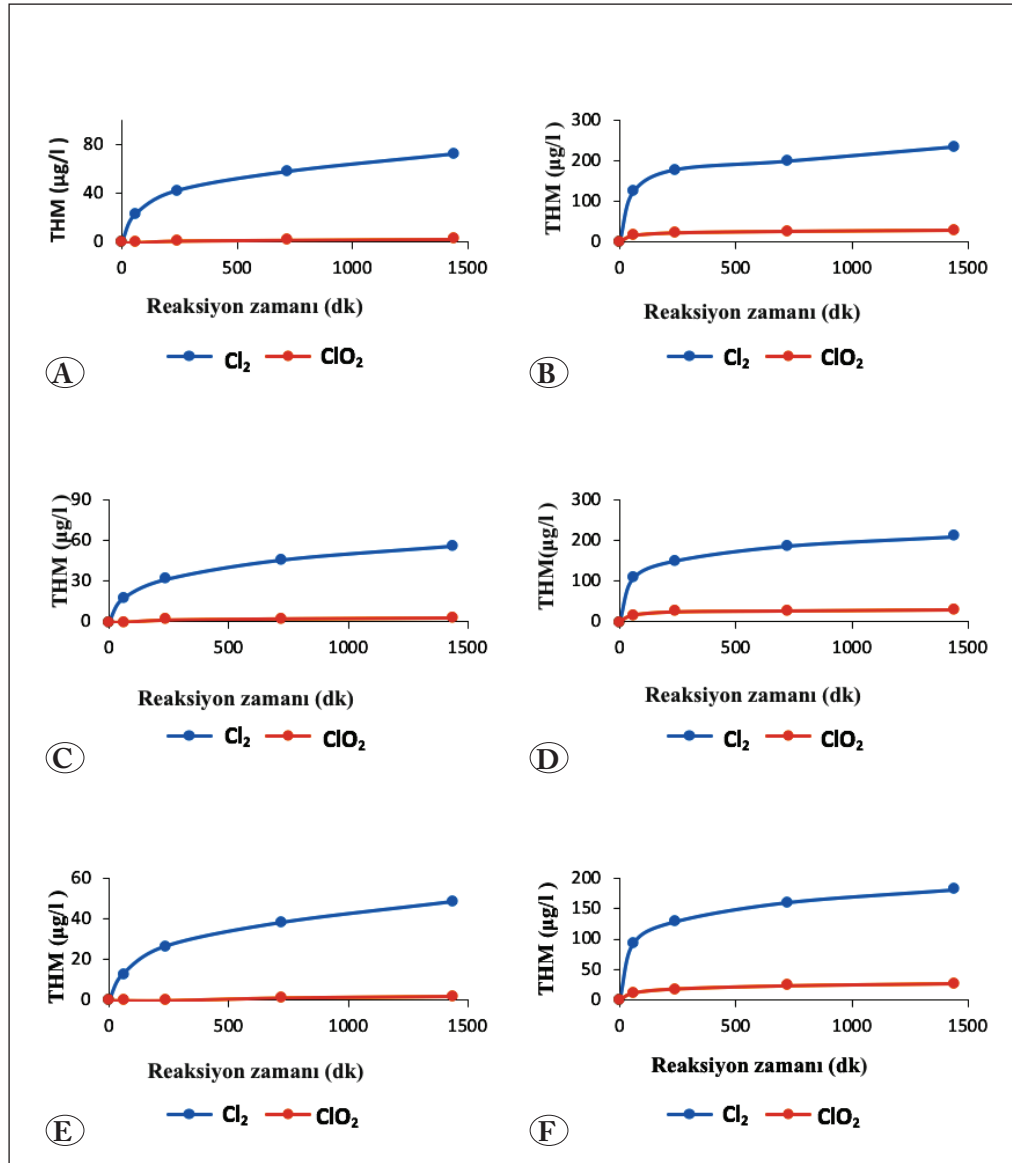
larında da SUVA değeri 4–5 L/ mg.m olan sular da DOM daha çok yüksek moleküler ağırlığa sahip aromatik bileşiklerden meydana geldiğini göstermektedir (Elshorbagy vd. 2000, Özdemir 2016). İçeriğinde DOM bulunan yüzeysel sular da yüksek SUVA değerleri (SUVA > 3), DOM içeriğinin özellikle fenol ve karboksil gibi aktif fonksiyonel gruplara sahip yüksek moleküler ağırlığa sahip hidrofobik organiklerden meydana geldiğini gösterirken, düşük SUVA değerleri (SUVA < 3) alifatik organikler, karboksilik asit ve aminoasitler gibi hidrofilik yapıların daha yüksek oranda bulunduğunu göstermektedir (Edzwald vd. 1985, Uyak vd. 2007). Dolayısı ile; bu çalışmada TRG, BÇG ve ÖLB su kaynaklarında bulunan DOM'u temsil eden organik parametre değerlerinin literatürde yapılan çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmektedir.

### 3.1. THM Oluşumlarının Araştırılması

Şekil 1'de TRG, BÇG ve ÖLB su örneklerinin 5 ve 10 mg/l'lik Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> dozu ile pH 7'de oksitlenmesi sonucunda, 1 ile 24 saat bekletme süreleri sonunda meydana gelen THM miktarları gösterilmektedir. Buna göre klorlanan ham su örneklerinde yaklaşık 1 saatlik reaksiyon süresi sonunda THM oluşumunun %50'sinin gerçekleştiği gözlenmektedir. 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda klorlanan içme suyu kaynakları içerisinde en yüksek THM miktarı (235,65 µg/l) SUVA değeri (3,61 L/mg.m) en yüksek olan başka bir ifade ile; organik karbonu hidrofobik bileşiklerden meydana gelmiş TRG ham sularında gözlenmiştir.

24 saatlik reaksiyon süresi sonunda en az THM konsantrasyonu (48,51 µg/l) SUVA değeri (1,52 L/mg.m) en düşük olan organik karbonu hidrofilik bileşiklerden oluşmuş ÖLB su numunelerinde tespit edilmiştir. 5 ve 10 mg/l'lik Cl<sub>2</sub> dozları ile oksitlenen BÇG ham su numunelerinde ise 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda meydana gelen THM miktarları ise sırası ile, 56,04 µg/l ve 210,35 µg/l olarak ölçülmüştür. Diğer yandan ClO<sub>2</sub> ile oksidasyonda, 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda en düşük ve en yüksek ClO<sub>2</sub> dozu ile oksitlenen TRG, BÇG ve ÖLB su örneklerinde tespit edilen THM miktarları sırası ile, 2,78–30,21 µg/l, 3,1–31,03 µg/l ve 1,86–28,14 µg/l olarak ölçülmüştür. Başka bir ifade ile; Cl<sub>2</sub>'a kıyasla ClO<sub>2</sub> ile oksidasyon prosesi sonucunda, TRG, BÇG ve ÖLB su numunelerindeki THM oluşum miktarlarında sırası ile yaklaşık %84, %75 ve %81 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Linder vd. (2006) tarafından yapılan çalışmalarda farklı su kaynaklarından alınan su örneklerini Cl<sub>2</sub> yerine ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmesi sonucunda THM ve HAA konsantrasyonlarında önemli bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer yandan bu çalışmada fark-

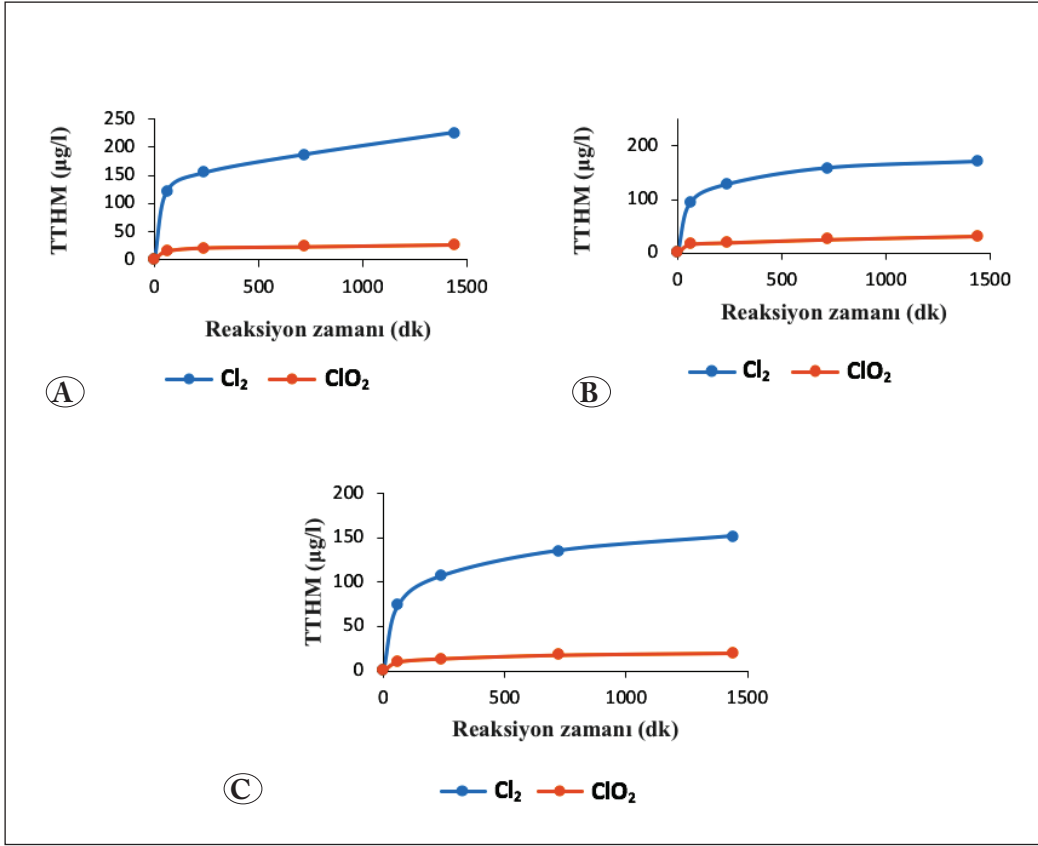




Şekil 1. Klor ve Klor dioksit ile oksidasyon sonucunda meydana gelen THM konsantrasyonları (Oksidant dozu = sırası ile; 5 ve 10 mg/l, pH =7, Sıcaklık = 25°C, Reaksiyon zamanı =1-24 saat); A, B) TRG; C, D) BÇG; E, F) ÖLB.

lı su kaynaklarından alınan su numunelerinin Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmesi neticesinde elde edilen sonuçlar geçmiş literatür çalışmaları ile karşılaştırılması sonrasında literatürü destekler şekilde olduğu görülmüştür (Ramavandi vd. 2015, Yu vd. 2015). Şekil 2'de 5 mg/l Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> dozu kullanılarak TRG, BÇG ve ÖLB su numunelerinin oksidasyonu süresince 40 °C'de ve 24 saatlik reaksiyon sonunda meydana gelen THM miktarları gösterilmektedir. Bu sonuç aynı zamanda DOM içeren yüzey sularının klorlanması neticesinde reaksiyon süresi ve klor dozu arttıkça meydana gelen THM konsantrasyonlarında da önemli bir artış meydana geldiğini göstermiştir. Daha önce benzer konu ile yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlar bu bulgunun doğruluğunu ortaya koymaktadır (Manafsi vd. 2016, Yang vd. 2017).

Söz konusu çalışmanın sonuçları Şekil 1 ile karşılaştırıldığında, su sıcaklığındaki artış ile orantılı olarak her üç içme suyu kaynağının klorlanması sonucunda meydana gelen THM konsantrasyonlarında belirgin bir artış olmasına karşılık ClO<sub>2</sub> ile gerçekleştirilen oksidasyon neticesinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Başka bir ifade ile; su sıcaklığı 25°C'den 40°C'ye yükseltildiğinde 24 saatlik reaksiyon süresi sonunda sırası ile klorlu TRG, BÇG ve ÖLB su numunelerinde THM oluşumlarının yaklaşık %33, %36 ve %30 oranında yükseldiği tespit edilmiştir. Diğer yandan ClO<sub>2</sub> ile oksitlenen TRG, BÇG ve ÖLB su numunelerinde analiz edilen THM konsantrasyonlarında ise sadece 1 ile 2 µg/l arasında bir değişim olduğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, Hong vd. (2017) tarafından Çin'de Jin Lan içme



Şekil 2. Klor ve Klor dioksit ile oksidasyon sonucunda meydana gelen THM konsantrasyonları (Oksidant dozu = 5 mg/l, Sıcaklık = 40°C, pH = 7, Reaksiyon zamanı = 1–24 saat; A) TRG, B) BÇG, C) ÖLB.

suyu kaynağından alınan örneklerin farklı miktarlarda Cl<sub>2</sub> ve ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmesi ile su sıcaklığının 20°C'den 30°C'ye çıkarılması sonucunda meydana gelen THM oluşum miktarlarındaki artışın değerlendirilmesi ile ortaya konulmuştur. Konu ile ilgili yapılan benzer literatür çalışmaları incelendiğinde bu çalışmada elde edilen sonucu desteklediği anlaşılmaktadır (Ammar vd. 2014). Bununla beraber, sıcaklık artışı ile klorlanmış TRG ve ÖLB su numunelerine oranla BÇG su numunelerinde meydana gelen THM oluşumunun biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bu bulgu, BÇG su örneklerinde bromür seviyesinin yüksek olması neticesinde klorlama işlemi ile meydana gelen HOBr iyonunun daha yüksek sıcaklıklarda klorla oksidasyon reaksiyonundan ziyade organik bileşiklerle daha hızlı bir şekilde yer değiştirme reaksiyonları oluşturması sayesinde daha fazla THM oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda diğer içme suyu kaynaklarına kıyasla daha yüksek bromür konsantrasyonuna sahip ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmiş BÇG örneklerinde ClO<sub>2</sub> ile DOM arasında gerçekleşen hidroliz ve diğer bozunma reaksiyonlarına bağlı olarak ClO<sub>2</sub> miktarında daha fazla bir azalmanın meydana gelebileceğini göstermektedir. Bu sonucu ilgili literatürde yapılmış çalışmalarda elde edilen benzer sonuçlar desteklemektedir (Zhang vd. 2015)

### 3.2. Bakiye ClO<sub>2</sub>, ClO<sub>2</sub><sup>-</sup> ve ClO<sub>3</sub><sup>-</sup> Oluşumunun İncelenmesi

Şekil 3'de farklı ClO<sub>2</sub> dozlarında (2–10 mg/l) oksitlenen TRG, BÇG ve ÖLB su numunelerinde 24 saatlik reaksiyon süresi sonundaki bakiye ClO<sub>2</sub> miktarları gösterilmiştir. En düşük ClO<sub>2</sub> dozu ile oksitlenen TRG su örneklerinde bakiye ClO<sub>2</sub> seviyeleri 0,05 mg/l, BÇG su numunelerinde 0,03 mg/l ve ÖLB su örneklerinde ise 0,08 mg/l; en yüksek ClO<sub>2</sub> dozu ile oksitleme işlemi gerçekleştirildiğinde bu miktarlar sırası ile 0,49 mg/l, 0,35 mg/l ve 0,58 mg/l olarak tespit edilmiştir

24 saatlik reaksiyon süresi içinde uygulanan tüm ClO<sub>2</sub> dozlarında ÖLB ve TRG numunelerine göre en yüksek bakiye ClO<sub>2</sub> konsantrasyonu ÖLB örneklerinde gözlenmiştir. Buna göre farklı ClO<sub>2</sub> dozları ile oksitlenen su kaynaklarında organik madde konsantrasyonu yüksek olan TRG su numunelerinde daha fazla miktarda ClO<sub>2</sub> tüketimi görülürken en az ClO<sub>2</sub> tüketimi TOK konsantrasyonu en düşük olan ÖLB su örneklerinde tespit edilmiştir. Avşar vd. (2017) tarafından üç farklı su kaynağının en düşük ve en yüksek (0,25–1,5 mg/l) ClO<sub>2</sub> ile oksitlenmesi neticesinde ClO<sub>2</sub> bakiye konsantrasyonlarının 0,03–0,6 mg/l arasında olduğu

gözlenirken, en yüksek bakiye konsantrasyonunun TOK değeri en az olan numunelerinde görüldüğü tespit edilmiştir. Aynı zamanda geçmişte konu ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen benzer sonuçlar bu bulgunun geçerliliğini doğrulamaktadır (Hsu vd. 2016).  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  içme suyu kaynaklarının  $ClO_2$  ile oksidasyonu sonucunda meydana gelen inorganik yan ürünlerdir.  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oluşumu

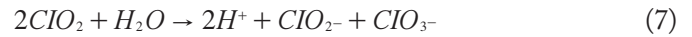
oksitlenme reaksiyonunda pH değerine göre değişmektedir. pH 7'de suların oksidasyonu neticesinde  $ClO_2^-$  oluşumu Eşitlik 5 ile verilmektedir (Avşar vd. 2017);



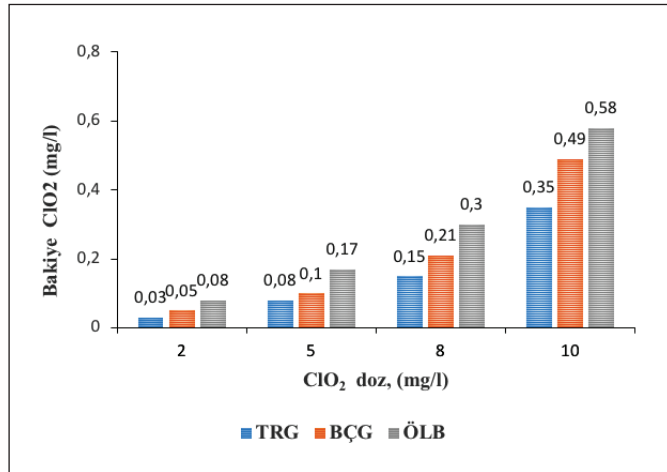
Eşitlik 6 da gösterildiği gibi asidik pH ( $pH < 3$ ) değerlerinde ise  $ClO_2^-$  iyonu  $Cl^-$  iyonuna dönüşmektedir.



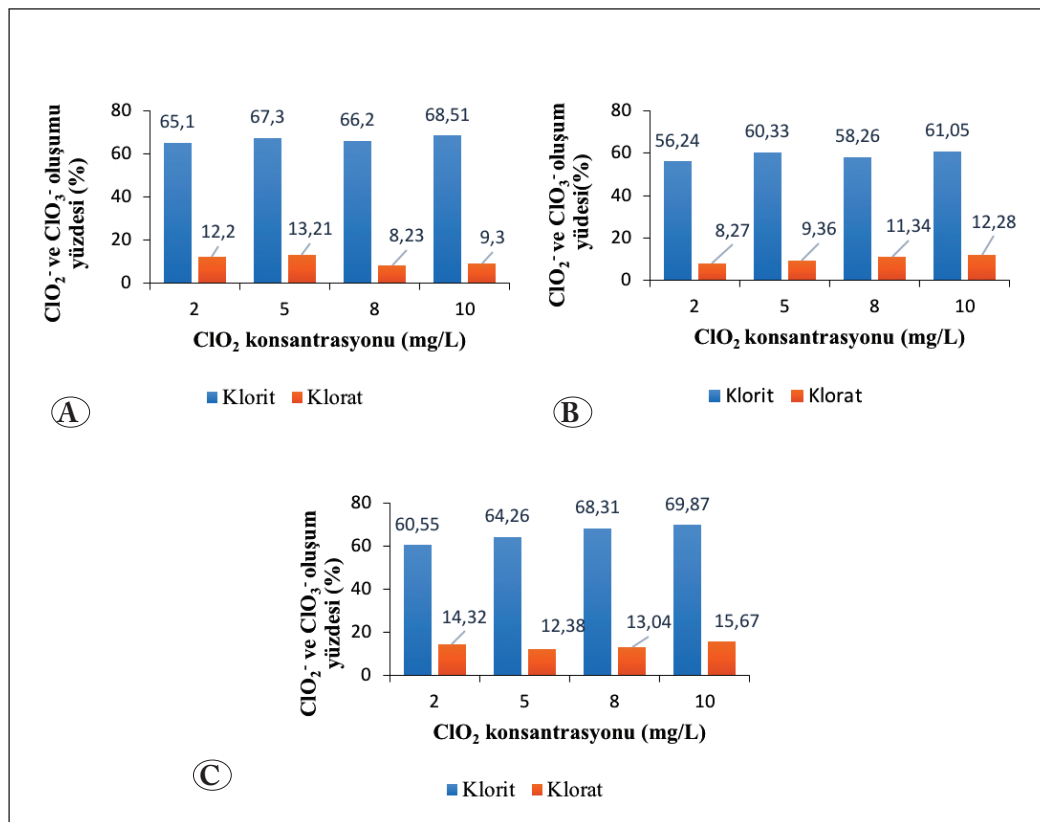
Yüksek pH değerlerinde ( $pH = 10$ ) ise  $ClO_2$  direkt olarak Eşitlik 7 de verildiği gibi klorit ve klorata dönüşmektedir.



Şekil 4'de her bir içme suyu kaynağından alınan su numunelerinin 2 ile 10 mg/l  $ClO_2$  ile oksitlendiğinde meydana gelen  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oranları verilmektedir. Buna göre verilen  $ClO_2$  dozlarında  $ClO_3^-$  oluşumunun  $ClO_2^-$ 'den daha düşük olduğu gözlenmektedir. En yüksek  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oluşumu en yüksek  $ClO_2$  dozunda sırası ile, %69,7 ve %15,67 olarak ÖLB suyu numunelerinde görülmüştür. Bu sonuç aynı zamanda meydana gelen  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oluşumlarının uygulanan  $ClO_2$  ile su kaynaklarının içerdiği doğal organik maddenin yapısı ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Konu ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalarda elde edilen benzer



Şekil 3.  $ClO_2$  oksitlenmesi sırasında görülen bakiye  $ClO_2$  konsantrasyonları: (Reaksiyon zamanı = 24 saat,  $pH = 7$ ).



Şekil 4.  $ClO_2$  ile oksitlenmesi sonucunda görülen  $ClO_2^-$  ve  $ClO_3^-$  oluşumları; A) TRG, B) BÇG, C) ÖLB. ( $ClO_2$  dozları: 2–10 mg/l, Reaksiyon zamanı = 24 saat,  $pH = 7$ ).

sonuçlar bulunmaktadır (Geter vd. 2004, Chu vd. 2011). Diğer yandan, analiz edilen klorür konsantrasyonuna bağlı olarak BÇG ham sularında gözlemlenen  $\text{ClO}_2^-$  oluşumunun TRG ve ÖLB’de meydana gelen  $\text{ClO}_2^-$  oluşumundan biraz daha düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Başka bir ifade ile; klorür konsantrasyonundaki artış  $\text{ClO}_2^-$  oluşum miktarının azalmasına neden olmaktadır. Sathpathy vd. (2019) tarafından Hindistan’da denizden, Palar nehrinden ve Suwanee rezervuarından alınan su örnekleri farklı dozlarda (1–25 mg/l)  $\text{ClO}_2$  ile oksitlenmiş olup, en düşük  $\text{ClO}_2^-$  oluşumu klorür konsantrasyonu (19000 mg/l) en yüksek olan deniz suyu örneklerinde gözlenmiştir. Bu çalışmada en düşük  $\text{ClO}_3^-$  oluşumları ise sırası ile %8,23 ve %8,27 ile TRG ve BÇG örneklerinde tespit edilmiştir. Bu çalışmanın da bir sonucu olarak normal koşullar altında (pH = 7)  $\text{ClO}_2$  oksidasyonu sırasında Eşitlik (5) de verildiği gibi genellikle su numunelerinde  $\text{ClO}_2^-$  baskın inorganik yan ürün olarak görülmektedir, Buna karşılık, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7 de belirtildiği üzere asidik ve bazik pH değerlerinde  $\text{ClO}_2$  oksidasyonu sırasında ise su numunelerinde  $\text{ClO}_2^-$  oluşumu ile beraber daha yüksek oranlarda  $\text{ClO}_3^-$  iyonu oluşumunun da görülebileceği literatürde ilgili çalışmalarla da desteklenmektedir (Stanford vd. 2011).

Bu sonuçlar, 2–10 mg/l arasında  $\text{ClO}_2$  dozlarında oksitlenen TRG, BÇG ve ÖLB suyu numunelerinde genellikle  $\text{ClO}_2^-$ ’in  $\text{ClO}_2^-$ ’e dönüşümünün %60’dan daha fazla,  $\text{ClO}_2^-$ ’in  $\text{ClO}_3^-$ ’a oranının ise %8 ile %15 arasında olduğunu ortaya koymaktadır. Al-Gouti vd. (2016) tarafından Katarda desalinasyon tesisleri çıkışlarından, içme suyu rezervuarlarından ve musluk sularından alınan örneklerin farklı dozlarda  $\text{ClO}_2$  ile oksitlenmesi sonucunda  $\text{ClO}_2^-$ ’in  $\text{ClO}_2^-$ ’e dönüşüm oranının %50–%70 arasında,  $\text{ClO}_3^-$ ’e dönüşüm oranının ise %7–%10 arasında olduğu ortaya koyulmuştur. Konu ile ilgili literatürde yapılan önceki çalışmalarda farklı dozlarda  $\text{ClO}_2$  ile oksitlenen su numunelerinde  $\text{ClO}_2^-$ ’nin %60 ile %70’i  $\text{ClO}_2^-$ , %10–20’ sinin ise  $\text{ClO}_3^-$ ’e dönüştüğü bilgisi yer almaktadır (Sorlini vd. 2014, Han vd. 2017).

Bu çalışmada her bir içme suyu kaynağının içerdiği DOM’un yapısının THM oluşumunda önemli bir yerinin olduğu ortaya konulmuştur.  $\text{Cl}_2$  ile oksitlenen ham su numunelerinde meydana gelen THM miktarları sırası ile; TRG > BÇG > ÖLB olarak gözlemlenmiş olup,  $\text{ClO}_2$  ile yapılan oksitleme sonucunda ise THM miktarlarında belirgin bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer yandan her bir su kaynağının  $\text{ClO}_2$  ile oksitlenmesi sonucunda ortamda  $\text{ClO}_2^-$  iyonunun en baskın olarak görülen inorganik yan ürün olduğu

tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışma, dezenfeksiyon işleminin klora alternatif olarak klor dioksit ile gerçekleştirilmesi halinde, insan sağlığı üzerinde kanserojen etkisi olan THM gibi DYÜ’nün minimize edilerek ülkemizdeki içme suyu arıtma tesislerinde daha kaliteli bir içme suyu üretiminin elde edileceği potansiyelini sonuçları ile ortaya koymaktadır.

#### 4. Kaynaklar

- Agusa, E., Nikolay A.N., David, V. 2009.** Disinfection by-products and their potential impact on the quality of water produced by desalination system. *Desalination*, 237: 214-237. DOI: 10.1016/J.DESAL.2007.11.059.
- Aieta, EM., Berg, JD. 1986.** A Review of Chlorine Dioxide in Drinking Water Treatment. *J. Am. Water Works Assoc.*, 78(6): 62-72. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1986.tb05766.x
- Al-Otoum, F., Al-Ghouti, M.A., Ahmed, TA., Abu-Dieyeh, M., Ali, M. 2016.** Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): occurrence in drinking water in Qatar. *Chemosphere*, 164: 649-656. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.09.008
- Ammar, T.A., Abid, K.Y., El-Bindary, A.A., El-Sonbati, A.Z. 2014.**  $\text{ClO}_2$  bulk decay prediction in desalinated drinking water. *Desalination*, 352: 45-51. DOI: 10.1016/j.desal.2014.08.010
- Anonim, 2005.** 17 Şubat 2005 tarihli resmi gazetede yayınlanan İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Ankara, <http://mevzuat.gov.tr/>.
- APHA, 2005.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22th ed. American Public Health Association, Washington DC. <http://www.apha.org/>
- Avşar, E., Karadağ, SG, Toröz, I., Hanedar, A, 2017.** İstanbul Ömerli ham suyunda dezenfeksiyon amaçlı klor dioksit kullanımının dezenfeksiyon yan ürün (DYÜ) oluşumuna etkisinin araştırılması. *J. Eng. Sci.*, 23(3): 297-302. DOI: 10.5505/pajes.2016.27132
- Avşar, E., Toröz İ., Hanedar A., Yılmaz M., 2014.** Chemical characterization of natural organic matter and determination of disinfection by-product formation potentials in surface waters of Istanbul (Omerli and Buyukcekmece water dam), Turkey. *Fresenius Environ. Bull.*, 23: 494-501.
- Avşar, E., Toröz İ., Hanedar A., 2015.** Physical characterisation of natural organic matter and determination of disinfection by-product formation potentials in Istanbul surface waters. *Fresenius Environ. Bull.*, 24: 2763-2770.
- Benjamin, M.M., Li, C.W. and Korshin, G.V. 2000.** Use of UV Spectroscopy to characterize the reaction between NOM and free chlorine. *Environ. Sci. Technol.* 34(12): 2570-2575. DOI: 10.1021/es990899o.



- Chang, H.H., Tung, H.H., Chao, C.C., Wang, G.S., 2010.** Occurrence of haloacetic acids(HAAs) and trihalomethanes (THMs) in drinking water of Taiwan. *Environ Monit. Assess.* 162, 237e250. DOI: 10.1007/s10661-009-0792-1
- Chowdhury, S., Alhooshani K., Karanfil, T. 2014.** Disinfection byproducts in swimming pool: occurrences, implications and future needs. *Water Res.* 53: 68-109. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.017.
- Chu, W.-H., Gao, N.-Y., Deng, Y., Templeton, M.R., Yin, D.-Q. 2011.** Formation of nitrogenous disinfection by-products from pre-chloramination. *Chemosphere*, 85: 1187-1191. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.07.011.
- Dickenson, E R V., Summers, R.S., Crou'e, J-P., Gallard, H. 2008.** Haloacetic acid and trihalomethane formation from the chlorination and bromination of aliphatic -Dicarbonyl acidmodel compounds. *Environ. Sci. Technol.*, 42(9): 3226–3233. DOI: 10.1021/es0711866.
- Edzward, J. K., Becker, W. C., Wattier, K. L. 1985.** Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors. *J. Am. Water Work Assoc.* 77(4): 122–132. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1985.tb05521.x
- Elshorbagy, WE., Abu-Qadai, H., Elsheamy, MK. 2000.** Simulation of THM species in water distribution systems. *Water Res* 34:3431–9. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00231-1
- Gan, W., Huang, H., Yang, X., Peng, Z., Chen, G. 2016.** Emerging investigators series: disinfection by-products in mixed chlorine dioxide and chlorine water treatment. *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 2: 838-847. DOI: 10.1039/c6ew00061d.
- Geter, D.R., George, M.H., Moore, T.M., Kilburn, S., Huggins-Clark, G., DeAngelo, A.B. 2004.** Vehicle and mode of administration effects on the induction of aberrant crypt foci in the colons of male F344/N rats exposed to bromodichloromethane. *J. Toxicol. Environ. Health A.*, 67: 23-29. DOI: 10.1080/15287390490253642.
- Gill, TI., Smith, GJ., Wissler, RW., Kunz, HW. 1989.** The rat as experimental animal, *Science*, 254: 269-276. DOI: 10.1126/science.2665079.
- Gordon, G., Slotmaekers, B., Tachiyashiki, S., Delmer, III WW. 1990.** Minimizing chlorite Ion and chlorate ion in water treated with whlorine dioxide. *J. Am. Water.Works. Assoc.*, 82: 160-165. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1990.tb06947.x
- Guary, C., Rodriquez, M. and Serodes, J. 2005.** Using ozonation and chloramination to reduce the formation of trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water, *Desalination*, 176: 229-240. DOI: 10.16/j.desl.2004.10.015.d 10.1016/j.desal.2004.10.015
- Han, J., Zhang, X. 2018.** Evaluating the comparative toxicity of DBP mixtures from different disinfection scenarios: a new approach by combining freeze-drying or rotoevaporation with a marine polychaete bioassay. *Environ. Sci. Technol.*, 52: 10552-10561. DOI:10.1021/acs.est.8b02054.
- Hong, H., Yan, X., Song, X., Qin, Y., Sun, H., Lin, H., Chen, J., Liang, Y. 2017.** Bromine incorporation into five DBP classes upon chlorination of water with extremely low SUVA values. *Sci. Total Environ.* 590 (591): 720-728. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.032.
- Hsu, M., Wu, MY., Huang, T., Liao, CH. 2016.** Efficacy of chlorine dioxide disinfection to non-fermentative gram-negative bacilli and non-tuberculous mycobacteria in a hospital water system. *J.Hosp. Infect.* 93(1): 22-28, 2016. DOI: 10.1016/j.jhin.2016.01.005.
- Linder, K., Lew, J., Carter, B., Brauer, R. 2006.** Avoiding chlorite:chlorine and ClO<sub>2</sub> together to form fewer DBPs. *Opflow*, 32 (8): 24–26. DOI: 10.1002/j.1551-8701.2006.tb01886.x.
- Manasfi, T., De M\_ao, M., Coulomb, B., Di Giorgio, C., Boudenne, J.L. 2016.** Identification of disinfection by-products in freshwater and seawater swimming pools and evaluation of genotoxicity. *Environ. Int.* 88: 94-102. DOI: 10.1016/j.envint.2015.12.028.
- Matilainen, A., Ludqvist, N., Korhonen, S. and Tuhkanen, T. 2002.** Removal of NOM different stages of the water treatment process, *Environ. Int.*, 28: 457-465. DOI: 10.1016/s0160-4120(02)00071-5.
- Özdemir, K., Uyak,V., Toröz, İ. 2014.** Relationship Among Chlorine Dose, Reaction Time and Bromide Ions on Trihalomethane Formation in Drinking Water Sources in Istanbul, Turkey. *Asian. J. Chem.*, 26 (20): 6935-6939. DOI: 10.14233/ajchem.2014.17463.
- Özdemir, K., Uyak,V., Toröz, İ. 2015.** Experimental Investigation of trihalomethane formation and its modeling in drinking waters. *Asian. J. Chem.*, 27 (3): 984-990. DOI: 10.14233/ajchem.2015.17893.
- Özdemir, K. 2016.** The use of carbon nanomaterials for removing natural organic matter in drinking water sources by a combined coagulation process. *Nanomater Nanotechnol.*,6: 1-12. DOI: 10.1177/1847980416663680.
- Pereira, T., Pereira, AO., Costa, JT., Silva, MBO., Schuchard, W., Osaki, SC., Castro, EA., Paulino, RC., Soccol, VT. 2008.** Comparing the efficacy of chlorine, ClO<sub>2</sub>, and ozone in the inactivation of cryptosporidium parvum in water from parana state, southern Brazil. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 151: 464-473. DOI: 10.1007/s12010-008-8214.

- Plewa, M.J., Wagner, ED., Richardson, SD., Thruston Jr, AD., Woo, YT., McKague, AB. 2004. Chemical and biological characterization of newly discovered iodoacid drinking water disinfection byproducts. *Environ. Sci. Technol.*, 38: 4713-4722. DOI: 10.1021/es049971v.
- Ramavandi, B., Farjadfard, S., Ardjmand, M., Dobaradaran, S. 2015. Effect of water quality and operational parameters on trihalomethanes formation potential in Dez River water, Iran. *Water Resour. Ind.* 11: 1-12. DOI: 10.1016/j.wri. 2015.03.002.
- Sadiq, R., Rodriguez, M J. 2004. Disinfectionby-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Sci.Total. Environ.*, 321 (1-3): 21-46. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2003.05.001.
- Satpathy, K.K., Subramanian, S., Padhi, R.K. 2019. Effect of biofouling on the cooling water quality of a nuclear power plant. *Chemosphere*, 218: 540-50. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.11.100.
- Sorlini, S., Gialdini, F., Biasibetti, M., Collivignarelli, C. 2014. Influence of drinking water treatments on chlorine dioxide consumption and chlorite/chlorate formation. *Water Res.* 54: 44-52. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.038.
- Stanford, B.D., Pisarenko, A.N., Snyder, S.A., Gordon, G. 2011. Perchlorate, bromate, and chlorate in hypochlorite solutions: guidelines for utilities. *J. Am. water Work Assoc.* 103: 1-13. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2011.tb11474.x.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 1998. National primary drinking water regulations: disinfectants and disinfection byproducts notice of data availability. Fed. Regist. 63 (61): 15673-15692. <http://www.epa.gov/>.
- USEPA, 2006. National Primary Drinking Water Regulations: Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule (final rule). <http://www.epa.gov/>.
- Uyak, V., Toröz, İ. 2005. Enhanced coagulation of disinfection by-products precursors in a main water supply of Istanbul. *Environ. Technol.*, 26: 261-266. DOI: 10.1080/09593332608618567.
- Uyak, V., Özdemir, K., Toröz, İ. 2007. Seasonal variations of disinfection by-productprecursors profile and their removal through surface water treatment plants. *Sci. Total. Environ.*390: 417-424. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.046.
- Uyak, V., Ozdemir, K., Toroz, İ. 2008. Seasonal variations of disinfection by-product precursors profile and their removal through surface water treatment plants. *Sci.Total. Environ.*, 390: 417-424. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.02.041.
- Uyak, V., Soylu, S., Topal, T., Karapinar, N., Özdemir, K., Özeydin, S., Avsar, E. 2014. Spatial and Seasonal Variations of Disinfection Byproducts (DBPs) in Drinking Water Distribution Systems of Istanbul City, Turkey. *Environ. Forensics.* 15: 190-205. DOI: 10.1080/15275922.2014.890145.
- Wang, J., Hao, Z., Shi, F., Yin, Y., Cao, D., Yao, Z., Liu, J. 2018. Characterization of brominated disinfection byproducts formed during the chlorination of aquaculture seawater. *Environ. Sci. Technol.*, 52, 5662-5670. DOI: 10.1021/acs.est.7b05331.
- WHO (World Health Organization), 2011. Guidelines for drinking-water quality. In: Recommendations fourth ed. Geneva. <http://www.inchem.org/>.
- Yang, Z., Sun, Y.-X., Ye, T., Shi, N., Tang, F., Hu, H.Y., 2017. Characterization of trihalomethane, haloacetic acid, and haloacetonitrile precursors in a seawater reverse osmosis system. *Sci. Total. Environ.* 576: 391-397. DOI: 10. 1016/j.scitotenv.2016.10.139.
- Yoon, Y., Joseph, L., Flora, J.R.V., Saleh, H., Badawy, M., Park, Y.G. 2012. Removal of natural organic matter from potential drinking water sources by combined coagulation and adsorption using carbon nanomaterials. *Sep. Purif. Technol.*, 95: 64-72. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.04.033.
- Yu, H.W., Oh, S.G., Kim, I.S., Pepper, I., Snyder, S., Jang, A. 2015. Formation and speciation of haloacetic acids in seawater desalination using chlorine dioxide as disinfectant. *J. Ind. Eng. Chem.* 26: 193-201. DOI: 10.1016/j.jiec.2014.10.046.
- Zhang, H., Dong, H., Adams, C., Qiang, Z., Luan, G., Wang, L. 2015. Formation and speciation of disinfection byproducts during chlor(am)ination of aquarium seawater. *J. Environ. Sci.* 33: 116-124. DOI: 10.1016/J.JES.2014.11.016.