

## *Chloroform Concentration in Drinking Water of Tehran, 2009*

Ahmadreza Yazdanbakhsh<sup>1</sup>  
Mostafa Leili<sup>2</sup>,  
Mansour Rezazadeh Azari<sup>1</sup>,  
Mohammadreza Masoudinejad<sup>1</sup>,  
Monireh Majlesi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

(Received January 20, 2013 ; Accepted May 28, 2014)

### **Abstract**

**Background and purpose:** Chloroform is a disinfection byproducts (DBPs) that results from reactions between residual chlorine and organic compounds as precursors. The presence of these DBPs in chlorinated drinking water can pose a severe public health threat including potential carcinogenicity. In this study chloroform concentrations as an indicator of DBPs of chlorinated water was evaluated in Tehran's drinking water system.

**Material and Methods:** This study was a cross-sectional study in which the samples were taken from water treatment outlet and from certain points of the water distribution network in different seasons during 2009. The samples were analyzed for presence of chloroform compounds using standard methods. The temperature, pH, and residual chlorine concentration were measured as the most important factors associated with chloroform concentrations.

**Results:** Total average concentrations of chloroform in the water treatment plant outlet and in the distribution network were 11.2 and 36.5 micrograms per liter, respectively. These amounts in distribution network concentrations were almost 3.3 times more than the amount of water treatment outlet concentrations.

**Conclusion:** Evaluation of chloroform concentrations in the water treatment plant outlet and distribution network involving temperature, pH, and chlorine residual indicated a direct correlation between them, which was significant in distribution network system and non-significant in the water treatment plant.

**Keywords:** Chloroform, residual chlorine, disinfection, precursors

## بررسی غلظت کلروفرم در آب شرب تهران در سال ۱۳۸۸

احمد رضا یزدانبخش<sup>۱</sup>

مصطفی لیلی<sup>۲</sup>

منصور رضازاده آذری<sup>۱</sup>

محمد رضا مسعودی نژاد<sup>۱</sup>

منیره مجلسی<sup>۱</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** کلروفرم از محصولات جانبی گندزدایی است که بر اثر واکنش بین کلر باقی مانده در آب با ترکیبات آلی به عنوان پیش ساز آن‌ها تشکیل می‌شود. وجود این محصولات جانبی گندزدایی در آب شرب می‌تواند خطرات بهداشت عمومی از جمله پتانسیل سرطان‌زایی داشته باشد. لذا در این مطالعه غلظت کلروفرم به عنوان شاخص محصولات جانبی گندزدایی با کلر در داخل آب شرب تهران بررسی شد.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه از نوع توصیفی - مقطعی بود که در آن، نمونه‌های مورد نظر از آب خروجی تصفیه‌خانه‌ها و نقاط مشخصی از شبکه توزیع آب در فصول مختلف سال در تهران در سال ۱۳۸۸ برداشت شده و با استفاده از روش‌های استاندارد از نظر وجود ترکیبات کلروفرم مورد آنالیز قرار گرفت. هم‌چنین پارامترهای دما، pH و غلظت کلر باقیمانده به عنوان مهمترین فاکتورهای در ارتباط با غلظت‌های کلروفرم اندازه‌گیری شدند.

**یافته‌ها:** میانگین کل غلظت کلروفرم در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها و شبکه توزیع به ترتیب برابر ۱۱/۲ و ۳۶/۵ میکروگرم در لیتر اندازه‌گیری شد که در شبکه توزیع تقریباً ۳/۳ برابر بیشتر از مقادیر مربوط به آب خروجی از تصفیه‌خانه‌هاست.

**استنتاج:** بررسی غلظت‌های کلروفرم در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها و شبکه توزیع با مقادیر دما، pH و کلر باقی مانده نشان‌دهنده وجود ارتباط مستقیم بین آن‌ها می‌باشد که این ارتباط در شبکه توزیع معنی‌دار بوده در حالی که در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها این ارتباط معنی‌دار نبود. هم‌چنین مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت‌های کلروفرم پائین‌تر از حدود مجاز قرار داشت.

**واژه‌های کلیدی:** کلروفرم، کلر باقی مانده، گندزدایی، پیش‌سازها

### مقدمه

آلاینده‌ها و آلوده شدن منابع آبی موجود و نزول کیفیت آب، این مشکل حادتر و پیچیده‌تر نیز شده است (۱). امروزه منابع آب‌های سطحی به عنوان یکی از منابع تأمین آب شرب در سرتاسر جهان محسوب می‌شود. از طرف دیگر، امروزه این منابع آب معمولاً در معرض

آب یکی از نیازهای اساسی انسان محسوب می‌شود. امروزه با رشد جمعیت و افزایش میزان استحصال آب‌های سطحی و زیرزمینی و از طرفی کاهش نزولات جوی، مشکل کم‌آبی در بیش‌تر نقاط جهان وجود دارد. از طرف دیگر به دلیل ورود انواع

مؤلف مسئول: مصطفی لیلی - همدان: گروه بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان

E-mail: mostafa.leili@gmail

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۳۰ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۲/۱۲/۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۷

WHO گزارش کرده است که THMs بیشترین غلظت DBPs را داراست. EPA نیز گزارش نموده که THMs شامل چهار گروه از ترکیبات شامل کلروفرم، برمودی کلرومتان، دی برم کلرومتان و برموفرم است که کلروفرم ترکیب غالب در بین این ترکیبات بوده و سرطانزایی و اثرات بر بهداشت عمومی آن‌ها به اثبات رسیده است (سراطان‌زاهای گروه 2B). سرطان‌زایی این ترکیبات در غلظت‌های بیش‌تر از  $50 \mu\text{g/L}$  مشاهده شده است. به علاوه این که می‌تواند مشکلات دیگری مثل تولد کودک‌کان ناقص‌الخلقه و همین‌طور کودک‌کان مبتلا به آسم بر اثر تنفس بخارات ترکیبات جانبی گندزدایی را باعث شوند (۵، ۸). WHO مقدار رهنمودی برای کلروفرم در آب آشامیدنی را برابر  $200 \mu\text{g/L}$  بیان کرده است ولی در بیش‌تر کشورها، رهنمودها و استانداردها برای محصولات جانبی گندزدایی بیش‌تر بر اساس مجموع ترکیبات THM (TTHM) می‌باشد که مقدار رهنمودی در این زمینه توسط سازمان حفاظت محیط زیست (U.S. EPA) برابر  $80 \mu\text{g/L}$  تعیین شده است (۹-۱۱).

در زمینه بررسی کیفیت آب و آلودگی آب شرب تحقیقات زیادی در جهان و ایران انجام گرفته است. به عنوان مثال دیانتی تیلکی و همکاران در سال ۱۳۸۹ مطالعه‌ای را در خصوص کیفیت شیمیایی و میکروبی آب آشامیدنی شهرستان سوادکوه انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین غلظت سختی و هدایت الکتریکی در حد مطلوب و قابل قبول بود ولی میزان فلوراید کم‌تر از حد مطلوب بود (۱۲). یوسفی و همکاران در سال ۱۳۹۱ در مطالعه دیگری، تغییرات زمانی و مکانی غلظت نیترات و نیتريت در منابع آب آشامیدنی شهر گچساران را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بررسی کردند. نتایج نشان داد غلظت این ترکیبات کمتر از حد استاندارد ملی و بین‌المللی بوده ولی غلظت این ترکیبات روند افزایشی داشته است (۱۳).

انواع آلاینده‌ها قرار دارند (۲). از مهم‌ترین آلاینده‌های موجود، می‌توان کدورت، ترکیبات آلی طبیعی (NOM)، انواع حشره‌کش‌های استفاده شده در بخش کشاورزی، انواع ترکیبات شیمیایی دفع شده توسط پساب صنایع و ... را نام برد (۳، ۴). برای این که بتوان این نوع آب‌ها را قابل استفاده نمود، لازم است تا در تصفیه‌خانه‌های آب آن‌ها را تصفیه نمود. بسته به نوع ترکیبات موجود، نوع روش تصفیه‌ای مورد نیاز نیز متفاوت خواهد بود. یکی از فرایندهای تصفیه‌ای که لازم است در تمام تصفیه‌خانه‌های آب‌های سطحی طراحی و استفاده شود، گندزدایی است که به عنوان مهم‌ترین نگرانی در قرن ۲۰ محسوب می‌شود (۲، ۴). کلر و ترکیبات مختلف آن به عنوان رایج‌ترین ترکیب گندزدایی آب شرب و نیز آب استخرهای شنا است که در طول ۱۰۰ سال گذشته به علت هزینه‌های مورد نیاز پائین و سایر امتیازها مثل ماندگاری بیش‌تر نسبت به دیگر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته و باعث شده است کاهش چشم‌گیری در میزان ابتلاء به انواع بیماری‌های منتقله از طریق آب و همین‌طور میزان مرگ و میر اتفاق بیفتد (۶-۳). هرچند که استفاده از کلر به عنوان یک اکسیدکننده و نابودکننده میکروارگانیسم‌ها دارای مزایای زیادی است ولی استفاده از آن دارای معایبی نیز می‌باشد. یکی از مهم‌ترین معایبی که کلر دارد تشکیل محصولات جانبی گندزدایی (DBPs) مثل تری‌هالومتان‌ها (THMs) (که کلروفرم مهم‌ترین ترکیب در بین THMs محسوب می‌شود) و هالواستیک اسیدها (HAAs) است که بر اثر ترکیب و واکنش کلر و ترکیبات آن با پیش‌سازهای موجود در آب‌های سطحی و زیرزمینی یعنی ترکیبات آلی (NOM) حادث می‌شود (۶). مواد آلی طبیعی موجود در این بدنه‌های آبی ترکیب پیچیده‌ای از انواع اسیدهای هیومیک و فولویک، پروتئین‌ها، چربی‌ها، هیدروکربن‌ها و آمینواسیدها می‌باشد (۷).

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش سطح ویژه کربن فعال، کارایی جذب آن افزایش پیدا کرده ولی با افزایش اندازه منافذ، راندمان حذف کلروفرم توسط کربن فعال کاهش پیدا می‌کند (۱۷).

با توجه به مقدمه ذکر شده، هدف از انجام این مطالعه، بررسی غلظت کلروفرم پس از فرآیندهای تصفیه‌ای و گندزدایی و در خروجی تصفیه‌خانه‌های آب و نیز در شبکه توزیع آب تهران می‌باشد. ضمناً از آنجایی که کلروفرم جزء غالب‌ترین محصولات جانبی گندزدایی می‌باشد که بر اثر کلرزنی آب حاصل می‌شود (۱۴، ۱۸، ۱۹)، بنابراین به عنوان شاخص محصولات جانبی گندزدایی جهت اندازه‌گیری در این مطالعه انتخاب شد.

## مواد و روش‌ها

این مطالعه از نوع توصیفی - مقطعی می‌باشد. تمام ترکیبات شیمیایی مورد استفاده در مطالعه با درجه تجاری بوده و محلول‌های مورد نظر نیز با استفاده از آب دیوار تقطیر ساخته شد. نمونه‌ها از نقاط مورد نظر و از پیش تعیین شده برداشت شده و در شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل و مورد آنالیز قرار گرفتند. جامعه آماری در این مطالعه، نمونه‌های برداشت شده از چهار تصفیه‌خانه آب تهران و نیز شبکه توزیع آب بود. تعداد نمونه در فصل‌های تابستان، پاییز و زمستان با توجه به مساحت شهر و نیز بر اساس فرمول  $S = \pm 40, n = \left(\frac{ZS}{d}\right)^2$ ،  $d=10$ ،  $Z=1/96$ ، برای شبکه توزیع حدود ۶۰ نمونه و برای خروجی تصفیه‌خانه‌ها مجموعاً ۳۶ نمونه برآورد گردید. با توجه به گستردگی شبکه توزیع آب در تهران بزرگ و برای تحت پوشش قرار دادن تمام شبکه، در این طرح بر طبق الگوی تقسیم‌بندی شرکت آب و فاضلاب تهران، محل‌های مناسب جهت نمونه‌برداری به طور تصادفی از مرکز، جنوب، شمال، غرب و شرق تهران تعیین گردید. نقاط نمونه‌برداری در شبکه توزیع در هر سه فصل یکسان در نظر گرفته شد. در هر فصل از

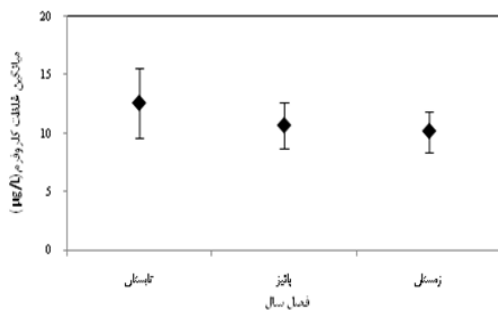
مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی پتانسیل تشکیل DBPs و THMs و نیز روش‌های حذف و جلوگیری از تشکیل آن‌ها در بیش‌تر نقاط دنیا انجام گرفته است. Furlong و همکاران در سال ۱۹۸۶، میزان THMs تشکیل شده در آب شرب کلرزنی شده در میشیگان آمریکا را بررسی کردند و بالا بودن غلظت برخی از این ترکیبات از مقادیر استاندارد را نشان داد (۱۴).

Mouly و همکاران در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ تغییرات غلظت تری‌هالومتان‌ها در شبکه توزیع در فرانسه را مورد مطالعه قرار دادند و بیان داشتند که غلظت این ترکیبات با فاکتور ۱/۱ تا ۵/۷ از محل تصفیه تا نقطه نمونه‌برداری در شبکه توزیع روند افزایشی دارد (۸). نتایج تحقیقی که توسط Ivancev-Tumbas و همکاران در سال ۱۹۹۹ در زمینه تأثیر فرایندهای مختلف تصفیه آب آشامیدنی بر میزان تشکیل کلروفرم در نتیجه واکنش هیپوکلریت با ترکیبات آلی انجام شد، نشان داد که استفاده از فرایندهای انعقاد و لخته‌سازی با ترکیبات مختلف، صاف‌سازی آب خام با استفاده از ستون‌های جاذب کربن فعال (GAC) و همچنین ستون‌های پر شده با رزین‌ها همگی باعث کاهش میزان تشکیل کلروفرم می‌شوند (۱۵). Chu و همکاران در سال ۲۰۰۹، پتانسیل تشکیل کلروفرم در تصفیه آبهای حاوی آلانین را مورد بررسی قرار دادند. آلانین از ترکیبات آلی نیتروژنه و جزء مهم‌ترین پیش‌سازهای محصولات جانبی گندزدایی محسوب می‌شود که در منابع آب می‌تواند وجود داشته باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که بیش‌ترین پتانسیل تشکیل کلروفرم در شرایط قلیایی ضعیف بوده ( $pH=8$ )، در حالی که تحت شرایط  $pH$  خنثی تا اسیدی ( $pH=4-7$ )، تشکیل کلروفرم تقریباً متوقف می‌شود. ضمن این که نسبت مولی  $Cl/N$  نیز بر نرخ تشکیل کلروفرم تأثیر زیادی دارد (۱۶). Ikuo Abe و همکاران در سال ۲۰۰۱ مطالعه‌ای را در زمینه تهیه جاذب‌های کربنه از مواد خام طبیعی مثل بامبو، نارگیل و جهت حذف کلروفرم از آب آشامیدنی انجام دادند.

در در فصل تابستان نسبت به پاییز و زمستان در آب اندازه گیری شده است. در این مطالعه، با انجام آزمون همبستگی پیرسون ارتباط ضعیفی ( $r = 0/259$ ) بین کلر باقی مانده و غلظت های کلروفورم تشکیل شده در نقطه تصفیه مشاهده شد که این ارتباط معنی دار نبود ( $p = 0/371$ ).

جدول شماره ۱: میانگین غلظت کلروفورم، دما، pH و کلر باقیمانده در آب خروجی از تصفیه خانه ها در فصول تابستان، پاییز و زمستان

نام تصفیه خانه	فصل	دما (°C)	pH	کلر باقی مانده (mg/L)	کلروفورم (µg/L)
جلالیه	تابستان	۱۹/۷	۷/۷	۰/۹	۱۴/۳
	پاییز	۱۷/۷	۷/۶	۰/۹	۱۲
	زمستان	۱۷/۳	۷/۷	۰/۸	۱۱/۳
کن	تابستان	۱۹	۷/۸	۰/۸	۱۰
	پاییز	۱۷/۷	۷/۷	۰/۸	۱۰/۷
	زمستان	۱۷	۷/۸	۰/۹	۹/۳
تهرانپارس ۳	تابستان	۱۹	۷/۶	۰/۹	۱۳
	پاییز	۱۸/۷	۷/۷	۰/۹	۱۰
	زمستان	۱۷/۳	۷/۸	۰/۸	۱۰
تهرانپارس ۴	تابستان	۱۹/۷	۷/۶	۰/۹	۱۳
	پاییز	۱۷	۷/۷	۰/۹	۱۰
	زمستان	۱۶/۷	۷/۸	۰/۸	۱۰



نمودار شماره ۱: تغییرات میانگین غلظت کلروفورم در فصول مختلف در آب خروجی تصفیه خانه ها

از طرف دیگر، همان طور که در جدول مشاهده می شود میانگین حداقل و حداکثر غلظت کلروفورم در نمونه های آب خروجی از تصفیه خانه های آب تهران به ترتیب ۹/۳ و ۱۴/۳ میکروگرم در لیتر اندازه گیری شد که مربوط به تصفیه خانه های جلالیه و کن می باشد. کم ترین و بیش ترین مقدار کلروفورم نیز برابر ۵ و ۱۷ میکروگرم در لیتر اندازه گیری شد. میانگین کل غلظت کلروفورم در مجموع تصفیه خانه های بررسی شده نیز برابر

هر نقطه ۴ نمونه و مجموعاً ۱۲ نمونه در هر فصل برای هر کدام از مناطق با فواصل زمانی حدود ۱۰ روز برداشت شد.

نمونه برداری از آب جهت انجام آزمایش غلظت های کلروفورم بر اساس روش B6010 که در کتاب روش های استاندارد آزمایش های آب و فاضلاب (۲۰) ارائه شده است، انجام گرفت. آزمایش های انجام شده روی نمونه های آب برداشت شده از شبکه توزیع و خروجی از تصفیه خانه های آب شامل تعیین دما، pH، غلظت کلر باقی مانده و غلظت کلروفورم بوده است. تعیین دما و کلر باقی مانده بر روی نمونه های برداشت شده در محل انجام شده است. برای تعیین دما از دماسنج جیوه ای، برای تعیین غلظت کلر باقیمانده از کیت کلر سنج با معرف DPD و برای تعیین pH در آزمایشگاه از دستگاه pH متر دارای الکتروود استفاده شد. برای استخراج نمونه ها و تعیین غلظت کلروفورم از دستگاه GC با آشکارساز ریزایش الکترون (ECD) طبق روش استاندارد استفاده شد که جزء روش استاندارد معرفی شده در کتاب روش های استاندارد برای آزمایش های آب و فاضلاب و روش های بیان شده در سایر متون می باشد (۲۰، ۲۱). برای تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزارهای SPSS و Excel استفاده شد (۲۲).

## یافته ها

میانگین مقادیر پارامترهای اندازه گیری شده برای فصول تابستان، پاییز و زمستان برای تصفیه خانه های مورد بررسی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. همان گونه که در جدول قابل مشاهده است غلظت کلروفورم در هر سه فصل اندازه گیری شده، برای تصفیه خانه جلالیه نسبت به دو تصفیه خانه دیگر بیش تر است.

بالاتر بودن میانگین غلظت کلروفورم در فصل تابستان در مقایسه با فصول دیگر در نمودار شماره ۱ قابل مشاهده است. در مورد کلر باقی مانده نیز این روند مشاهده می شود و غلظت های بیشتری از کلر باقی مانده

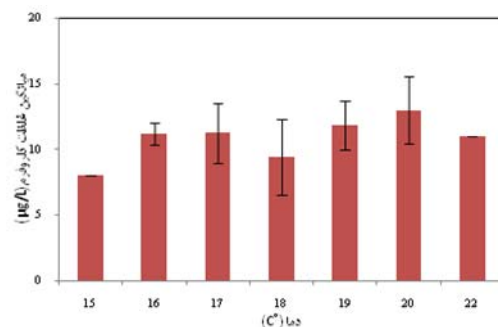
جدول شماره ۲: میانگین غلظت کلروفروم، دما، pH و کلر باقیمانده در آب خروجی از شبکه توزیع در فصول تابستان، پاییز و زمستان

کلو فرم (µg/L)	کلر باقیمانده (mg/L)	pH	دما (°C)	فصل	ناحیه برداشت نمونه
۴۱	۰/۶	۷/۶	۱۹/۳	تابستان	شمال
۳۴	۰/۴	۷/۶	۱۵/۸	پاییز	
۳۱	۰/۶	۷/۷	۱۶/۳	زمستان	
۴۳	۰/۵	۷/۶	۱۹/۳	تابستان	جنوب
۳۹/۵	۰/۵	۷/۶	۱۶/۳	پاییز	
۳۲	۰/۶	۷/۴	۱۴/۳	زمستان	
۴۰/۳	۰/۶	۷/۶	۱۹	تابستان	مرکز
۲۸/۵	۰/۵	۷/۳	۱۶/۸	پاییز	
۳۰	۰/۵	۷/۴	۱۵/۵	زمستان	
۴۵	۰/۷	۷/۸	۱۹/۵	تابستان	شرق
۳۵/۵	۰/۶	۷/۷	۱۶/۵	پاییز	
۲۶/۳	۰/۵	۷/۴	۱۴/۵	زمستان	
۴۹	۰/۷	۷/۸	۱۹/۵	تابستان	غرب
۴۰/۸	۰/۷	۷/۶	۱۸	پاییز	
۳۲	۰/۷	۷/۵	۱۷/۵	زمستان	

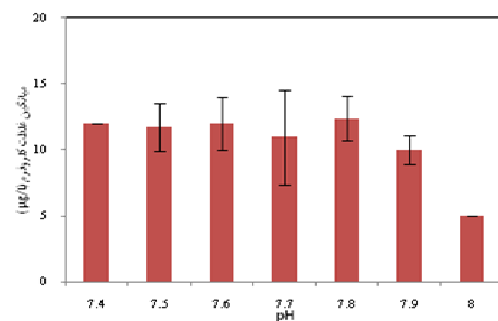
تغییرات میانگین غلظت کلروفروم در نقاط مختلف شبکه توزیع در فصول مختلف نیز در نمودار شماره ۵ نشان داده شده است. نکته قابل توجه بالاتر بودن میانگین غلظت کلروفروم در شبکه توزیع (۳۶/۵ µg/L) در مقایسه با آب خروجی از تصفیه‌خانه‌هاست (۱۱/۱۴ µg/L). همین طور میانگین غلظت کلروفروم در فصل تابستان (۴۳/۷ µg/L) در مقایسه با فصل پاییز (۳۵/۶ µg/L) و زمستان (۳۰/۲ µg/L) بیش تر است، این روند در تمام نقاط شبکه توزیع نیز صادق است یعنی به جز در ناحیه مرکزی که در آن میانگین غلظت کلروفروم در فصل پاییز در مقایسه با زمستان اندکی کم تر است (نمودار شماره ۵)، در بقیه موارد میانگین غلظت‌ها از فصل تابستان به سمت زمستان روند نزولی دارد. ارتباط بین میانگین غلظت کلروفروم و دما و مقدار کلر باقی‌مانده در نمودار شماره ۶ نشان داده شده است. با انجام آزمون همبستگی پیرسون، ارتباط مستقیمی بین افزایش دما و افزایش غلظت کلروفروم ( $r = 0/564$ )، مشاهده شد. ارتباط بین pH و میانگین غلظت کلروفروم در شبکه توزیع نیز بررسی شد که نتایج آن در نمودار شماره ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کلروفروم اندازه‌گیری شده در کل شبکه توزیع آب مناطق تحت پوشش به ترتیب برابر ۶۸ و ۱۸ میکروگرم بر لیتر

۱۱/۲ میکروگرم در لیتر اندازه‌گیری شد. تغییرات غلظت کلروفروم در برابر دما، pH و کلر باقی‌مانده نیز به ترتیب در نمودارهای شماره ۲ تا ۴ نمایش داده شده است.

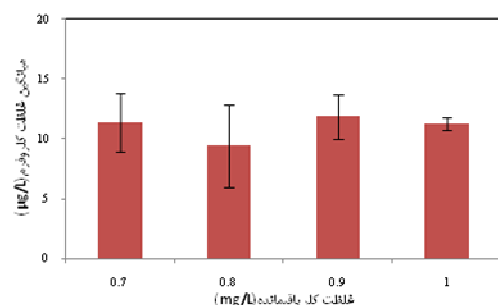
نتایج مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر (شامل غلظت کلروفروم، دما، pH و کلر باقی‌مانده) بر روی نمونه‌های آب برداشت شده از شبکه توزیع در فصول تابستان، پاییز و زمستان در جدول شماره ۲ ارائه شده است.



نمودار شماره ۲: نمودار تغییرات غلظت کلروفروم در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها در برابر دما



نمودار شماره ۳: نمودار تغییرات غلظت کلروفروم در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها در برابر pH

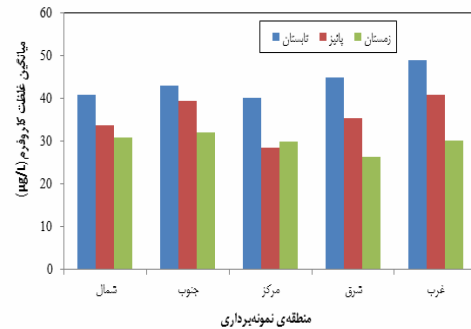


نمودار شماره ۴: نمودار تغییرات غلظت کلروفروم در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها در برابر کلر باقی‌مانده

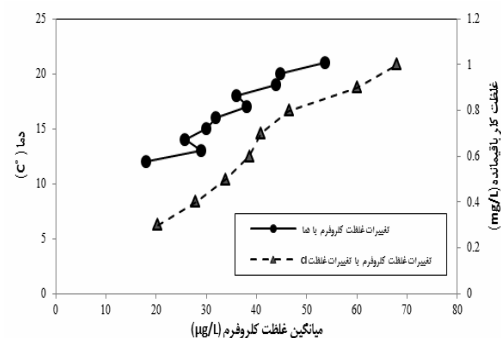
کلروفورم محسوب می‌شوند (۲۳، ۲۴). همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، وجود کلروفورم در آب باعث ایجاد مشکلات بهداشتی عدیده‌ای خواهد شد. به عنوان مثال، Mietinen و همکاران نشان دادند که بین غلظت‌های کلروفورم و خاصیت جهش‌زایی آب ارتباط مستقیم ( $r = 0.55$ ،  $p < 0.01$ ) وجود دارد (۲۵).

در تصفیه‌خانه‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند از کلر به منظور گندزدایی و جلوگیری از رشد مجدد میکروارگانیسم‌ها در شبکه توزیع استفاده می‌شود. بنابراین در صورت وجود پیش‌سازها، ترکیبات جانبی گندزدایی از جمله کلروفورم‌ها تشکیل خواهند شد. ولی از آن‌جا که جهت انجام واکنش‌های مورد نظر نیاز به زمان تماس است لذا کلر باقی‌مانده در خروجی تصفیه‌خانه نمی‌تواند در تشکیل کلروفورم نقش زیادی داشته باشد که مقایسه میانگین غلظت‌های اندازه‌گیری شده در خروجی تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه و در شبکه توزیع نیز مؤید این مطلب است. در این مطالعه، با انجام آزمون همبستگی پیرسون ارتباط ضعیفی ( $r = 0.259$ ) بین کلر باقی‌مانده و غلظت‌های کلروفورم تشکیل شده در نقطه تصفیه مشاهده شد که این ارتباط معنی‌دار نبود ( $p = 0.371$ ). این روند در مطالعه El-Shafy و همکاران نیز مشاهده شد که در آن تنها ۴۵ درصد از کل ترکیبات جانبی گندزدایی تولید شده در انتهای شبکه توزیع در محل تصفیه‌خانه اندازه‌گیری شد و در یکی از تصفیه‌خانه‌های بررسی شده در این مطالعه، تشکیل THMs، ۷ ساعت پس از تزریق کلر اتفاق افتاد که در آن کلروفورم حدود ۸۲ درصد از THMs را تشکیل می‌داد و بین زمان تماس و تشکیل کلروفورم ارتباط مستقیم قوی ( $r = 0.91$ ) مشاهده شد (۱۸). در مطالعه‌ای که Ivancev-Tumbas و همکاران در سال ۱۹۹۹ انجام دادند نیز مشاهده شد که هر چه زمان واکنش بین کلر با ترکیبات موجود در آب بیشتر باشد پتانسیل تشکیل کلروفورم در آب نیز بیشتر خواهد بود (۱۵). در مورد ارتباط pH نیز ثابت شده است که افزایش pH باعث

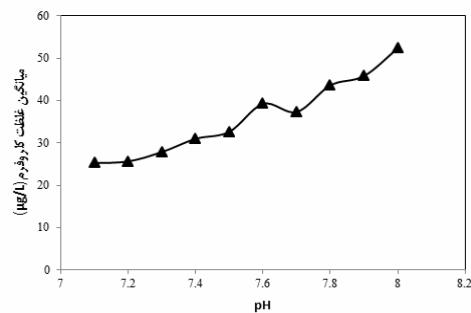
اندازه‌گیری شد. میانگین کل غلظت کلروفورم در شبکه توزیع نیز برابر ۳۶/۵ میکروگرم بر لیتر اندازه‌گیری شد که تقریباً ۳/۳ برابر بیش‌تر از مقادیر مربوط به آب خروجی از تصفیه‌خانه‌هاست.



نمودار شماره ۵: نمودار نشان‌دهنده تغییرات میانگین غلظت کلروفورم در نقاط مختلف شبکه توزیع در فصول مختلف



نمودار شماره ۶: ارتباط بین تغییرات غلظت کلروفورم باقیمانده با دما و کلر باقی‌مانده



نمودار شماره ۷: ارتباط بین تغییرات غلظت کلروفورم باقیمانده با pH

## بحث

طبق مطالعات انجام گرفته، pH، دما، زمان تماس و دوزاژ کلر جزء مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در تشکیل

افزایش پتانسیل تشکیل محصولات جانبی گندزدایی می شود ولی در این جا نیز جهت این افزایش، نیاز به داشتن زمان تماس کافی است که معمولاً در مخازن ذخیره پس از کلرزنی و در شبکه توزیع این پتانسیل به فعل رسیده و منجر به افزایش های غلظت کلروفرم می شود (۲۳، ۱۸).

دما یکی از فاکتورهای مهم در انجام واکنش های شیمیایی محسوب می شود که باعث تسریع فرایندها می شود (۶، ۲۶، ۲۷). در مورد کلر نیز افزایش دما منجر به افزایش سرعت تجزیه آن شده و در نتیجه واکنش هایی که کلر در آن ها شرکت دارد از جمله تشکیل کلروفرم با افزایش دما می تواند تسریع شده (۱۸، ۲۸، ۲۹) و بنابراین باعث وجود غلظت های بالایی از آن خواهد شد. با انجام آزمون همبستگی پیرسون، ارتباط مستقیمی بین افزایش دما و افزایش غلظت کلروفرم ( $r = 0/564$ ،  $p = 0/093$ ) مشاهده شد. بالا بودن میانگین غلظت های اندازه گیری شده کلروفرم در تابستان ( $12/6 \mu\text{g/L}$ ) در مقایسه با پاییز ( $10/7 \mu\text{g/L}$ ) و زمستان ( $10/2 \mu\text{g/L}$ ) نیز می تواند بر اساس همین یافته ها توجیه شود. در مطالعه Garcia-Villanova و همکاران نیز مشاهده شد که افزایش pH و دما به عنوان مهم ترین پارامترهایی هستند که در تشکیل کلروفرم سهم دارند به طوری که ارتباط معنی دار ( $p < 0/0001$ ) بین افزایش دما و pH و افزایش غلظت های کلروفرم وجود داشت (۲۴). در مطالعه Rodriguez و همکاران نیز روند مشابهی مشاهده شد که در آن دما تأثیر بیش تری در تشکیل کلروفرم در شبکه توزیع در مقایسه با تصفیه خانه و مراحل ابتدایی ورود آب تصفیه به شبکه توزیع داشت (۲۳) که یافته های این مطالعه نیز با آن هم خوانی دارد.

با توجه به نمودار شماره ۵ با افزایش دمای آب، میانگین غلظت کلروفرم نیز افزایش پیدا می کند. به عنوان نمونه، با افزایش دما از  $12^\circ\text{C}$  به  $21^\circ\text{C}$ ، غلظت کلروفرم از  $18 \mu\text{g/L}$  به حدود  $54 \mu\text{g/L}$  افزایش پیدا می کند. با انجام آزمون همبستگی پیرسون، ارتباط

معنی دار ( $p < 0/01$ ) و قوی بین دما و غلظت های کلروفرم ( $r = 0/962$ ) مشاهده شد. بیش تر مطالعاتی هم که انجام گرفته اند نشان داده اند که بین دما و افزایش تشکیل کلروفرم همبستگی وجود دارد که دلیل آن هم تأثیر دما بر سرعت واکنش ها یا به عبارتی افزایش سرعت واکنش های شیمیایی می باشد که در مورد واکنش کلر با پیش سازها نیز این واکنش های شیمیایی اتفاق می افتد (۲۶، ۳۰، ۳۱). مطالعه ای که Knocke و همکاران انجام دادند نیز نشان داد که سرعت تشکیل کلروفرم در دمای  $2^\circ\text{C}$  معمولاً ۶۰ تا ۷۰ درصد کم تر از سرعت های مربوط به دمای  $22^\circ\text{C}$  است (۲۹). به علاوه این که افزایش دما باعث افزایش سرعت تجزیه کلر می شود در نتیجه باید از دوزهای کلر بیش تری جهت اطمینان از داشتن سطح قابل قبول گندزدای کلر باقی مانده استفاده کرد که خود شرایط را جهت تولید محصولات جانبی گندزدایی مساعدتر می کند که در ادامه توضیح بیش تری در این زمینه ارائه شده است. روند تغییرات نشان داده شده در نمودار شماره ۱ و جدول شماره ۲ که در آن میانگین غلظت های کلروفرم در فصل تابستان تقریباً  $1/43$  برابر زمستان و  $1/22$  برابر پاییز است بر اساس توضیحاتی که در این جا ارائه شد می تواند توجیه شود که با نتایج مطالعات دیگر هم خوانی دارد (۲۴، ۲۸، ۳۲). نکته دیگری که در نمودار شماره ۶ قابل مشاهده است افزایش غلظت کلروفرم با افزایش میزان باقی مانده کلر است. به عنوان نمونه، غلظت کلروفرم در دوز کلر باقی مانده  $0/3 \text{ mg/L}$  برابر  $20/3 \mu\text{g/L}$  بوده ولی با افزایش دوز کلر باقی مانده به  $1 \text{ mg/L}$  غلظت کلروفرم به  $68 \mu\text{g/L}$  افزایش پیدا کرد. در این جا نیز همبستگی این دو پارامتر با استفاده از آزمون پیرسون بررسی شد و علاوه بر معنی دار بودن ارتباط ( $p < 0/01$ )، ارتباط بسیار قوی بین آن ها ( $r = 0/981$ ) مشاهده شد که در مطالعات دیگر نیز وجود این ارتباط تأیید شده است (۲۶، ۳۳). برای توضیح مطلب این گونه می توان اظهار داشت که افزودن کلر به آب منجر به تشکیل اسید هیپوکلروس ( $\text{HOCl}$ ) و



در مطالعه Chu و همکاران نیز این روند مشاهده شد که با افزایش pH، غلظت کلروفورم نیز افزایش پیدا می‌کند و دلیل آن، وجود گونه‌های مختلف کلر فعال در pH های مختلف بیان شد که در pH پائین HOCl که گونه فعالتر کلر می‌باشد، غالب بوده و بنابراین واکنش‌های بیش‌تری اتفاق افتاده و غلظت‌های بیش‌تری از کلروفورم نیز تشکیل خواهد شد (۱۶). pH به عنوان مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار بر تشکیل کلروفورم شناخته شده است زیرا با افزایش pH غلظت یون‌های OH در محلول نیز افزایش پیدا کرده و از طرفی میزان انحلال اسیدهای هیومیک که به عنوان پیش‌سازهای کلروفورم‌ها محسوب می‌شوند نیز افزایش پیدا کرده و بنابراین پتانسیل تشکیل محصولات جانبی گندزدایی از جمله کلروفورم افزایش پیدا می‌کند (۳۸).

رهنمود سازمان جهانی بهداشت (WHO) برای کلروفورم برابر  $200 \mu\text{g/L}$  بوده (۱۱) و استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) برای THMs برابر  $80 \mu\text{g/L}$  تعیین شده است. بنابراین با مقایسه حداکثر غلظت‌های مشاهده شده در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها ( $17 \mu\text{g/L}$ ) و شبکه توزیع ( $68 \mu\text{g/L}$ )، خوشبختانه مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری شده برای کلروفورم از حدود مجاز فراتر نرفته است.

یون‌های هیپوکلریت ( $\text{OCl}^-$ ) می‌شود که نسبت تولید آن‌ها به pH محیط بستگی داشته و در pH اسیدی، HOCl غالب بوده در حالی که در pH قلیایی  $\text{OCl}^-$  بیش‌تر خواهد بود (۳۴). با توجه به این که در این مطالعه محدوده pH بین  $7/1$  تا  $8$  اندازه‌گیری شد بنابراین pH جهت تشکیل یون‌های HOCl مطلوب‌تر است که متعاقباً مسئول تشکیل کلروفورم خواهد بود (۱۶). با افزایش میزان تولید کلروفورم، یون‌های HOCl و  $\text{OCl}^-$  کاهش پیدا می‌کند که خود جزء کلر باقیمانده محسوب می‌شود. نتایج این مطالعه با دیگر مطالعات انجام شده نیز مطابقت دارد (۳۵، ۳۶). نکته دیگر آن که در این‌جا نیز افزایش دوزاژ کلر باقی‌مانده با افزایش دما باعث افزایش تولید کلروفورم می‌شود زیرا بین این دو پارامتر نیز همبستگی بسیار قوی ( $r = 0/99$ ) و معنی‌داری ( $0/01 < P$ ) وجود دارد. خاطر نشان می‌شود بر پایه همین یافته‌ها، گاهی دوزاژ کلر مورد نیاز بر اساس دمای آب تنظیم می‌شود (۲۹).

تغییرات غلظت کلروفورم با pH نیز در این مطالعه بررسی شد و همان‌طور که در نمودار شماره ۷ نشان داده شد، با افزایش pH روند تغییرات غلظت کلروفورم نیز به صورت افزایشی است. این روند افزایشی در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده است (۳۷).

## References

1. Sentana I, Rodríguez M, Sentana E, M'Birek C, Prats D. Reduction of disinfection by-products in natural waters using nanofiltration membranes. *Desalination* 2010; 250(2): 702-706.
2. Sarkar B, Venkateswralu N, Rao RN, Bhattacharjee C, Kale V. Treatment of pesticide contaminated surface water for production of potable water by a coagulation-adsorption- nanofiltration approach. *Desalination* 2007; 212(1-3):129-140.
3. Viana RB, Cavalcante RM, Braga FM, Viana AB, de Araujo JC, Nascimento RF, et al. Risk assessment of trihalomethanes from tap water in Fortaleza, Brazil. *Environ Monit Assess.* 2009; 151(1-4): 317-325. PMID: 18365760.
4. Wang W, Ye B, Yang L, Li Y, Wang Y. Risk assessment on disinfection by-products of drinking water of different water sources and disinfection processes. *Environ Int.* 2007; 33(2): 219-225. PMID:17056115.

5. Panyakapo M, Soontoranchai S, Paopuree P. Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water. *J Environ Sci (China)*. 2008; 20(3): 372-378. PMID: 18595407.
6. Mosteo R, Miguel N, Martin-Muniesa S, Ormad MP, Ovelheiro JL. Evaluation of trihalomethane formation potential in function of oxidation processes used during the drinking water production process. *J Hazard Mater*. 2009; 172(2-3): 661-666. PMID: 19695773.
7. Moncayo-Lasso A, Pulgarin C, Benitez N. Degradation of DBP's precursors in river water before and after slow sand filtration by photo-Fenton process at pH 5 in a solar CPC reactor. *Water Res*. 2008; 42(15): 4125-4132. PMID: 18718626.
8. Mouly D, Joulin E, Rosin C, Beaudeau P, Zeghnoun A, Olszewski-Ortar A, et al. Variations in trihalomethane levels in three French water distribution systems and the development of a predictive model. *Water Res*. 2010; 44(18): 5168-5179. PMID: 20663536.
9. EPA. US, Environmental Protection Agency. National Primary Drinking Water Regulations: Stage 2 Disinfectants and Disinfection By-products (DBP rule). Federal Register: Washington, DC: 2006. p. 387-493.
10. Gopal K, Tripathy SS, Bersillon JL, Dubey SP. Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. *J Hazard Mater*. 2007; 140(1-2): 1-6. PMID: 17129670
11. World Health Organization (WHO), Guidelines for Drinking-Water Quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2011, p. 564.
12. Dianati Tilaki R, Rasouli Z. Reviewing the Chemical Quality (Nitrate, Fluoride, Hardness, Electrical Conductivity) and Bacteriological Assessment of Drinking Water in Svadkooh, Iran, during 2010-2011. *J Mazandaran Univ Med Sci*. 2013; 23(104): 51-5 (Persian).
13. Yousefi Z, BarafrashtehPour M, Taghavi M, MashayekhSalehi A, Sedaghat F. Survey on Temporal and spatial variation of nitrate and nitrite in drinking water of Gachsaran by using Geographic Information System (GIS). *J Mazandaran Univ Med Sci*. 2013; 22(2): 158-162. (Persian).
14. Furlong Eileen AN, D'Itri FM. Trihalomethane levels in chlorinated Michigan drinking water. *Ecol Model*. 1986; 32(1-3): 215-225.
15. Ivancev-Tumbas I, Dalmacija B, Tamas Z, Karlovic E. The effect of different drinking water treatment processes on the rate of chloroform formation in the reactions of natural organic matter with hypochlorite. *Water Res*. 1999; 33(18): 3715-3722.
16. Chu WH, Gao NY, Deng Y, Dong BZ. Formation of chloroform during chlorination of alanine in drinking water. *Chemosphere*. 2009; 77(10): 1346-1351. PMID: 19822347.
17. Cimetiere N, Dossier-Berne F, De Laat J. Effect of some parameters on the formation of chloroform during chloramination of aqueous solutions of resorcinol. *Water Res*. 2010; 44(15): 4497-4504. PMID: 20591462.
18. El-Shafy MA, Grünwald A. THM formation in water supply in South Bohemia, Czech republic. *Water Res*. 2000; 34(13): 3453-3459.
19. Ossenbruggen PJ, Gaudard M, Collins MR. Predicting THM concentration in treated water with highly correlated data. *Math Comp Model*. 1988; 11:1073-1076.

20. Eaton AD. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21<sup>st</sup> ed. Washington, D.C.: American public health association, 2005.
21. Chiang PC, Chang EE, Chang PC, Huang CP. Effects of pre-ozonation on the removal of THM precursors by coagulation. *Sci Total Environ.* 2009; 407(21): 5735-5742. PMID: 19674771.
22. Norusis M. SPSS 16.0 guide to data analysis. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall Press; 2008.
23. Rodriguez MJ, Sérodes JB. Spatial and temporal evolution of trihalomethanes in three water distribution systems. *Water Res.* 2001; 35(6): 1572-1586.
24. Garcia-Villanova RJ, Garcia C, Gomez JA, Garcia MP, Ardanuy R. Formation, evolution and modeling of trihalomethanes in the drinking water of a town: II. In the distribution system. *Water Research.* 1997; 31(6): 1405-1413.
25. Miettinen IT, Martikainen PJ, Vartiainen T. Mutagenicity and amount of chloroform after chlorination of bank filtered lake water. *Sci Total Environ.* 1998; 215(1-2): 9-17. PMID: 9599453.
26. Toroz I, Uyak V. Seasonal variations of trihalomethanes (THMs) in water distribution networks of Istanbul City. *Desalination* 2005; 176(1-3): 127-41.
27. Adin A, Katzhendler J, Alkaslassy D, Rav-Acha Ch. Trihalomethane formation in chlorinated drinking water: A kinetic model. *Water Research* 1991; 25(7): 797-805.
28. Abdullah MP, Yew CH, Ramli MSb. Formation, modeling and validation of trihalomethanes (THM) in Malaysian drinking water: a case study in the districts of Tampin, Negeri Sembilan and Sabak Bernam, Selangor, Malaysia. *Water Res.* 2003; 37(19): 4637-4644. PMID: 14568050.
29. Knocke WR, West S, Hoehn RC. Effect of low temperature on the removal of trihalomethane precursors by coagulation. *J American Water Works Association (Journal AWWA)* 1986; 78(4): 189-195.
30. Milot J, Rodriguez MJ, Serodes JB. Modeling the susceptibility of drinking water utilities to form high concentrations of trihalomethanes. *J environ manage.* 2000; 60(2): 155-171.
31. Sohn J, Gatel D, Amy G. Monitoring and modeling of disinfection by-products (DBPs). *Environ Monit Assess.* 2001; 70 (1-2): 211-222. PMID: 11516016.
32. Aydin E, Yaman FB, Ates Genceli E, Topuz E, Erdim E, Gurel M, et al. Occurrence of THM and NDMA precursors in a watershed: Effect of seasons and anthropogenic pollution. *J Hazard Mater.* 2012; 221-222: 86-91. PMID: 22542776.
33. Wei QS, Feng CH, Wang DS, Shi BY, Zhang LT, Wei Q, et al. Seasonal variations of chemical and physical characteristics of dissolved organic matter and trihalomethane precursors in a reservoir: a case study. *J Hazard Mater.* 2008; 150(2): 257-264. PMID: 17560713.
34. White GC. White's handbook of chlorination and alternative disinfectants. 5<sup>th</sup> ed. New Jersey: Wiley; 2010.
35. Garcia-Villanova RJ, Garcia C, Gomez JA, Garcia MP, Ardanuy R. Formation, evolution and modeling of trihalomethanes in the drinking water of a town: I. At the municipal treatment utilities. *Water Research* 1997; 31(6): 1299-1308.
36. Golfopoulos SK, Arhonditsis GB. Multiple regression models: A methodology for

- evaluating trihalomethane concentrations in drinking water from raw water characteristics. *Chemosphere*. 2002; 47(9): 1007-1018. PMID: 12108692.
37. Kim J, Chung Y, Shin D, Kim M, Lee Y, Lim Y, et al. Chlorination by-products in surface water treatment process. *Desalination*. 2003; 151(1): 1-9.
38. Rook JJ. Formation of haloforms during chlorination of natural waters 1974. *Indoor Built Environ*. 2003; 12(6): 413-417.