

Assessment of cancerous and non-cancerous health risks due to the presence of trihalomethane compounds in drinking water of Tehran's Pardis Water Treatment Plant

Soodeh Homayoun^{1*} , Amir arsellon Pardakhti¹

1. Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Chlorination, owing to its low cost and ease of application, remains one of the most prevalent disinfection strategies for treated drinking water, particularly in developing regions. Nevertheless, trihalomethanes (THMs), the principal class of chlorination by-products, have been implicated in both carcinogenic and non-carcinogenic adverse health outcomes. This study employs the RAIS framework to conduct a comprehensive health risk assessment of THMs in the effluent of the Pardis drinking-water treatment plant between 1396 and 1401, Separately for children and adults.

Carcinogenic risk was quantified by calculating the chronic daily intake (CDI) for ingestion, inhalation, and dermal exposure pathways, then multiplied by the appropriate oral slope factors and inhalation unit risk coefficients. Non-carcinogenic risk was evaluated by computing the hazard index (HI), based on reference dose (RFD) and reference concentration (RFC) parameters, for both ingestion and inhalation scenarios.

Findings reveal that inhalation contributes approximately 90 % of the total lifetime carcinogenic. Dibromochloromethane and chloroform contributing the largest and the smallest share respectively.. In the non-carcinogenic assessment, the ingestion-based HI values for both children and adults were below 1, confirming that the treated water meets acceptable safety criteria for consumption. Conversely, in four sampling events, the inhalation-based HI for chloroform exceeded 1, signaling a potential non-cancer health concern associated with inhalation of chloroform during treated water use.

Review History

Received: Jan 20, 2025

Accepted: Jun 07, 2025

Keywords

risk assessment
carcinogenic and non-
carcinogenic effects
trihalomethanes
water treatment plant

* Corresponding Author Email: soodeh.homayoun@ut.ac.ir - ORCID: 0009-0001-6937-5025

ارزیابی ریسک سلامت سرطانی و غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب تصفیه‌خانه پردیس تهران

سوده همایون^{۱*} , امیر ارسلان پرداختی^۱

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

تاریخچه داوری

گندزدایی با کلر به علت هزینه پایین و سهولت کاربری یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای گندزدایی آب تصفیه‌شده به ویژه در کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. ترکیبات تری‌هالومتان (THM) به عنوان متداول‌ترین گروه از محصولات جانبی گندزدایی با کلر، منجر به افزایش ریسک بروز بیماری‌های سرطانی و غیرسرطانی و ایجاد اثرات سوء بر سلامت انسان‌ها می‌گردند. در مطالعه حاضر با استفاده از روش ارائه شده در RAIS، ارزیابی ریسک سلامت سرطانی و غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب تصفیه‌خانه پردیس طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ و در دو گروه مختلف کودکان و بزرگسالان انجام شد. بدین منظور ریسک سرطانی کل، با استفاده از محاسبه پارامتر CDI، ضرایب شیب سرطان و ریسک واحد استنشاق و همچنین ارزیابی ریسک غیر سرطانی نیز به کمک پارامترهای RFD, RFC صورت پذیرفت. نتایج نشان داد، بیشترین میزان ریسک سرطانی ناشی از استنشاق بوده (در حدود ۹۰ درصد) و ترکیبات دی‌برموکلرومتان و کلروفرم به ترتیب بیشترین کمترین سهم را در بروز ریسک ابتلا به بیماری‌های سرطانی ایفا می‌کنند. در بخش مربوط به ارزیابی ریسک غیرسرطانی، شاخص خطر ناشی از مواجهه از طریق آشامیدن در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان، کوچکتر از یک بدست آمد که نشانگر کیفیت مطلوب آب این تصفیه‌خانه برای شرب است. همچنین، در چهار مورد نمونه‌برداری، در حالت مواجهه از طریق استنشاق، اندیس خطر بزرگتر از یک بدست آمد که می‌تواند بیانگر وجود خطر غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات کلروفرم در آب شرب خروجی تصفیه‌خانه آب شهر پردیس باشد.

کلمات کلیدی

ارزیابی خطرات
سرطانی و غیرسرطانی
ترکیبات تری‌هالومتان
تصفیه‌خانه آب شرب

۱- مقدمه

2007]. براساس مطالعات انجام گرفته، در فرآیند یادشده بالغ بر ۷۰۰ گونه مختلف از ترکیبات DBP، از جمله هالواسیتیک اسید (HAAs)، استونیتریل هالوژنه (HANs)، هالواسیتونتریل‌ها (HCNs)، هالوکتون‌ها (HKNs) و کلروپیکرین تشکیل می‌گردند [Genisoglu et al., 2019; Grellier et al., 2015; Pan et al., 2014]. ترکیبات تری‌هالومتان (THM) که نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ میلادی شناسایی شدند، به لحاظ تواتر پایش، دقت

گندزدایی با کلر به علت هزینه پایین، سهولت استفاده و زمان ماند کافی در شبکه توزیع آب یکی از متداول‌ترین روش‌های گندزدایی آب آشامیدنی به خصوص در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران است [Kumari et al., 2015]. کلر طی واکنش‌های مختلف در محیط آبی، به طیف وسیعی از محصولات جانبی (DBPs) تبدیل می‌گردد [Liang and Singer 2003; Ates et al., 2009].

* رایانامه نویسنده مسئول: soodeh.homayoun@ut.ac.ir - ORCID: 0009-0001-6937-5025

کپی‌رایت © ۲۰۲۵. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



۱۰۰ و ۲۰۰ به صورت میانگین سالانه اعلام کردند [Wang et al., 2019]. آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا در فاز بعدی غلظت $40 \mu\text{g/l}$ را به عنوان حداکثر مطلوب سطح آلودگی (MCLG) این ترکیبات تعیین کرد.

آب شرب در گستره وسیعی از مصارف خانگی از جمله آشامیدن، پخت و پز، استحمام و شستشوی به مصرف می‌رسد، بنابراین ترکیبات تری‌هالومتان از طرق مختلف بلع، استنشاق از طریق تنفس و جذب از طریق تماس پوستی هنگام استحمام یا شنا کردن در استخرها سلامت انسان‌ها را تهدید می‌نمایند [Pan et al., 2013; Kumari et al., 2015; Lee et al., 2014]. ارزیابی ریسک سلامت ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب در مطالعات مختلفی بررسی شده است [Siddique et al., 2015]. پژوهشی در ناحیه شرقی هند، شاخص ریسک سلامت سرطانی و غیرسرطانی برای پنج تصفیه خانه آب از مسیرهای مختلف مواجهه و برای دو گروه مختلف زنان و مردان بررسی شد و نتایج نشان داد، بیشترین میزان ریسک ابتلای به سرطان ناشی از ترکیبات تری‌هالومتان از مسیر بلع است [Kumari et al., 2015]. مطالعه دیگری در کشور ترکیه در سال ۲۰۰۴ نشان داد که یک نفر از هر پنج میلیون نفر ساکنین شهر آنکارا به علت مواجهه روزانه با ترکیبات تری‌هالومتان‌های موجود در آب شرب در معرض خطر ابتلای به سرطان قرار می‌گیرند [Tokmak et al., 2004]. پژوهش دیگری که در کشور چین توسط شی و همکاران انجام شد، غلظت ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب برای بازه زمانی حدود پنجاه سال در مقیاس جهانی مورد بررسی قرار گرفت و ارزیابی ریسک سرطانی و شاخص خطر این ترکیبات از مسیرهای مختلف مواجهه نیز محاسبه شد. همچنین نرخ ابتلا به سرطان مثانه ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب در ۲۸ کشور اروپایی طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۸ بررسی گردید. نتایج نشان داد که غلظت این ترکیبات در آب شرب طی بازه زمانی حدوداً ۵۰ ساله کاهش یافته است. در کانادا نیز تحقیقاتی بر روی سه منبع آب آلوده انجام شد و خطر ریسک سلامت از طریق استنشاق در محیط حمام چندین برابر بیشتر از حد قابل ریسک سلامت محاسبه گردید [Nazirand.khan, 2006]. مطالعه دیگری بر روی tap water پانزده منطقه مختلف در شهر استانبول صورت گرفت. نتیجه این مطالعه نشان داد که بالاترین میزان ریسک ابتلای به سرطان مربوط

اندازه‌گیری و میزان غلظت، قابل قیاس با سایر گروه‌های محصولات جانبی کلرزی نیستند. این ترکیبات اگرچه سمی‌ترین گروه از ترکیبات جانبی گندزدایی نیستند، به دلیل میزان فراریت و قابلیت نفوذ بالا به منافذ پوستی، شاخص اصلی ترکیبات DBPs در بحث ارزیابی ریسک سلامت محسوب می‌شوند [Grellier et al., 2011; Castano-Vinyals et al., 2015]. ترکیبات تری‌هالومتان در چهار گروه اصلی برمودی کلرومتان^۱ (BDCM)، کلروفرم^۲ (TCM)، دی‌بروموکلرومتان^۳ (DBCM) و بروموفرم^۴ (TBM) تقسیم‌بندی می‌شوند [Siddique et al., 2015]. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) ترکیبات کلروفرم را در گروه B1 (ترکیبات محتمل سرطانزایی در انسان با داده‌های انسانی محدود)، ترکیبات بروموفرم و برمودی کلرومتان را در گروه B2 (ترکیبات محتمل سرطانزایی در انسان با داده‌های حیوانی کافی) و ترکیبات دی‌بروموکلرومتان را در گروه C (ترکیبات محتمل سرطانزایی در انسان) تقسیم‌بندی کرده است [Siddique et al., 2012; Hrudey and Fawell, 2015; Kumari et al., 2015; Lee et al., 2013]. فرآیند شکل‌گیری محصولات جانبی ناشی از گندزدایی با کلر، مواد آلی کربنی (NOM) به عنوان پیش‌ساز آلی و یون بورومید به عنوان پیش‌ساز معدنی در نظر گرفته می‌شود. مطالعات اپیدمیولوژیک بسیاری وجود ارتباط معنادار بین این ترکیبات و افزایش ریسک ابتلای به سرطان‌های مقعدی، روده بزرگ، مثانه، شکم و خون را به اثبات رساندند [Baytak et al., 2008]. مطابق با پژوهش‌های پیشین، ۵ درصد سرطان‌های مثانه در اروپا مربوط به عوارض ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب است [Kolb et al., 2017]. این ترکیبات همچنین می‌توانند منجر به بروز مشکلاتی نظیر سرگیجه، اختلال در سیستم عصبی مرکزی یا اختلالات مربوط به رشد و تولید مثل، کمبود وزن نوزاد، زایمان زودرس و سقط جنین گردند [Pan et al., 2014; Pardakhti et al., 2011; Siddique et al., 2015; Hwang and Jaakkola, 2012]. سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا (USEPA)، سازمان ایالت متحده اروپا (EC) و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، حداکثر مقادیر مجاز (MCL) ترکیبات تری‌هالومتان را در آب شرب به ترتیب $80 \mu\text{g/l}$

¹ bromo dichloro methane

² chloroform

³ dibromochloromethane

⁴ bromoform

به مواجهه از طریق بلع است [Uyak, 2006].

پژوهش دیگری در شهر مراغه با هدف ارزیابی ریسک سلامت ترکیبات (DBPs) در شبکه‌های توزیع آب جدید و فرسوده در فصول مختلف سال صورت گرفت. نتایج نشان داد، گونه کلروفرم غالب‌ترین گروه از ترکیبات هالومتان‌ها بوده است. همچنین، غلظت این ترکیبات در فصل تابستان به مقدار قابل توجهی بالاتر از فصل زمستان بود. غلظت کلیه گروه‌های ترکیبات تری‌هالومتان به غیر از ترکیبات بروموفرم در شبکه‌های توزیع آب جدید به طور قابل توجهی نسبت به شبکه‌های توزیع فرسوده پایین تر گزارش شد. همچنین بیشترین سهم در شاخص ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق استنشاق، و مقادیر مربوط به مواجهه از طریق بلع و تنفس پوستی ناچیز محاسبه شد. کوچلو و همکاران نیز در آبادان، شاخص ریسک سرطانی و غیرسرطانی را از مسیر مختلف بلع، تماس پوستی و استنشاق بررسی کردند. مطالعه دیگری در اهواز نشان داد که بالاترین ریسک ابتلای به سرطان ناشی از ترکیبات تری‌هالومتان، به ترتیب مربوط به مواجهه از طریق تنفس و جذب پوستی می‌باشد [Arman et al, 2016].

حضور تری‌هالومتان‌ها در دو محل متفاوت، قبل و بعد واحدهای اسمز معکوس و تبادل یونی، نشان داد که غلظت این ترکیبات در آب خام ورودی به این واحدهای تصفیه بالاتر از حد مجاز اعلام شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا بود، که این مقادیر در خروجی واحدهای اسمز معکوس و تبادل یونی به ترتیب در حدود ۹۰ و ۸۵ درصد کاهش یافت. همچنین ۸۰-۹۰ درصد ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق استنشاق بود و مواجهه از طریق بلع و تماس پوستی به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. پرداختی و دیگران ریسک ابتلای به سرطان ناشی از ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب تهران را برای دو منبع آبی مختلف چاه و آب سطحی بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت این آلاینده‌ها در آب‌های سطحی به مراتب بالاتر، میزان مواجهه بیشتر و ریسک ابتلای به سرطان بالاتر از منابع آب چاه بدست آمد [Pardakhti et al., 2011].

مطابق با تعاریف ارائه شده در EPA، ارزیابی ریسک سرطانی و غیرسرطانی هر دو فرآیندی هستند که برای ارزیابی اثرات بالقوه سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض آلاینده‌ها استفاده می‌شوند. لیکن ارزیابی‌های ریسک سرطانی بر احتمال ابتلای به سرطان در

تمام طول عمر، در اثر قرار گرفتن در برابر آلاینده‌هایی که اثرات سرطانی ایجاد می‌کنند مانند فرمالدهید و کلروفرم تمرکز دارند. کمترین میزان تماس با یک آلاینده که منجر به بروز اثرات سرطانی می‌گردد، باعث افزایش ریسک ابتلای به سرطان می‌شود. جهت انجام محاسبات در حوزه ارزیابی ریسک سرطانی از ضریب شیب سرطان (CSF) بهره گرفته می‌شود. حال آنکه در ارزیابی ریسک غیرسرطانی احتمال بروز اثرات نامطلوب غیر سرطانی بر روی سلامت انسان ناشی از قرار گرفتن در مقابل آلاینده‌ای که اثرات غیرسرطانی ایجاد می‌کند نظیر سرب و نیترات، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در محاسبات مربوط به ارزیابی ریسک غیرسرطانی، میزان تماس صرفاً در بازه زمانی‌ای که شخص با آلاینده در تماس بوده است، در نظر گرفته می‌شود. علت این موضوع به این حقیقت وابسته است که در خصوص آلاینده‌هایی با خواص غیرسرطانی جهت بروز اثرات نامطلوب غیرسرطانی بر سلامت انسان، حداقل باید در یک بازه زمانی مشخص با آلاینده در تماس بود تا غلظت ماده فوق‌الذکر در بدن انسان به آستانه مشخصی رسیده و منجر به بروز اثرات نامطلوب غیرسرطانی بر سلامت گردد. همچنین جهت انجام محاسبات در این حوزه از پارامترهای RFC, RFD استفاده می‌شود. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه رویکردی جهت ارزیابی ریسک سلامت ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب تصفیه‌خانه پردیس تهران، نهفته است. در حالی که مطالعات پیشین عمدتاً بر روی بررسی کیفی آب خروجی این تصفیه‌خانه از جهات مختلف از جمله غلظت ترکیبات تری‌هالومتان، تمرکز داشته‌اند، این مطالعه کوشیده است تا با بهره‌گیری از روش ارائه شده در RAIS، به ارزیابی ریسک سلامت سرطانی و غیرسرطانی دو گروه مختلف بزرگسالان و کودکان ساکن شهرهای پردیس، رودهن و بخشی از بومهن که مصرف کنندگان اصلی آب شرب این تصفیه‌خانه می‌باشند، پردازد. با توجه به انجام پیش‌کلرزی آب خام در ایستگاه شماره یک تصفیه‌خانه آب شرب پردیس، زمان ماند بالای این فرآیند و در نتیجه افزایش احتمال تشکیل ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب، این پژوهش می‌تواند تا با تکیه بر اهمیت مبحث ارزیابی ریسک سلامت، راهگشای تصمیم‌گیری‌های آتی جهت بهبود عملکرد واحدهای پیش‌تصفیه در تصفیه‌خانه آب شرب پردیس باشد.

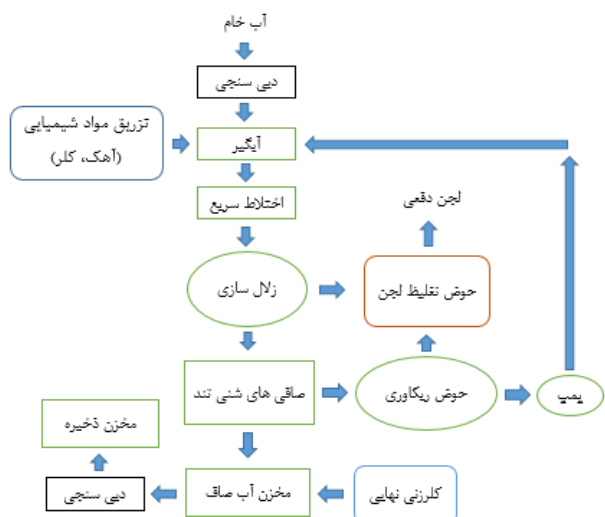
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها

در این پژوهش از ۱۲ نمونه مختلف جهت تعیین غلظت تری هالومتان‌ها در آب آشامیدنی تصفیه خانه شهر پردیس که از محل‌های مختلف شامل نقاط مختلف شبکه توزیع، مخازن ذخیره و خروجی تصفیه خانه طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۱ برداشت شده بودند، استفاده شد. اندازه‌گیری میزان غلظت تری هالومتان‌ها با استفاده از دستگاه‌های گازی کروماتوگرافی/مس اسپکتروفتومتری (GC/MS) شرکت Bruker مدل 450-GC در آزمایشگاه مرجع شرکت آب و فاضلاب استان تهران انجام شد. آماده سازی و نمونه برداری بدین صورت بود که ظروف ۱۰۰ میلی لیتر نمونه برداری همراه با درپوش‌های استردار با شوینده مناسب شسته و سپس با استون شستشو داده و با آب دیونیزه تازه جوشیده شده کاملاً آبکشی شدند. ظروف قبل از نمونه برداری با آب نمونه شسته شد و در هر محل قبل از نمونه برداری اجازه داده شد تا آب در حدود ۴ تا ۵ دقیقه جریان یابد. بطری‌ها به آرامی تا آستانه لبریز شدن پر شدند، به گونه ای که هیچ هوایی در نمونه‌ها باقی نماند. جهت تثبیت نمونه‌ها و حذف کلر باقیمانده، به بطری‌های محتوی نمونه در زمان نمونه برداری حدود ۴ قطره تیوسولفات سدیم ۱،۵ نرمال اضافه شده، درپوش آنها محکم بسته و داخل فلاسک حاوی بسته یخ قرار داده شدند. فاصله نمونه‌برداری تا آنالیز تری هالومتان‌ها حداکثر ۴۸ ساعت بود. نمونه‌ها قبل از آنالیز به دمای محیط رسیدند.

۲-۲- مطالعات منطقه‌ای

فلویدیاگرام تصفیه خانه آب شرب پردیس در شکل ۱ نشان داده شده است. این تصفیه خانه با قابلیت تصفیه ۷۰۰ لیتر آب در ثانیه، شامل واحدهای حوضچه آب خام، حوضچه اختلاط مواد شیمیایی و آب خام ورودی، زلال‌ساز از نوع پولساتور و فیلتراسیون با ۴ صافی تند شنی است. منابع تأمین‌کننده آب خام ورودی تصفیه‌خانه آب شرب پردیس، آبگیر سد لتیان و ۵ حلقه چاه فلن اطراف رودخانه جاجرود است که پس از عبور از سه ایستگاه پمپاژ و کلرزنی اولیه در ایستگاه پمپاژ شماره یک، وارد تصفیه‌خانه می‌شود. غلظت کلر آب ورودی در حدود ۰،۲ میلی گرم بر لیتر است. مواد منعقدکننده و تنظیم‌کننده pH در این تصفیه‌خانه کلروفریک و آهک هستند که مقادیر بهینه تزریقات از طریق جار تست تعیین می‌گردد.



شکل ۱- فلویدیاگرام تصفیه در تصفیه خانه آب شهر پردیس

۲-۳- ارزیابی ریسک سلامت

در این پژوهش ارزیابی ریسک مبتلا به بیماری‌های سرطانی و غیرسرطانی (شاخص خطر) ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در آب شرب خروجی تصفیه‌خانه پردیس برای دو گروه کودکان و بزرگسالان صورت گرفت. به منظور انجام ارزیابی ریسک از روش ارائه شده توسط RAIS^۱ (زیرمجموعه سازمان EPA) استفاده شد. RAIS از سال ۱۹۹۶ اطلاعات ارزیابی ریسک را برای استفاده در پاکسازی محیط‌های آلوده مانند پروژه منهن استفاده می‌کند. این برنامه همچنین ابزارهای موردنیاز برای ارزیابی ریسک را در اختیار پژوهشگران سراسر جهان قرار می‌دهد. کلیه محاسبات ارزیابی ریسک در نرم‌افزار اکسل انجام شد.

۲-۳-۱- ارزیابی ریسک احتمال ابتلا به بیماری‌های سرطانی

در این مطالعه ریسک احتمال ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در آب شرب خروجی تصفیه‌خانه پردیس بر اساس نتایج اندازه‌گیری این ترکیبات برای سه حالت مختلف مواجهه از طریق بلع (آشامیدن)، جذب پوستی و استنشاق هوا در محیط‌های در معرض این ترکیبات با استفاده از روابط ارائه شده توسط EPA محاسبه گردید. کلیه معادلات مورد استفاده در این بخش و همچنین مفروضات مورد نیاز جهت انجام محاسبات مربوط به مشخصه های ارزیابی ریسک سلامت در دو گروه کودکان و بزرگسالان از پایگاه اینترنتی RAIS برداشت شده اند. جهت محاسبه ریسک احتمال ابتلا به بیماری‌های سرطانی از

¹ Risk assessment Information System

رابطه ۱ استفاده گردیده است. در این رابطه، CDI INGESTION, به ترتیب ارزیابی مواجهه با ترکیبات تری هالومتان از طریق بلع، تماس پوستی (بر حسب mg/kg.d) و استنشاق (حسب $\text{بر } \mu\text{g/m}^3$) است و ضرایب IUR و CSF به ترتیب ریسک واحد استنشاق $(\mu\text{g/m}^3)^{-1}$ و ضریب شیب سرطان $(\text{mg/kg.d})^{-1}$ تعریف شدند.

$$\text{Total Risk} = (\text{CDI}_{\text{ingestion}} \times \text{CSF}_{\text{Oral}}) + (\text{CDI}_{\text{inhalation}} \times \text{IUR}) + (\text{CDI}_{\text{dermal}} \times \text{CSF}_{\text{Oral}})$$

مطابق با تقسیم بندی آژانس محافظت از محیط زیست آمریکا (EPA) شاخص ریسک سرطانی به چهار گروه مختلف ریسک پایین قابل قبول (CR کمتر از 10^{-6})، ریسک قابل چشم پوشی (CR در بازه 10^{-6} تا 5×10^{-5})، ریسک بالای قابل قبول (CR در بازه 10^{-4} تا 5×10^{-5}) و ریسک غیر قابل قبول (CR بیشتر از 10^{-4})، تقسیم بندی می گردد.

۲-۳-۲- ارزیابی ریسک احتمال ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی

در این بخش مقادیر شاخص خطر برای اثرات غیرسرطانی (HQ) برای دو حالت مختلف مواجهه از طریق بلع و استنشاق

جدول ۱- مقادیر غلظت ترکیبات تری‌هالومتان در خروجی تصفیه خانه آب شرب پردیس طی سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۴۰۱

۷۲

۳-۱- ارزیابی ریسک سرطانی

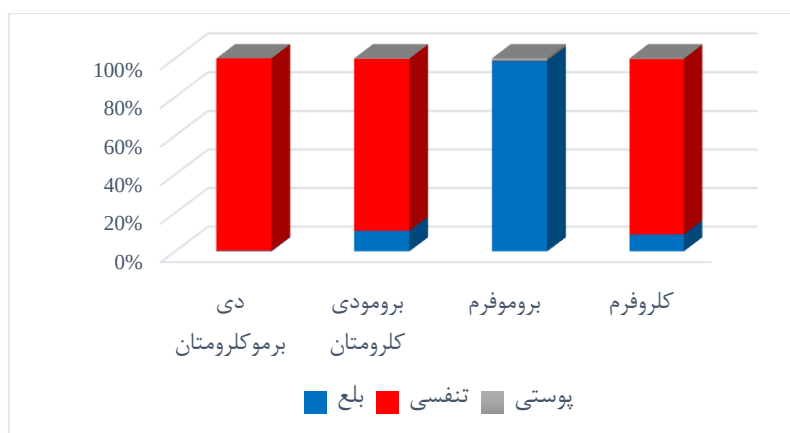
اولویت بعدی قرار دارند. علت بروز این نتایج را می‌توان به ضریب بالاتر خطر استنشاق گونه دی‌برموکلرومتان و همچنین میزان بالای فراریت کلروفرم به دلیل پایین بودن نقطه جوش این ترکیب نسبت به سایر گونه‌های تری‌هالومتان مرتبط دانست. همانطور که قابل مشاهده است، هر چه از ترکیبات کلروفرم به سمت ترکیبات برمودی کلرومتان و بروموفرم پیش می‌رویم، ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق استنشاق، کاهش و ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق بلع افزایش می‌یابد. مقادیر ریسک کلی ابتلا به بیماری‌های سرطانی از مسیرهای مختلف بلع، استنشاق و تماس پوستی به تفکیک گونه‌های مختلف ترکیبات THM در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، بیشترین شاخص ریسک سرطانی برابر با ۸۶ درصد مربوط به دی‌برموکلرومتان است و گونه‌های بروموفرم، برومو دی کلرومتان و کلروفرم با حدود ۱۱، ۲ و ۱٫۵ درصد به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند. علت این امر را می‌توان به ضریب شیب سرطان (CSF) بالای ترکیبات DBCM نسبت به سایر ترکیبات تری‌هالومتان نسبت داد.

در این بخش نتایج حاصل از ارزیابی ریسک بررسی شده و بحث‌های لازم پیرامون آنها صورت گرفته است. با استفاده از ضرایب شیب سرطان (CSF) و نیز غلظت ترکیبات تری‌هالومتان در سه حالت پیشینه، کمینه و میانگین (جدول ۲)، ارزیابی ریسک سرطانی از مسیر بلع، استنشاق و تماس پوستی، به کمک تعیین مقادیر CDI_{ing} ، CDI_{inh} و CDI_{derm} انجام شد. مطابق نتایج، میانگین ریسک سرطانی مربوط به ترکیبات دی‌برموکلرومتان و بروموفرم در محدوده ریسک سرطانی غیر قابل قبول و در مورد ترکیبات برومودی کلرومتان و کلروفرم در محدوده ریسک پایین قابل قبول مطابق با تعاریف ارائه شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا قرار دارند.

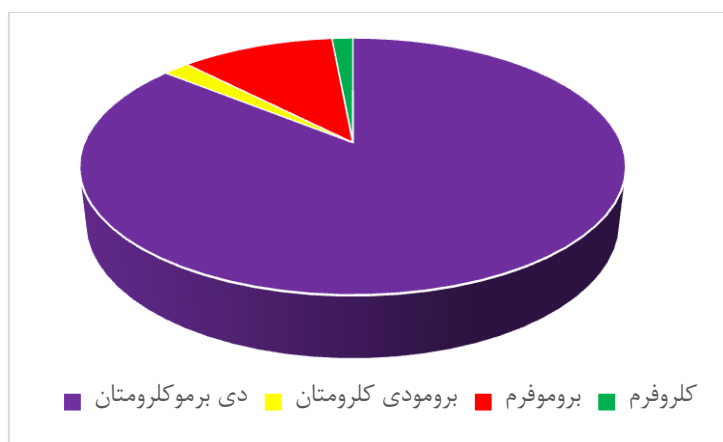
نتایج ارزیابی ریسک سرطانی مربوط به گونه‌های مختلف ترکیبات تری‌هالومتان به تفکیک انواع مختلف مواجهه در شکل ۲ نشان داده شده است. در حدود ۹۹ درصد ریسک ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از ترکیبات دی‌برموکلرومتان، مربوط به مواجهه از طریق استنشاق بوده و ترکیبات کلروفرم با حدود ۹۱ درصد ریسک سرطانی مربوط به حالت مواجهه از مسیر تنفس در

جدول ۲- مقادیر ریسک سرطانی کل محاسبه شده برای زمان‌های مختلف نمونه‌برداری

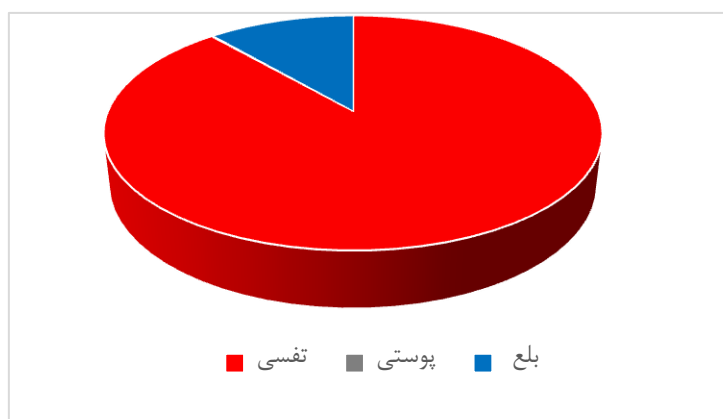
ترکیبات	۱۳۹۶/۱۱/۱۵	۱۳۹۶/۹/۲۰	۱۳۹۷/۱/۲۱	۱۳۹۷/۵/۲	۱۳۹۷/۱۲/۸	۱۳۹۸/۷/۲۲	۱۳۹۹/۳/۲۰	۱۳۹۹/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۳/۲۴	۱۴۰۰/۶/۹	۱۴۰۱/۴/۱۸	بیشترین غلظت	کمترین غلظت	میانگین
کلرومتان دی برومو	۷٫۵۷E-۰۴	۱٫۳۰E-۰۳	۱٫۵۲E-۰۳	۶٫۵۷E-۰۴	۲٫۴۸E-۰۳	۱٫۱۶E-۰۳	۱٫۵۱E-۰۳	۸٫۲۹E-۰۴	۷٫۳۶E-۰۴	۱٫۳۷E-۰۳	۷٫۰۴E-۰۴	۲٫۴۸E-۰۳	۶٫۵۷E-۰۴	۱٫۰۹E-۰۳
برومو دی کلرومتان	۲٫۳۲E-۰۵	۲٫۶۹E-۰۵	۲٫۴۸E-۰۵	۲٫۷۶E-۰۵	۳٫۶۶E-۰۵	۲٫۷۳E-۰۵	۲٫۸۶E-۰۵	۱٫۶۱E-۰۵	۱٫۸۶E-۰۵	۳٫۰۷E-۰۵	۲٫۶۱E-۰۵	۳٫۶۶E-۰۵	۱٫۶۱E-۰۵	۲٫۳۸E-۰۵
بروموفرم	۳٫۰۸E-۰۷	۱٫۹۷E-۰۷	۰	۰	۶٫۲۴E-۰۷	۱٫۸۷E-۰۷	۰	۰	۰	۰	۱٫۶۵E-۰۷	۱٫۶۵E-۰۷	۰	۱٫۳۷E-۰۷
کلروفرم	۱٫۰۶E-۰۵	۱٫۱۴E-۰۵	۵٫۴۴E-06	۱٫۶۶E-۰۵	۱٫۰۱E-۰۵	۱٫۹۲E-۰۵	۶٫۳۱E-۰۵	۷٫۱۷E-۰۶	۱٫۷۵E-۰۵	۳٫۴۰E-۰۵	۳٫۰۰E-۰۵	۶٫۲۱E-۰۵	۵٫۶۴E-۰۶	۱٫۸۷E-۰۵



شکل ۲- نتایج ارزیابی ریسک سرطانی مربوط به گونه‌های مختلف ترکیبات تری‌هالومتان به تفکیک انواع مختلف مواجهه



شکل ۳- مقادیر ریسک کلی ابتلا به بیماری‌های سرطانی از مسیرهای مختلف به تفکیک گونه‌های مختلف ترکیبات THM



شکل ۴- مقادیر ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی ناشی از حضور کلیه ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس

تری‌هالومتان با حدود ۱۱ درصد در اولویت بعدی قرار دارد. همچنین ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از مسیر تماس پوستی در مقابل سایر حالات بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن بدست آمد. بر اساس مطالعات پیشین، مواجهه با ترکیبات THM از مسیر استنشاق به هنگام آزاد شدن ترکیبات فرار در حین فعالیت‌هایی نظیر شنا، استحمام، شستشو و پخت‌وپز رخ می‌دهد.

مقادیر ریسک سرطانی مربوط به مواجهه از طریق بلع، استنشاق و تماس پوستی ناشی از حضور کلیه ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس در شکل ۴ ارائه شده است. بیشترین ریسک سرطانی ناشی از این ترکیبات در حدود ۸۹ درصد، ناشی از مواجهه از مسیر استنشاق بوده و در معرض قرار گرفتن، از راه آشامیدن آب محتوی ترکیبات

۲-۳- ارزیابی ریسک غیرسرطانی

در این بخش، ارزیابی ریسک غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در دو گروه مختلف کودکان و بزرگسالان بررسی می شود. با توجه به اینکه ریسک سرطانی مواجهه از مسیر تماس پوستی در بخش ۳-۱ ناچیز بدست آمد، از ارزیابی ریسک غیرسرطانی این مواجهه صرف نظر شد. نتایج مربوط به این بخش در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، در حالت مواجهه از مسیر بلع در هر دو گروه کودک و بزرگسال، شاخص خطر در کلیه موارد کوچکتر از یک بدست آمد که نشانه عدم وجود خطر غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در آب شرب تصفیه خانه پردیس است. از سویی دیگر، این اندیس برای ترکیبات کلروفرم در حالت مواجهه از مسیر استنشاق در ۴ مورد نمونه برداری بزرگتر از یک محاسبه گردید. می توان گفت که در معرض قرار گرفتن با ترکیبات کلروفرم از راه تنفس هوای محتوی این ترکیبات می تواند، منجر به بروز اثرات غیرسرطانی نظیر تغییرات در سیستم عصبی، ابتلای به بیماری یرقان و رشد

غیرمعمولی کبد گردد.

خلاصه نتایج مربوط به ارزیابی ریسک غیرسرطانی پژوهش فوق در جداول ۶ تا ۸ قابل مشاهده است. همانطور که در جدول ۷ مشخص است، بیشترین مقدار شاخص خطر غیرسرطانی ناشی از مواجهه از مسیرهای مختلف مربوط به ترکیبات کلروفرم بوده و گونه های برومودی کلرومتان، دی بروموکلرومتان و بروموفرم به ترتیب در اولویت های بعدی قرار دارند. مقادیر متناسب با این شاخص ها در بزرگسالان به ترتیب معادل با $1.44E-2$ ، $1.20E-2$ ، $4.55E-3$ و $6.73E-4$ و در گروه کودکان متناظر با $2.27E-2$ ، $2.00E-2$ ، $7.57E-3$ و $1.12E-3$ بدست آمد، که نشانگر حساسیت بالاتر کودکان نسبت به احتمال بروز عوارض غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات THM در آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس است. علت این امر را می توان با وزن بدن کمتر گروه کودکان نسبت به بزرگسالان توجیه نمود. با توجه به نتایج جدول ۸ می توان گفت که کلیه ریسک غیرسرطانی مربوط به مواجهه از مسیر استنشاق مربوط به ترکیبات کلروفرم است.

جدول ۳- ارزیابی ریسک غیرسرطانی از مسیر بلع ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در کودکان

ترکیبات تری هالومتان	مشخصه	مواجهه	پیشینه	کمینه	میانگین
دی بروموکلرومتان	HI کودکان	بلع	$1.73E-02$	$4.59E-03$	$7.57E-03$
برومو دی کلرومتان			$3.09E-02$	$1.36E-02$	$2.00E-02$
برومو فرم			$5.21E-03$	$0.00E+00$	$1.12E-03$
کلرو فرم			$6.87E-02$	$6.23E-03$	$2.07E-02$

جدول ۴- ارزیابی ریسک غیرسرطانی از مسیر بلع ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در بزرگسالان

ترکیبات تری هالومتان	مشخصه	مواجهه	پیشینه	کمینه	میانگین
دی بروموکلرومتان	HI بزرگسالان	بلع	$1.04E-02$	$2.76E-03$	$4.55E-03$
برومو دی کلرومتان			$1.85E-02$	$8.17E-03$	$1.20E-02$
برومو فرم			$3.13E-03$	$0.00E+00$	$6.73E-04$
کلرو فرم			$4.13E-02$	$3.75E-03$	$1.24E-02$

جدول ۵- ارزیابی شاخص خطر غیرسرطانی HI در بزرگسالان/کودکان ناشی از تنفس ماده شیمیایی کلروفرم

خطری غیرسرطانی	شاخص ارزیابی	۱۳۹۶/۹/۲۰	۱۳۹۷/۱/۲۱	۱۳۹۷/۵/۲	۱۳۹۷/۱۲/۸	۱۳۹۸/۷/۲۲	۱۳۹۹/۳/۲۰	۱۳۹۹/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۳/۴	۱۴۰۰/۶/۹	۱۴۰۱/۴/۱۸	پیشینه	کمینه	میانگین
HI		$58E-2$	$62E-2$	$31E-2$	$90E-2$	$55E-2$	104	239	095	185	163	338	20	102

می‌دهد ریسک غیر سرطانی مربوط به کلیه ترکیبات THM در شرایطی که این ترکیبات از راه آشامیدن به مصرف کنندگان برسد، بالاتر از ریسک غیرسرطانی ناشی از تنفس هوای محتوی ترکیبات تری‌هالومتان است. مطابق با جدول ۶ می‌توان نتیجه گرفت در ارزیابی ریسک غیرسرطانی در این پژوهش، بیشترین میزان خطر مربوط به ترکیبات کلروفرم بوده و ترکیبات برومودی کلرومتان، دی بروموکلرومتان و بروموفرم با ۳۸,۰۱، ۱۴,۳۷ و ۲,۱۲ درصد به ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

این ترکیبات همچنین در حالت مواجهه از مسیر بلع نیز بیشترین میزان ریسک غیرسرطانی (در حدود ۴۲ درصد) را به خود اختصاص دادند. ترکیبات برومودی کلرومتان، دی بروموکلرومتان و بروموفرم نیز به ترتیب ۴۰,۵۵، ۱۵,۳۳ و ۲,۲۷ درصد از کل سهم ریسک غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری‌هالومتان در آب شرب تصفیه خانه پردیس را به خود اختصاص دادند. همچنین، مقایسه اعداد مربوط به شاخص ریسک غیرسرطانی گروه سنی بزرگسالان در مورد کلیه گونه‌های تری‌هالومتان از مسیر استنشاق و بلع که به ترتیب ۱,۹۹E-۳ و ۲-۲,۹۷E بدست آمد، که نشان

جدول ۶- نتایج ریسک غیرسرطانی محاسبه شده ناشی از ترکیبات مختلف

نام ترکیب	درصد total HI/HI
کلروفرم	۴۵,۵۰
بروموفرم	۲,۱۲
برومودی کلرومتان	۳۸,۰۱
دی بروموکلرومتان	۱۴,۳۷

جدول ۷- ارزیابی ریسک غیرسرطانی کودکان و بزرگسالان

نام ترکیب	طریقه مواجهه	اندیس خطر (کودکان)	اندیس خطر (بزرگسالان)
کلروفرم	تنفسی	۱,۹۹E-۳	۱,۹۹E-۳
	بلع	۲,۰۷E-۲	۱,۲۴E-۲
	مجموع	۲,۲۷E-۲	۱,۴۴E-۲
بروموفرم		۱,۱۲E-۳	۶,۷۳E-۴
برومودی کلرومتان	بلع	۲,۰۰E-۲	۱,۲۰E-۲
دی بروموکلرومتان		۷,۵۷E-۳	۴,۵۵E-۳
HI تنفسی		۱,۹۹E-۳	۱,۹۹E-۳
HI بلع		۴,۹۴E-۲	۲,۹۷E-۲
HI کل		۵,۱۴E-۲	۳,۱۷E-۲

جدول ۸- نسبت ریسک غیرسرطانی ناشی از مسیرهای مواجهه مختلف

نام ترکیب	طریقه مواجهه	درصد
کلروفرم	تنفسی	۱۰۰
کلروفرم		۴۱,۸۵
بروموفرم		۲,۲۷
برومودی کلرومتان	بلع	۴۰,۵۵
دی بروموکلرومتان		۱۵,۳۳

۴- نتیجه گیری

غلظت ترکیبات تری هالومتان در کلیه نمونه های خروجی تصفیه خانه آب شرب پردیس کمتر از حدمجاز EPA و استاندارد ۱۰۵۳ آب شرب ایران اندازه گیری شد. از این رو می توان گفت آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس در حد استاندارد و مطلوب ترکیبات تری هالومتان قرار دارد. با این وجود، با توجه به پیش کلرزی آب خام در ایستگاه شماره یک، احتمال ورود فاضلاب و زمان ماند طولانی، توصیه می گردد تا با افزایش راندمان واحدهای انعقاد، لخته سازی و ته نشینی، میزان حذف ترکیبات آلی به بیشترین مقدار رسانده شود. از سویی، جایگزینی کلرزی با فرایندهایی از قبیل پیش اکسیداسیون و همچنین کنترل مداوم غلظت مواد آلی کربنی در ورودی تصفیه خانه و پایش دوره ای این ترکیبات در آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس پیشنهاد می گردد.

مشخص گردید که در حدود ۹۰ درصد ریسک سرطانی ناشی از ترکیبات THM مربوط به مواجهه از طریق استنشاق هوای محتوی این ترکیبات، حدود ۱۰ درصد مربوط به مواجهه از طریق آشامیدن توسط مصرف کنندگان بوده و احتمال بروز بیماری های سرطانی در اثر تماس پوستی با آب محتوی این ترکیبات به هنگام استحمام ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. با توجه به خاصیت فراریت این ترکیبات، میزان اهمیت بررسی ارزیابی ریسک سلامت ناشی از مواجهه از طریق تماس پوستی و استنشاق هم سطح و یا حتی در مواردی بیشتر از حالت مواجهه از طریق بلع شمرده خواهد شد. مطابق با مطالعات متعدد پیشین، مواجهه با ترکیبات THM از طریق استنشاق به هنگام آزاد شدن ترکیبات فرار در حین فعالیت هایی نظیر شنا کردن، استحمام، شستشوی پخت و پز رخ می دهد. لازم به ذکر است که اصلی ترین طریقه مواجهه از راه استنشاق، مربوط به شنا کردن و استحمام فرض گرفته می شود. مشخص شد که گونه های دی بروموکلرومتان، برموفرم، برمودی کلرومتان و کلروفرم به ترتیب بیشترین سهم را در احتمال بروز بیماری های سرطانی ناشی از حضور ترکیبات تری هالومتان در آب شرب تصفیه خانه پردیس دارند. این امر را می توان با ضریب شیب سرطان (CSF) بالای ترکیبات DBCM نسبت به سایر ترکیبات تری هالومتان توجیه کرد. از سوی دیگر، در حالت مواجهه از مسیر

استنشاق، ترکیبات دی بروموکلرومتان بیشترین نقش را در بروز ریسک ابتلا به بیماری های سرطانی ایفا می کنند و گونه های کلروفرم و برومو دی کلرومتان به ترتیب در اولویت های بعدی قرار دارند. این نتایج را می توان به ضریب بالاتر inhalation unit risk مربوط به گونه دی بروموکلرومتان همچنین میزان بالای فراریت ترکیبات کلروفرم به دلیل پایین بودن نقطه جوش این ترکیبات نسبت به سایر گونه های تری هالومتان نسبت داد.

در بخش مربوط به ارزیابی ریسک غیر سرطانی، اندیس خطر مربوط به گونه های مختلف THM ناشی از مواجهه از طریق بلع در هر دو گروه بزرگسالان و کودکان کوچکتر از یک بدست آمد که مطابق با تعاریف ارائه شده می توان آن را نشانه عدم وجود خطر غیر سرطانی ناشی از ترکیبات تری هالومتان در آب شرب تصفیه خانه پردیس برای هر دو گروه بزرگسالان و کودکان تفسیر کرد. لیکن در چهار مورد نمونه برداری شاخص خطر مربوط به استنشاق هوای محتوی ترکیبات کلروفرم بزرگتر از یک بدست آمد که نشانه وجود خطر غیرسرطانی از این مسیر است. فرضیه های مختلفی جهت توجیه این امر می تواند صادق باشد به عنوان مثال عدم کارایی مناسب واحد انعقاد و اختلاط شیمیایی ورودی این تصفیه خانه در بازه زمانی نمونه برداری های یاد شده می تواند منجر به ورود مواد آلی به واحد کلرزی و متعاقباً افزایش غلظت ترکیبات تری هالومتان در آب شرب شده باشد. همچنین همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، زمان ماند به نسبت بالای پیش کلرزی آب خام در ایستگاه شماره یک تصفیه خانه آب شرب پردیس نیز ممکن است منجر به افزایش غلظت کلروفرم در نمونه های یاد شده گردیده باشد. به علاوه با توجه به اینکه منابع آب خام این تصفیه خانه از سد لتیان و چاه های فلن اطراف رودخانه جاجرود تامین می گردد، احتمال تغییر منبع آب خام ورودی از آب چاه به آب رودخانه در بازه های زمانی ای که اندیس خطر بالاتر از یک بدست آمده نیز می تواند یکی دیگر از علل بروز این امر تلقی شود. از سویی دیگر همانطور که مشخص است نمونه های یادشده در تابستان و فصول گرم سال اخذ شده اند لذا این امر می تواند منجر به تسریع واکنش های کلرزی و افزایش تولید کلروفرم گردیده باشد. بنابراین، کاهش غلظت ترکیبات کلروفرم در آب

شرب خروجی این تصفیه خانه را می توان راهکاری موثر جهت برطرف نمودن این معضل پیشنهاد داد. در نهایت، می توان

ترکیبات تری‌هالومتان در خروجی تصفیه خانه، احتمال بروز اثرات غیرسرطانی را در ساکنین شهرهای پردیس، بومهن و بخشی از رودهن کاهش داد.

نتیجه گرفت که بیشترین احتمال بروز بیماری‌های غیرسرطانی ناشی از حضور ترکیبات THM در آب شرب خروجی تصفیه خانه پردیس با حدود ۴۶ درصد مربوط به ترکیبات کلروفرم است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تا با کنترل و پایش مداوم این گونه از

References

- Arman K, Pardakhti AR, Osoleddini N, Leili M (2016) Cancer risk assessment from multi-exposure to chloroform in drinking water of Ilam City. Iran Avicenna J Environ Health Eng 3:5331.
- Ates, N., Kaplan, S. S., Sahinkaya, E., Kitis, M., Dilek, F.B., & Yetis, U. (2007). Occurrence of disinfectant by products in low DOC surface water in Turkey. *Journal of Hazardous Materials*, 142(2), 526–534.
- Baytak, D., et al., 2008. Seasonal variation in drinking water concentrations of disinfection by-products in IZMIR and associated human health risks. *Sci. Total Environ.* 407, 286–296.
- Castano-Vinyals, G., et al., 2011. Socioeconomic status and exposure to disinfection byproducts in drinking water in Spain. *Environ. Health* 10, 18.
- Evans, Amanda M., 2013. Spatial variation of disinfection by-product concentrations: exposure assessment implications. *Water Res.* 47, 6130–6140.
- G. Melegy, M. Elgammal, G. Adel, Removal of Natural Organic Matter and Trihalomethanes from Drinking Water Plants Using Modified Polymer, Researchsquare, 2024.
- Genisoglu M, Ergi-Kaytmaz C, Sofuoglu SC (2019) Multi-route-multipathway exposure to trihalomethanes and associated cumulative health risks with response and dose addition. *J Environ Manag* 233:823–831.
- Grellier, J., Bennett, J., Patelarou, E., Smith, R.B., Toledano, M.B., Rushton, L., Briggs, D.J., Nieuwenhuijsen, M.J., 2010. Exposure to disinfection by-products, fetal growth, and prematurity: a systematic review and meta-analysis. *Epidemiology* 21 (3), 300–313.
- Hrudey, Steve E., Fawell, John, 2015a. 40 years on: what do we know about drinking water disinfection by-products (DBPs) and human health? *Water Sci. Technol.: Water Supply* 15, 667–674.
- Hwang, Bing-Fang, Jaakkola, Jouni J.K., 2012. Risk of stillbirth in the relation to water disinfection by-products: a population-based case-control study in Taiwan. *PLoS One* e33949.
- Kolb, C., et al., 2017. Disinfection byproduct regulatory compliance surrogates and bromide- associated risk. *J. Environ. Sci.* 58, 191–207.
- Kumari, M., Gupta, S.K., 2015. Modeling of trihalomethanes (THMs) in drinking water supplies: a case study of eastern part of India. *Environ Sci Pollut Res Int* 22.12615-12623, 16.
- L.E. Beane Freeman, M. Kogevinas, K.P. Cantor, C.M. Villanueva, L. Prokunina-Olsson, O. Florez-Vargas, et al., Disinfection by-products in drinking water and bladder cancer: evaluation of risk modification by common genetic polymorphisms in two case-control studies, *Environ. Health Perspect.* 130 (2022) 057006
- Lee, J., et al., 2013. Occurrence of disinfection by-products in tap water distribution systems and their associated health risk. *Environ. Monit. Assess.* 185, 7675–7691.
- Liang, L., & Singer, P. C. (2003). Factors influencing the formation and relative distribution of halo acetic acids and trihalomethanes in drinking water. *Environmental Science & Technology*, 37(13), 2920–2928.
- M. Garrido, M. Villanueva-Suárez, A.A. Gómez, Trihalomethane levels in municipal drinking water of Madrid (Spain) and health risk assessment for oral exposure, *Expo. Health* (2023) 1–14.
- Pan, S., An, W., Li, H., Su, M., Zhang, J., Yang, M., 2014. Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years. *J Hazard Mater* 280, 288–294.
- Pan, S., et al., 2014. Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years. *J. Hazard Mater.* 280, 288.
- Pardakhti, A.R., et al., 2011. Comparative cancer risk assessment of THMs in drinking water from well water sources and surface water sources. *Environ. Monit. Assess.* 179, 499–507.
- R. Kujlu, M. Mahdavianpour, F. Ghanbari, Multi-route human health risk assessment from trihalomethanes in drinking and non-drinking water in آبادان, Iran, *Esprit* 27 (2020) 42621–42630.
- Siddique, A., et al., 2012. Temporal variability of disinfection by-products concentration in urban public water system. *Glob. NEST J.* 14, 393–398.

- Tokmak, B., Capar, G., Dilek, F. B., & Yetis, U. (2004). Trihalomethanes and associated potential cancer risks in the water supply in Ankara. Turkey Environmental Science, 96(3), 345–352.
- Uyak, V., 2006. Multi-pathway risk assessment of trihalomethanes exposure in Istanbul drinking water supplies. Environ. Int. 32, 12–21.
- Wang, Z., et al., 2009. Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment. Res. Environ. Sci. 22, 1164–1170.
- Y. Wang, G. Zhu, B. Engel, Health risk assessment of trihalomethanes in water treatment plants in jiangsu province, China, Ecotoxicol. Environ. Saf. 170 (2019) 346–354.
- Yang, Y., et al., 2014. Toxic impact of bromide and iodide on drinking water disinfected with chlorine or chloramines. Environ. Sci. Technol. 48, 12362–12369.