



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۱

۸۷-۱۰۴

مقاله پژوهشی

بررسی غلظت و اثرات بهداشتی فلزات سنگین منتشره از واحدهای صنعتی شهرک صنعتی ناجی

کیمیا فتوت^۱، لایلا خازینی^{۱*}، یوسفعلی عابدینی^۲ و محمدرضا یوسفی^۳

^۱ گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳ گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

فتوت، ک، ل. خازینی، ی. عابدینی و م. یوسفی. ۱۴۰۱. بررسی غلظت و اثرات بهداشتی فلزات سنگین منتشره از واحدهای صنعتی شهرک صنعتی ناجی. فصلنامه علوم محیطی. ۲۰(۳): ۸۷-۱۰۴.

سابقه و هدف: امروزه با گسترش فعالیت واحدهای صنعتی، غلظت آلاینده‌ها در هوا افزایش یافته و انسان‌ها از طریق تنفس، بلعیدن و جذب پوستی در معرض آن‌ها قرار می‌گیرند. در میان تمام آلاینده‌ها، فلزات سنگین به دلیل ماهیت سمی خود بسیار مورد توجه متخصصان زیست‌محیطی قرار گرفته‌اند. غلظت بالای فلزات سنگین در محیط‌زیست، می‌تواند خطر اثرات نامطلوب بر سلامتی انسان را افزایش دهد. شهرک صنعتی ناجی زنجان با فعالیت واحدهای ریخته‌گری مس و آلیاژهای آن، به‌عنوان یکی از منابع انتشار فلزات سنگین در هوای شهر زنجان می‌باشد؛ لذا ارزیابی غلظت و اثرات بهداشتی فلزات سنگین منتشره از شهرک مذکور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مواد و روش‌ها: به منظور ارزیابی غلظت و اثرات بهداشتی فلزات سنگین منتشره از واحدهای صنعتی شهرک صنعتی ناجی، نمونه‌برداری از کل ذرات معلق هوای شهرک مذکور و مناطق مجاور آن (۱۰ ایستگاه)، طی دو دوره (بهمن ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰) انجام شده است. جهت شناسایی فلزات سنگین از آنالیز طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) استفاده شده است. در این آنالیز، فلزات سنگین نقره، آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، آهن، سرب، آنتیموان، وانادیم و روی شناسایی شده‌اند. همچنین در ادامه به ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی و غیر سرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا برای دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان پرداخته شده است.

نتایج و بحث: غلظت فلزات سنگین شناسایی شده در بهمن ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰، با استانداردهای ملی کیفیت هوای محیط، مقایسه شد. نتایج حاصل از این مقایسه نشان داد که غلظت کروم و آهن در تمامی ایستگاه‌های شهرک صنعتی ناجی بالاتر از استاندارد است. همچنین، غلظت نقره، کادمیوم، کروم، مس، آهن، آنتیموان، وانادیم و روی در تمامی ایستگاه‌های مجاور شهرک صنعتی مذکور بالاتر از استاندارد می‌باشد. نتایج ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی مواجهه با فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا، در هر دو فصل

*Corresponding Author: *Email Address.* khazini@tabrizu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1091>
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.3.10.3>

زمستان و بهار، نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها مواجهه با فلزات سنگین هوا، خطری برای سلامت افراد جامعه ندارد. بیشترین خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در فصل زمستان و بهار به ترتیب ناشی از مواجهه با آرسنیک (در ایستگاه ۲، داخل شهرک صنعتی) و کادمیوم (در ایستگاه ۴، داخل شهرک صنعتی) مشاهده شد. در فصل بهار، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از مواجهه با آرسنیک و کادمیوم در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه ۲ نسبت به فصل زمستان بیشتر مشاهده شد. این در حالی است که در فصل بهار، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از مواجهه با سرب در تمامی ایستگاه‌ها نسبت به فصل زمستان کمتر مشاهده شد. به طور کلی می‌توان بیان کرد که مقادیر شاخص خطر به دست آمده برای گروه سنی کودکان، بیشتر از گروه سنی بزرگسالان می‌باشد؛ لذا کودکان در مواجهه با فلزات سنگین هوا، بیشتر در معرض خطر ابتلا به انواع بیماری‌های سرطانی و غیر سرطانی قرار دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج ارزیابی مواجهه فلزات سنگین منتشره از شهرک صنعتی ناجی بر سلامتی انسان، نشان می‌دهد که خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی، افراد منطقه مورد مطالعه را تهدید نمی‌کند؛ اما خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از آرسنیک و کادمیوم در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی بالا است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، فلزات سنگین، طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی و غیر سرطانی.

مقدمه

رشد سریع و صنعتی شدن، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه، منجر به مشکلات جدی آلودگی هوا در بسیاری از شهرهای بزرگ جهان شده است (Von et al., 2010). طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، سالانه بیش از ۷ میلیون نفر، بر اثر آلاینده‌های هوا، جان خود را از دست می‌دهند (Macêdo and Ramos, 2020). بنابراین، لازم است با افزایش آگاهی عمومی پیرامون اثرات نامطلوب سلامتی مواجهه با آلاینده‌های هوا، اقداماتی در جهت کنترل آلودگی هوا انجام شود (Zeng et al., 2019). آمریکا در سال ۱۹۵۵، نیاز رسیدگی به پیامدهای زیست-محیطی آلاینده‌های هوا را تشخیص داد و قانون کنترل و تحقیق در مورد آلودگی هوا را تصویب کرد. در سال ۱۹۶۳، قانون متمم فدرال در قالب قانون هوای پاک، جهت تعیین مقررات کنترل میزان انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از منابع متحرک و منابع ثابت ارائه شد. با اصلاحات قانون هوای پاک در سال ۱۹۶۷، آلاینده‌های معیار هوا به عنوان شاخص استاندارد کیفیت هوا شناسایی شدند (Vandenberg, 2013). این آلاینده‌ها به طور عمده در هوا وجود داشته و توسط ایستگاه‌های پایش کیفی هوای محیط که دارای آنالیزهای پایش پیوسته می‌باشند، اندازه‌گیری شده و نتایج این پایش به صورت آنلاین در اختیار عموم قرار می‌گیرد. آلاینده‌های معیار هوا شامل ذرات معلق (PM₁₀) و ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر (PM_{2.5}) می‌باشند که به علت ترکیب پیچیده‌ی آنها و وارد شدن به ریه و جریان خون انسان‌ها، اثرات بهداشتی نامطلوب‌تری را نسبت به سایر آلاینده‌های معیار هوا ایجاد می‌کنند (Martínez-Bravo and Martínez-del-Río, 2020). با توجه به قانون هوای پاک سال ۱۹۷۰، سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا ملزم به شناسایی و توسعه استانداردهای انتشار ملی آلاینده‌های خطرناک هوا، برای حفاظت از سلامت عمومی با یک حاشیه ایمنی کافی شد. استانداردها با در نظر گرفتن اثرات بهداشتی این ترکیبات و کنترل لازم جهت تأمین حفاظت اعلام شده، تعیین می‌شدند. از آنجایی که این آلاینده‌ها منجر به اثرات جدی بر روی سلامتی انسان‌ها و در نتیجه باعث افزایش مرگ و میر می‌شوند و نیز اثرات نامطلوبی بر روی محیط‌زیست ایجاد می‌کنند، لذا باید حفاظت بیشتری نسبت به آلاینده‌های معیار برای عموم مردم انجام شود. در سال ۱۹۷۰، سه آلاینده آریست، بریلیوم و جیوه به

رشد سریع و صنعتی شدن، به‌ویژه در مناطق در حال توسعه، منجر به مشکلات جدی آلودگی هوا در بسیاری از شهرهای بزرگ جهان شده است (Von et al., 2010). طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، سالانه بیش از ۷ میلیون نفر، بر اثر آلاینده‌های هوا، جان خود را از دست می‌دهند (Macêdo and Ramos, 2020). بنابراین، لازم است با افزایش آگاهی عمومی پیرامون اثرات نامطلوب سلامتی مواجهه با آلاینده‌های هوا، اقداماتی در جهت کنترل آلودگی هوا انجام شود (Zeng et al., 2019). آمریکا در سال ۱۹۵۵، نیاز رسیدگی به پیامدهای زیست-محیطی آلاینده‌های هوا را تشخیص داد و قانون کنترل و تحقیق در مورد آلودگی هوا را تصویب کرد. در سال ۱۹۶۳، قانون متمم فدرال در قالب قانون هوای پاک، جهت تعیین مقررات کنترل میزان انتشار آلاینده‌های هوای ناشی از منابع متحرک و منابع ثابت ارائه شد. با اصلاحات قانون هوای پاک در سال ۱۹۶۷، آلاینده‌های معیار هوا به عنوان شاخص استاندارد کیفیت هوا شناسایی شدند (Vandenberg, 2013). این آلاینده‌ها به طور عمده در هوا وجود داشته و توسط ایستگاه‌های پایش کیفی هوای محیط که دارای آنالیزهای پایش پیوسته می‌باشند، اندازه‌گیری شده و نتایج این پایش به صورت آنلاین در اختیار عموم قرار می‌گیرد. آلاینده‌های معیار هوا شامل ذرات معلق (PM₁₀) و ذرات معلق با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر (PM_{2.5}) می‌باشند که به علت ترکیب پیچیده‌ی آنها و وارد شدن به ریه و جریان خون انسان‌ها، اثرات بهداشتی نامطلوب‌تری را نسبت به سایر آلاینده‌های معیار هوا ایجاد می‌کنند (Martínez-Bravo and Martínez-del-Río, 2020). با توجه به قانون هوای پاک سال ۱۹۷۰، سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا ملزم به شناسایی و توسعه استانداردهای انتشار ملی آلاینده‌های خطرناک هوا، برای حفاظت از سلامت عمومی با یک حاشیه ایمنی کافی شد. استانداردها با در نظر گرفتن اثرات بهداشتی این ترکیبات و کنترل لازم جهت تأمین حفاظت اعلام شده، تعیین می‌شدند. از آنجایی که این آلاینده‌ها منجر به اثرات جدی بر روی سلامتی انسان‌ها و در نتیجه باعث افزایش مرگ و میر می‌شوند و نیز اثرات نامطلوبی بر روی محیط‌زیست ایجاد می‌کنند، لذا باید حفاظت بیشتری نسبت به آلاینده‌های معیار برای عموم مردم انجام شود. در سال ۱۹۷۰، سه آلاینده آریست، بریلیوم و جیوه به

اکسیدهای مس تولیدی طی واکنش احتراق، درحالی که فاصله زیادی از منابع انتشار دارند، به مدت ۳۰ روز در تروپوسفر باقی بمانند (Barceloux and Barceloux, 1999; Schroeder et al., 1987).

Zheng et al. (2010) به ارزیابی خطر سلامتی مواجهه با فلزات سنگین منتشره از منطقه ذوب روی، در شمال شرقی چین پرداختند. آنها با استفاده از آنالیز طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS)، فلزات سنگین جیوه، سرب، کادمیوم و روی را شناسایی کرده و سپس خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی و غیر سرطانی ناشی از تنفس، جذب پوستی و بلعیدن را ارزیابی کردند و نشان دادند که مواجهه با فلزات سنگین سرب و کادمیوم از طریق بلعیدن، برای گروه سنی کودکان و بزرگسالان خطرات سلامتی بالایی دارد. Hu et al. (2012) به ارزیابی خطر سلامتی مواجهه با فلزات سنگین موجود در ذرات معلق و ریزگردهای شهر نانجینگ چین پرداختند. وی و همکارانش با استفاده از آنالیز ICP-MS، فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم، کبالت، کروم، مس، نیکل و سرب را شناسایی کردند. آنها دریافتند که خطر سرطان‌زایی فلزات آرسنیک، کروم، کبالت و کادمیوم، از طریق تنفس و جذب پوستی در حد قابل قبول است؛ اما خطر سرطان‌زایی فلز سرب از طریق بلعیدن بالاست. همچنین، وی و همکارانش نشان دادند که فلزات شناسایی شده، خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی از طریق تنفس، بلعیدن و جذب پوستی ایجاد نمی‌کنند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان زنجان واقع در شمال غربی ایران، به دلیل دارا بودن منابع معدنی متعدد و توسعه صنایع وابسته به آنها، به شدت به فلزات سنگین آلوده است (Parizanganeh et al., 2010). شهرک صنعتی ناجی زنجان با فعالیت ۸۰ واحد ریخته‌گری مس و آلیاژهای آن و مساحت ۱۵۰

عنوان آلاینده‌های خطرناک هوا شناسایی شدند. پس از گذشت ۱۰ سال (سال ۱۹۸۰) چهار ترکیب وینیل کلراید، بنزن، رادیونوکلئیدها و آرسنیک غیر آلی به لیست آلاینده‌های خطرناک هوا اضافه شده و در سال ۱۹۸۴، انتشار کک ناشی از مشعل‌ها نیز به این لیست اضافه شد. نهایتاً در سال ۱۹۹۰، ۱۸۹ آلاینده به‌عنوان آلاینده‌های خطرناک هوا شناسایی شدند که شامل هیدروکربن‌های آلیفاتیک و حلقوی (اشباع و غیر اشباع)، ترکیبات آروماتیک (شامل هیدروکربن‌های آروماتیک، ترکیبات فنول و فتالات)، ترکیبات آلی نیتروژن‌دار (شامل نیتروآروماتیک)، ترکیبات آلی اکسیژن‌دار (شامل الکل‌ها، آلدئیدها، کربوکسیلیک اسید، کربونیل غیر اشباع آلفا و بتا، استرها، اترها و کتون‌ها و اکسیدها)، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها، مواد معدنی (شامل فلزات) و سولفات‌ها می‌باشد (Agency, 2009; Caldwell et al., 1998; Vandenberg, 2013). اثرات منفی ناشی از فلزات سنگین به‌عنوان یکی از آلاینده‌های خطرناک هوا، مورد توجه بسیاری از افراد قرار گرفته است. این فلزات، شامل عناصری با وزن اتمی ۶۳/۵-۲۰۰/۶ و وزن مخصوص بیشتر از ۵ می‌باشند (Lakherwal, 2014). انتشار فلز مس در هوا به‌عنوان یکی از آلاینده‌های خطرناک هوا، می‌تواند ناشی از منابع طبیعی (گردو غبار، گرده گیاهان، آتشفشان‌ها، آتش‌سوزی جنگل‌ها، نمک دریا) و منابع انسانی (تولید فلزات غیر آهنی، تولید آهن و فولاد، ذوب مس، زباله‌سوزهای شهری، احتراق زغال سنگ و چوب، تولید کودهای فسفات‌دار و ...) باشد (Davies and Bennett, 1985). سرنوشت مس موجود در ذرات معلق و رهاسازی آن در اتمسفر، بستگی به اندازه ذرات معلق، سرعت باد و ویژگی‌های منبع انتشار دارد. ته‌نشین شدن ذرات معلق بزرگ (بزرگتر از ۵ میکرون) در اثر نیروی گرانش، نسبت به پراکنش آن‌ها بیشتر است، از طرفی فرایندهای وابسته به احتراق از جمله ذوب مس، ذراتی با قطر کمتر از ۱ میکرون منتشر می‌کنند و ممکن است

جهت باد غالب منطقه بر روی پراکنش آنها در مطالعات دیگر (Fotovvat, 2021)، ایستگاه‌های ۱ تا ۵ در موقعیت‌های مختلف شهرک (مرکز، شرق، غرب، شمال و جنوب) و ایستگاه‌های ۶ تا ۱۰ (مناطق مسکونی) نیز در اطراف شهرک انتخاب شدند. با توجه به وجود مناطق مرتفع (کوه‌ها) در جنوب شهرک، امکان پراکنش آلاینده‌ها در این جهت بسیار کمتر است. همچنین، با توجه به اهمیت بررسی اثرات بهداشتی آلاینده‌ها در این بررسی و عدم وجود منطقه مسکونی در جنوب شهرک، ایستگاهی در جنوب شهرک انتخاب نشده است (شکل ۱).

هکتار، در فاصله ۱۵ کیلومتری از شهر زنجان قرار گرفته است. با بررسی اطلاعات میزان گاز مصرفی واحدهای شهرک صنعتی ناجی، مشخص شد که در فصل تابستان و پاییز، مصرف گاز بسیار پایین است و حتی برخی از واحدها در این دو فصل، فعالیتی ندارند. بنابراین، در بهمن سال ۱۳۹۹ (نماینده فصل زمستان) و اردیبهشت سال ۱۴۰۰ (نماینده فصل بهار)، نمونه‌برداری از کل ذرات معلق هوا توسط دستگاه‌های نمونه‌برداری هوا طی ۴۸ ساعت صورت گرفت. به دلیل مدل‌سازی پراکنش ذرات معلق منتشره از شهرک صنعتی ناجی و بررسی تأثیر



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری
Fig. 1- Location of sampling stations

درپوشی جهت حفاظت نمونه‌ها از باران و وزش باد می‌باشد و برای درزبندی کامل از واشرهای PVC و اورینگ‌های مناسب استفاده شده است (Rafiei, 2019). در این بررسی، دبی دستگاه‌های نمونه‌برداری هوا بر اساس استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، ۱۶/۶۷ لیتر بر دقیقه تنظیم شد (Agency, 2017) و فیلترهای ممبران تغلونی آب‌گریز با قطر ۴۷ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. فیلترهای تهیه شده، توسط ترازوی سارتوریوس (دقت ۰/۰۰۰۰۱ گرم) توزین و در نگهدارنده‌های فیلتر دستگاه‌های نمونه‌برداری تعبیه شدند. پس از نمونه‌برداری، فیلترها جهت توزین به

روش نمونه‌برداری

دستگاه نمونه‌برداری هوای مورد استفاده در این بررسی، شامل پمپ نمونه‌برداری با حداکثر دبی نمونه‌برداری ۱۶/۶۷ لیتر بر دقیقه، موتور پمپ با قدرت ۷۵۰ وات، گازمتر اولتراسونیک دارای سنسور دما، فن جهت خنک‌کاری دستگاه، نمایشگر حجم هوا و دبی می‌باشد. همچنین این دستگاه به تایمری مجهز است که به هنگام نمونه‌برداری طولانی مدت، برنامه استراحت برای دستگاه تنظیم می‌شود. جنس نگهدارنده‌های فیلتر دستگاه مذکور، آلومینیومی بوده و مجهز به توری مناسب از جنس استیل ضد زنگ می‌باشد. همچنین، نگهدارنده‌ها مجهز به

ادامه جدول ۱- حد تشخیص فلزات شناسایی شده توسط آنالیز

ICP-MS
Table 1. Cont. Detection limits of metals identified by ICP-MS analysis

حد تشخیص بر حسب $\mu g/l$ Detection Limit in $\mu g/l$	فلز Metal
1	مس Copper
10	آهن Iron
1	سرب Lead
1	آنتیموان Antimony
1	وانادیم Vanadium
10	روی Zinc

جهت محاسبه غلظت فلزات شناسایی شده در نمونه- برداری توسط آنالیز طیفسنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی مدل Agilent series 4500، از رابطه ۱ استفاده شده است (Mehrizi et al., 2017).

$$C = \frac{G_s \times V}{t \times D} \quad (1)$$

که در آن، C غلظت فلز در نمونه هوا بر حسب $\mu g/m^3$ ، G_s غلظت فلز در محلول فلزی حاصل از هضم بر حسب $\mu g/l$ ، V حجم رقت بر حسب ml ، t مدت زمانی که فیلتر در معرض هوا قرار داشته است، بر حسب min ، D دبی بر حسب l/min می‌باشد.

ارزیابی مواجهه فلزات سنگین منتشره بر سلامتی انسان غلظت بالای فلزات سنگین در محیط زیست، می‌تواند خطر اثرات نامطلوب سلامتی انسان را افزایش دهد (Miri et al., 2016). در این بررسی، به ارزیابی خطر سلامتی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا میزان دریافت آلاینده ($mg/kg/day$) ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان، به ترتیب به کمک روابط ۲، ۳ و ۴ محاسبه می‌شوند؛ که در آن CS ، غلظت فلز سنگین در نمونه ذرات معلق هوا (mg/m^3 و یا mg/kg) است. مقادیر

آزمایشگاه منتقل شده و مطابق استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا، به منظور برقراری تعادل با شرایط دمایی و رطوبت آزمایشگاه پس از ۲۴ ساعت وزن سنجی صورت گرفت (Agency, 2016). جهت جلوگیری از هرگونه آلودگی فیلترها، پس از توزین فوراً به ظروف دربسته‌ای منتقل شدند (Agency, 1999). هر یک از نمونه‌ها توسط ۲۰ میلی لیتر ترکیب اسید نیتریک ۶۵ درصد و اسید هیدروکلریک ۳۷ درصد، ترکیب شدند. سپس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط قرار گرفته و حرارت دهی توسط هیتر در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد تا عمل هضم تکمیل شود. محلول حاصل، به بالن ۵۰ میلی لیتری منتقل شده و توسط آب مقطر به حجم رسانده شد (Zati-Maslehati et al., 2015).

محاسبه غلظت فلزات شناسایی شده در نمونه برداری

جهت شناسایی فلزات، از آنالیز ICP-MS مدل Agilent series 4500، استفاده شده است. خطای دستگاه مذکور کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. حد تشخیص فلزات شناسایی شده در جدول ۱ (Zarazma, 2021) مشخص شده است. راستی آزمایی و اعتبارسنجی نتایج آنالیز، با استفاده از نمونه‌های استاندارد مرجع گواهی شده بین المللی (CRM) و نمونه مرجع (RM) انجام شده است (Zarazma, 2021).

جدول ۱- حد تشخیص فلزات شناسایی شده توسط آنالیز ICP-MS

حد تشخیص بر حسب $\mu g/l$ Detection Limit in $\mu g/l$	فلز Metal
1	نقره Silver
1	آرسنیک Arsenic
1	کادمیوم Cadmium
10	کروم Chromium
1	مس Copper

$$AD_{ing} = \frac{CS \times IR_{ing} \times EF \times ED \times CF}{AT \times BW} \quad (3)$$

پارامترهای روابط ۲، ۳ و ۴، در جدول ۲ ارائه شده است (Gerba, 2006; Mohammadi-Moghadam *et al.*,)

$$AD_{derm} = \frac{CS \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{AT \times BW} \quad (4)$$

$$AD_{inh} = \frac{CS \times IR_{inh} \times EF \times ED}{AT \times BW} \quad (2)$$

(2020).

جدول ۲- پارامترهای لازم جهت محاسبه میزان دریافت آلاینده ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی

Table 2. Parameters required for calculating the amount of contaminant intake due to inhalation, ingestion and dermal absorption

بزرگسالان Adult	کودکان Children	واحد Unit	پارامتر Parameter	نماد Symbol
20	10	m ³ /day	نرخ تنفس Inhalation rate	IR _{inh}
100	200	mg/day	نرخ بلعیدن Ingestion rate	IR _{ing}
350	350	day/year	فرکانس مواجهه Exposure frequency	EF
30	6	year	مدت زمان مواجهه Exposure duration	ED
10950	2190	day	زمان متوسط Average time	AT
70	15	kg	وزن بدن Body weight	BW
10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	kg/mg	ضریب تبدیل Conversion factor	CF
4350	1600	cm ²	سطح پوست Skin surface area	SA
0.2	0.2	mg/cm ²	ضریب چسبندگی خاک Soil adherence factor	AF
0.001	0.001	-	ضریب جذب پوستی Dermal Absorption factor	ABS

جدول ۳- مقادیر RfD بر حسب mg/kg/day

Table 3. RfD values (mg/kg/day) for the studied heavy metals

پوستی Dermal	بلعیدن Ingestion	تنفس Inhalation	فلز Metal
0.0009	0.005	-	نقره Silver
0.0003	0.0003	0.000301	آرسنیک Arsenic
0.00001	0.001	0.001	کادمیوم Cadmium
1.5	1.5	-	کروم III Chromium III
0.012	0.04	0.0402	مس Copper
0.7	0.7	0.7	آهن Iron
0.00525	0.0035	0.00352	سرب Lead
0.000008	0.0004	-	آنتیمون Antimony

جهت ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های غیرسرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی هر یک از فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا، شاخص خطر HQ مطابق رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Mohammadi-Moghadam *et al.*,) (2020).

$$HQ = \frac{AD}{RfD} \quad (5)$$

که در آن، HQ شاخص خطر، AD میزان دریافت آلاینده بر حسب mg/kg/day RfD میزان مرجع دریافت آلاینده بر حسب mg/kg/day می‌باشد. مقادیر RfD در جدول ۳ (Affaairs, 2010; Ferreira-Baptista) (and De Miguel, 2005; Agency, 2011) ارائه شده است.

آلاینده بر حسب $CSF \text{ mg/kg/day}$ فاکتور شیب سرطان بر حسب $(\text{mg/kg.day})^{-1}$ می‌باشد. مقادیر CSF ، در جدول ۴ (Kamunda et al., 2016; Ferreira, ۲۰۰۵) ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر CSF بر حسب $(\text{mg/kg.day})^{-1}$
Table 4. CSF values $(\text{mg/kg.day})^{-1}$

پوستی Dermal	بلعیدن Ingestion	تنفس Inhalation	فلز Metal
1.5	3.66	15.1	آرسنیک Arsenic
-	-	6.3	کادمیوم Cadmium
-	0.0085	0.042	سرب Lead

خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از مجموع انواع مواجهه با فلزات سنگین (تنفس، بلعیدن و جذب پوستی)، از رابطه ۸ محاسبه می‌شود (Kamunda et al., 2016).

$$Risk_{total} = \sum Risk = Risk_{inh} + Risk_{ing} + Risk_{derm} \quad (۸)$$

نتایج و بحث

مقایسه نتایج با سایر مطالعات مشابه

جهت بررسی صحت نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی کل ذرات معلق، مدل‌سازی پراکندگی ذرات معلق توسط AERMOD View 8.9.0 انجام شد و پارامترهای آماری R^2 ، FB ، $NMSE$ و MG محاسبه شدند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر با سایر مطالعات مشابه برای کل ذرات معلق مقایسه شدند که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- مقایسه نتایج آماری پژوهش حاضر با سایر مطالعات مشابه (کل ذرات معلق)

Table 5. Comparison of statistical results of the present study with other similar studies (total suspended particles)

MG	$NMSE$	FB	R^2	مطالعه Study
1.07	0.727	0.677	0.7463	پژوهش حاضر Current study January, 2021
1.06	0.492	0.562	0.5758	پژوهش حاضر Current study May, 2021

ادامه جدول ۳- مقادیر RfD بر حسب mg/kg/day
Table 3. Cont. RfD values (mg/kg/day) for the studied heavy metals

پوستی Dermal	بلعیدن Ingestion	تنفس Inhalation	فلز Metal
0.007	0.00504	0.007	وانادیم Vanadium
0.06	0.3	0.3	روی Zinc

شاخص خطر HI ، با در نظر گرفتن مجموع شاخص خطر تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا تعریف شده است، محاسبه می‌شود (رابطه ۶). اگر مقدار HI بیشتر از ۱ باشد، خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا وجود دارد و اگر مقدار HI کمتر از ۱ باشد، مواجهه با فلزات سنگین هوا، خطری برای سلامت افراد جامعه ایجاد نمی‌کند (Gerba, 2006; Onyele and Anyanwu, 2018).

$$HI = \sum HQ = HQ_{inh} + HQ_{ing} + HQ_{derm} \quad (۶)$$

ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی هر یک از فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا، از رابطه ۷ محاسبه می‌شود (Kamunda et al., 2016).

$$Risk_{pathway} = AD \times CSF \quad (۷)$$

که در آن، $Risk_{pathway}$ خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی (ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی)، AD میزان دریافت

ادامه جدول ۵- مقایسه نتایج آماری پژوهش حاضر با سایر مطالعات مشابه (کل ذرات معلق)

Table 5. Cont. Comparison of statistical results of the present study with other similar studies (total suspended particles)

MG	NMSE	FB	R ²	مطالعه Study
-	0.818	0.774	0.6996	Khazini <i>et al.</i> , 2021
-	0.045	0.164	-	Mohan <i>et al.</i> , 2011
1.02	0.040	0.000	0.7340	Huertas <i>et al.</i> , 2012
0.06	14.150	-1.740	0.7340	
0.05	13.920	-1.730	0.6140	
0.75 to 1.25	2.5 <	- 2 to +2	0 to 1	محدوده استاندارد Standard range (Khazini <i>et al.</i> , 2021; Fadavi <i>et al.</i> , 2016)
1	0	0	1	مقدار ایده‌آل Ideal value (Hanna <i>et al.</i> , 2001)

نتایج پارامتر آماری *MG* در پژوهش حاضر، با یک مورد از نتایج پژوهش (Huertas *et al.*, 2012) ($MG=1.02$) از همبستگی خوبی برخوردار است.

غلظت فلزات شناسایی شده در نمونه‌برداری و

مقایسه با مقادیر استاندارد

جهت تعیین غلظت فلزات شناسایی شده نمونه‌برداری برای هر دو فصل زمستان و بهار، محاسبات طبق رابطه ۱ انجام شده و با مقادیر استانداردهای ملی کیفیت هوای محیط (NAAQS) ویژه مناطق صنعتی و مناطق روستایی به صورت جداگانه مقایسه شده است (جدول ۶ و ۷). نتایج حاصل از مقایسه غلظت فلزات سنگین شناسایی شده‌ی مناطق صنعتی در فصل زمستان و بهار با مقادیر NAAQS، نشان می‌دهد که غلظت فلزات نقره، آرسنیک، کادمیوم، آنتیموان و وانادیم در تمامی ایستگاه‌ها پایین‌تر از استاندارد؛ غلظت فلزات کروم و آهن در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از استاندارد و غلظت فلزات مس، سرب و روی در برخی از ایستگاه‌ها بالاتر از استاندارد می‌باشد. همچنین، نتایج حاصل از مقایسه غلظت فلزات سنگین شناسایی شده در مناطق روستایی در فصل زمستان و بهار با مقادیر استاندارد، نشان می‌دهد که غلظت فلزات نقره، کادمیوم، کروم، مس، آهن، آنتیموان، وانادیم و روی در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از استاندارد و غلظت فلزات آرسنیک و سرب در برخی از ایستگاه‌ها بالاتر از استاندارد می‌باشد. با مقایسه غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های مختلف، مشخص است که در فصل زمستان، بیشترین مقادیر فلزات

بر اساس جدول ۵، مشخص است که مقادیر پارامتر آماری R^2 حاصل از پژوهش در بهمن ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰، به ترتیب ۰/۷۴۶۳ و ۰/۵۷۵۸ به دست آمده است. به طور کلی می‌توان گفت، مقادیر پارامتر آماری R^2 حاصل از پژوهش حاضر با سایر مطالعات، از همبستگی خوبی برخوردار است. مقادیر پارامتر آماری *FB* حاصل از پژوهش در فصل زمستان و بهار، به ترتیب ۰/۶۷۷ و ۰/۵۶۲ به دست آمده است که در محدوده استاندارد ۲- تا ۲+ قرار دارند و هر چه مقادیر این پارامتر به صفر نزدیک‌تر باشد؛ بهتر است. با مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با سایر مطالعات مشابه، مشخص می‌شود که مقادیر به دست آمده، قابل قبول هستند و تنها در یکی از پژوهش‌های (Huertas *et al.*, 2012)، مقدار ایده‌آل *FB* (صفر) حاصل شده است. مقادیر پارامتر آماری *NMSE* حاصل از پژوهش در فصل زمستان و بهار، به ترتیب ۰/۷۲۷ و ۰/۴۹۲ به دست آمده است که در محدوده استاندارد کمتر از ۱/۵ قرار دارند و مقدار پارامتر آماری *NMSE* حاصل از پژوهش در فصل بهار، به مقدار ایده‌آل (صفر) نزدیک‌تر می‌باشد. همچنین، نتایج پارامتر آماری *NMSE* در پژوهش حاضر، با پژوهش (Khazini *et al.*, 2021) ($NMSE=0.774$) از همبستگی خوبی برخوردار است. مقادیر پارامتر آماری *MG* حاصل از پژوهش در فصل زمستان و بهار، به ترتیب ۱/۰۷ و ۱/۰۶ به دست آمده است که در محدوده استاندارد ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ قرار دارند و نیز به مقدار ایده‌آل (یک) بسیار نزدیک می‌باشند. همچنین،

فصل بهار نیز، بیشترین مقادیر فلزات آرسنیک، کادمیوم و سرب در ایستگاه ۴، بیشترین مقادیر فلزات کروم، وانادیم و آهن در ایستگاه ۷، بیشترین مقادیر فلزات آنتیموان و روی، در ایستگاه ۵ و بیشترین مقادیر فلزات نقره و مس به ترتیب در ایستگاه‌های ۹ و ۳ شناسایی شده است.

نقره، آرسنیک، کادمیوم، مس، آنتیموان و روی در ایستگاه ۲، بیشترین مقادیر فلزات کروم و آهن در ایستگاه ۷ و بیشترین مقادیر فلز سرب در ایستگاه ۵ شناسایی شده است. همچنین فلز سنگین وانادیم، در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۴، ۵، ۷، ۸ و ۹ به مقدار یکسان شناسایی شده است. در

جدول ۶- غلظت فلزات سنگین در مناطق صنعتی و مقایسه با مقادیر استاندارد ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)Table 6. Concentrations of heavy metals in industrial areas and comparison with standard values ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ایستگاه ۵ Station 5	ایستگاه ۴ Station 4	ایستگاه ۳ Station 3	ایستگاه ۲ Station 2	ایستگاه ۱ Station 1	استاندارد ملی هوای محیط* National ambient Air Quality standards*	زمان نمونه‌برداری Sampling time	فلز Metal
0.00451	0.00403	0.00109	0.01197	0.00456	0.037	January, 2021	نقره
0.00315	0.00339	0.00341	0.00518	0.00308		May, 2021	Silver
0.03255	0.0217	0.00109	0.04035	0.00217	7.6	January, 2021	آرسنیک
0.01323	0.05611	0.02858	0.03102	0.01112		May, 2021	Arsenic
0.01472	0.01087	0.00535	0.02977	0.00438	0.6	January, 2021	کادمیوم
0.03874	0.44488	0.02249	0.01724	0.03137		May, 2021	Cadmium
4.09070	4.60069	0.81380	4.95443	2.75608	0.4	January, 2021	کروم
8.68056	7.26997	18.91580	18.12066	23.23049		May, 2021	Chromium
0.25391	0.15842	0.04712	1.16753	0.01951	0.87	January, 2021	مس
0.59672	0.36892	0.66189	0.64019	0.20616		May, 2021	Copper
37.21788	48.71962	11.82726	34.32075	31.90104	7.0	January, 2021	آهن
51.75781	45.68142	233.28990	111.76220	141.05900		May, 2021	Iron
1.89887	0.71615	0.09766	1.21528	0.06510	0.76	January, 2021	سرب
0.17470	0.20182	0.06869	0.04108	0.01214		May, 2021	Lead
0.01971	0.01911	0.00225	0.03559	0.00679	0.55	January, 2021	آنتیموان
0.01168	0.01097	0.00498	0.00228	0.00149		May, 2021	Antimony
0.02170	0.02170	0.01085	0.02170	0.02170	0.5	January, 2021	وانادیم
0.01085	0.01085	0.45253	0.02170	0.03255		May, 2021	Vanadium
4.67665	2.32204	0.54253	7.03125	0.47743	5.0	January, 2021	روی
8.56120	5.34939	1.69271	4.91536	0.42318		May, 2021	Zinc

* (Geiger and Cooper, 2010)

جدول ۷- غلظت فلزات سنگین در مناطق روستایی و مقایسه با مقادیر استاندارد ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)Table 7. Concentrations of heavy metals in rural areas and comparison with standard values ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ایستگاه ۱۰ Station 10	ایستگاه ۹ Station 9	ایستگاه ۸ Station 8	ایستگاه ۷ Station 7	ایستگاه ۶ Station 6	استاندارد ملی هوای محیط* National ambient air quality standards*	زمان نمونه‌برداری Sampling time	فلز Metal
0.00448	0.00109	0.00265	0.00438	0.00109	0.0005	January, 2021	نقره
0.00263	0.00584	0.00294	0.00198	0.00424		May, 2021	Silver
0.01085	0.00109	0.01085	0.00109	0.00109	0.002	January, 2021	آرسنیک
0.01366	0.02898	0.02329	0.00726	0.04648		May, 2021	Arsenic
0.00575	0.00646	0.00432	0.00493	0.00454	0.001	January, 2021	کادمیوم
0.02137	0.01574	0.01275	0.02100	0.02175		May, 2021	Cadmium
3.33116	1.59505	0.40148	6.22830	0.91149	0.002	January, 2021	کروم
28.32031	9.33160	41.66667	62.93403	1.08507		May, 2021	Chromium
0.06252	0.04134	0.03916	0.04485	0.03373	0.01	January, 2021	مس
0.16276	0.06510	0.18446	0.30338	0.04340		May, 2021	Copper
30.16493	18.55469	35.26476	54.90541	11.71875	0.3	January, 2021	آهن
180.12150	57.83420	266.92710	404.73090	5.20833		May, 2021	Iron

ادامه جدول ۷- غلظت فلزات سنگین در مناطق روستایی و مقایسه با مقادیر استاندارد ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)Table 7. Cont. Concentrations of heavy metals in rural areas and comparison with standard values ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ایستگاه ۱۰ Station 10	ایستگاه ۹ Station 9	ایستگاه ۸ Station 8	ایستگاه ۷ Station 7	ایستگاه ۶ Station 6	استاندارد ملی هوای محیط* National ambient air quality standards*	زمان نمونه‌برداری Sampling time	فلز Metal
0.18446	0.17361	0.21701	0.15191	0.02170	0.02	January, 2021	سرب
0.01287	0.00853	0.00582	0.00973	0.00743		May, 2021	Lead
0.00493	0.00218	0.00497	0.00810	0.00109	<0.001	January, 2021	آنتیموان
0.00115	0.00155	0.00109	0.00109	0.00149		May, 2021	Antimony
0.01085	0.02170	0.02170	0.02170	0.01085	0.0008	January, 2021	وانادیم
0.04340	0.01085	0.06510	0.09766	0.01085		May, 2021	Vanadium
1.22612	1.83377	0.90061	0.93316	0.7053	0.006	January, 2021	روی
0.35807	0.33637	0.29297	0.50998	0.39063		May, 2021	Zinc

* (Geiger and Cooper, 2010)

شاخص خطر HI را در تمام ایستگاه‌های مناطق صنعتی و روستایی به جز ایستگاه‌های ۱ و ۷ دارد. در ایستگاه‌های ۱ و ۷، فلز سنگین آهن بیشترین مقدار شاخص خطر را دارد. در اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، بیشترین مقدار شاخص خطر HI در ایستگاه‌های ۱، ۲، ۳، ۵، ۷ و ۸ مربوط به فلز آهن؛ در ایستگاه‌های ۶، ۹ و ۱۰ مربوط به فلز آرسنیک و در ایستگاه ۴ مربوط به فلز کادمیوم می‌باشد.

با وجود اینکه شاخص HI در تمامی ایستگاه‌ها مقادیر کمتر از ۱ دارد؛ اما به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که مقادیر شاخص خطر HI به‌دست‌آمده برای گروه سنی کودکان، نسبت به گروه سنی بزرگسالان بیشتر می‌باشد؛ در نتیجه کودکان در مواجهه با فلزات سنگین هوا، بیشتر در معرض خطر ابتلا به انواع بیماری‌های غیرسرطانی قرار دارند.

ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی مواجهه با فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا

خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین آرسنیک، کادمیوم و سرب منتشره از شهرک صنعتی ناجی، برای مناطق صنعتی و روستایی برای دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان، بر اساس روابط ۷ و ۸ محاسبه شدند.

مقادیر فاکتور شیب سرطان (CSF) فلز آرسنیک، برای انواع مواجهه (تنفس، بلعیدن و جذب پوستی) موجود است. لذا، مقادیر $Risk_{total}$ گزارش شده، ناشی از مجموع

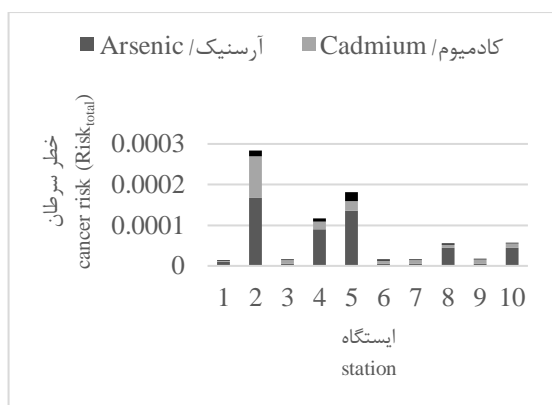
ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی

مواجهه با فلزات سنگین موجود در ذرات معلق هوا

شاخص خطر HI جهت ارزیابی ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین نقره، آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، آهن، آنتیموان، وانادیم و روی منتشره از شهرک صنعتی ناجی، برای مناطق صنعتی و روستایی در فصل زمستان و بهار و برای دو گروه سنی کودکان و بزرگسالان، بر اساس روابط ۵ و ۶ محاسبه شدند. بر اساس نتایج محاسبات، بیشترین مقادیر شاخص خطر HI، در بهمن ماه ۱۳۹۹ ناشی از مواجهه کودکان با فلز سنگین سرب ($0/45254$) و در اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، ناشی از مواجهه کودکان با فلز سنگین آهن ($0/39781$) می‌باشد. اما همانطور که ذکر شد؛ در صورتی که $HI > 1$ باشد، خطر ابتلا به بیماری‌های غیرسرطانی ناشی از تنفس، بلعیدن و جذب پوستی فلزات سنگین هوا وجود دارد و اگر $HI < 1$ باشد؛ مواجهه با فلزات سنگین هوا، خطری برای سلامت افراد جامعه ایجاد نمی‌کند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر شاخص خطر HI، در هر دو نوبت نمونه‌برداری یعنی بهمن ماه ۱۳۹۹ و اردیبهشت ماه ۱۴۰۰، مقادیر کمتر از ۱ دارد؛ در نتیجه خطر ابتلا به بیماری‌های غیرسرطانی ناشی از مواجهه با فلزات سنگین، سلامت افراد منطقه مورد مطالعه را تهدید نمی‌کند. محاسبات نشان می‌دهد که در بهمن ماه ۱۳۹۹، فلز سنگین سرب بیشترین مقدار

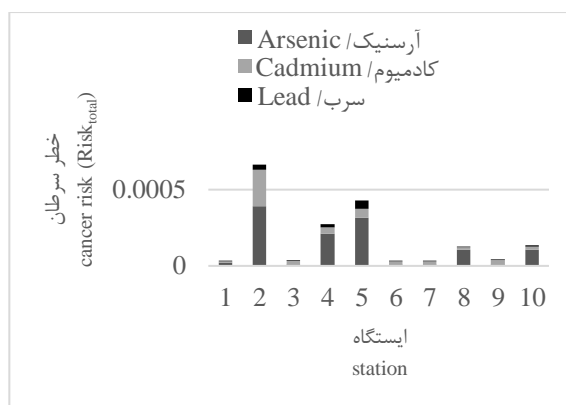
خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از فلز سنگین کادمیوم در فصل زمستان در ایستگاه ۲ وجود دارد. فلز سنگین سرب در فصل زمستان، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در منطقه مورد مطالعه را به دنبال ندارد.

با توجه به اینکه جهت باد غالب منطقه در فصل زمستان، شرقی-جنوب شرقی می‌باشد؛ لذا پراکنش ذرات معلق نیز در همین جهت صورت می‌گیرد (Fotovvat, 2021). بیشترین خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در ایستگاه ۲ (پایین دست شهرک به هنگام وزش باد در فصل زمستان) و ناشی از فلز مواجهه با فلز سنگین آرسنیک می‌باشد. مقادیر $Risk_{total}$ آرسنیک برای کودکان و بزرگسالان در ایستگاه مذکور، به ترتیب ۰/۰۰۰۳۹۰ و ۰/۰۰۰۱۶۷ می‌باشد. همچنین، مواجهه با فلز آرسنیک از طریق تنفس، بیشترین سهم (۹۹/۹۹٪) در خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی دارد.



انواع مواجهه (تنفس، بلعیدن و جذب پوستی) با فلز آرسنیک می‌باشد. فاکتور شیب سرطان (CSF) فلز کادمیوم، تنها برای مواجهه از طریق تنفس موجود است. بنابراین، مقادیر $Risk_{total}$ گزارش شده، ناشی از مواجهه تنفسی فلز کادمیوم می‌باشد. فاکتور شیب سرطان (CSF) فلز سرب، برای مواجهه از طریق تنفس و بلعیدن موجود است. لذا، مقادیر $Risk_{total}$ گزارش شده، ناشی از مواجهه با فلز سرب از طریق تنفس و بلعیدن می‌باشد.

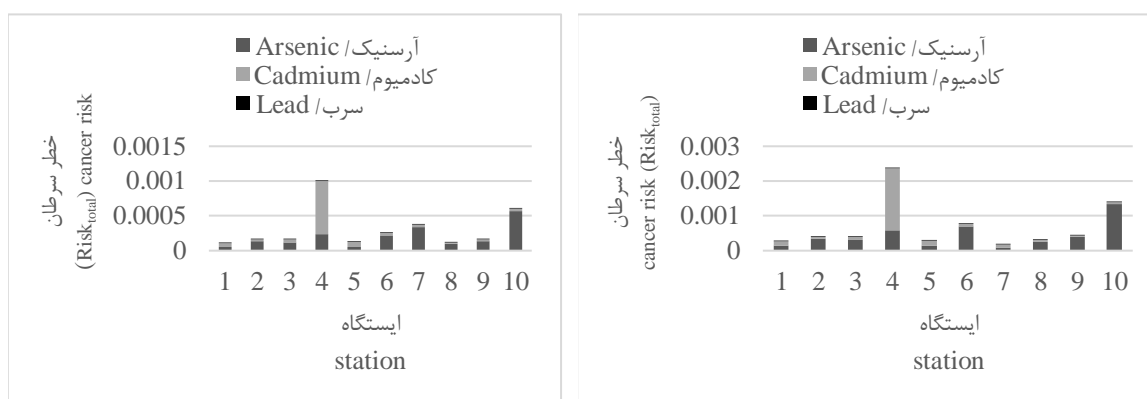
آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا، محدوده قابل قبول ۰/۰۰۰۰۱-۰/۰۰۰۰۰۱ را برای خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی تعیین کرده است (Kamunda et al., 2016). بر این اساس و با توجه به نتایج حاصل (شکل ۲) مشخص شد که در فصل زمستان، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از فلز سنگین آرسنیک، در ایستگاه‌های ۲، ۴، ۵، ۸ و ۱۰ وجود دارد. همچنین



شکل ۲- مقادیر $Risk_{total}$ هر یک از ایستگاه‌ها در بهمن ۱۳۹۹ (الف) کودک ب) بزرگسال
Fig. 2- $Risk_{total}$ values of each station in January 2021 in a) child b) adult

در فصل بهار، علاوه بر باد غالب منطقه که در جهت شرقی-جنوب شرقی می‌باشد، بادهایی در جهت جنوب غربی و شمال غربی با سرعت بالاتری وجود دارد (Fotovvat, 2021)؛ لذا بیشترین خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در ایستگاه ۴ (پایین دست شهرک به هنگام وزش باد در فصل بهار) و ناشی از مواجهه تنفسی فلز سنگین کادمیوم می‌باشد. مقادیر $Risk_{total}$ کادمیوم برای کودکان و بزرگسالان در ایستگاه مذکور، به ترتیب ۰/۰۰۰۱۷۹۲ و ۰/۰۰۰۷۶۸ می‌باشد.

بر اساس محدوده قابل قبول خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی مذکور و نتایج شکل ۳، مشخص است که در فصل بهار نیز خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از فلز سنگین آرسنیک، در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه ۷ وجود دارد. همچنین خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از فلز سنگین کادمیوم در فصل بهار در ایستگاه‌های ۱، ۴ و ۵ وجود دارد. فلز سنگین سرب در فصل بهار، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در منطقه مورد مطالعه را به دنبال ندارد.



شکل ۳- مقادیر $Risk_{total}$ هر یک از ایستگاه‌ها در اردیبهشت ۱۴۰۰ (الف) کودک (ب) بزرگسال
Fig. 3- $Risk_{total}$ values of each station in May 2021 in a) child b) adult

ممکن است آلاینده‌های خطرناکی نیز تولید کنند. در بهمن ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰، نمونه‌برداری از کل ذرات معلق هوای شهرک صنعتی ناجی شهر زنجان و مناطق مجاور آن (۱۰ ایستگاه) انجام شده و با استفاده از آنالیز طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی فلزات سنگین نقره، آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، آهن، سرب، آنتیموان، وانادیم و روی شناسایی شدند. نتایج حاصل از مقایسه غلظت فلزات سنگین شناسایی شده، با استانداردهای ملی کیفیت هوای محیط، نشان داد که غلظت فلزات کروم و آهن در تمامی ایستگاه‌های شهرک صنعتی ناجی بالاتر از استاندارد و غلظت فلزات نقره، کادمیوم، کروم، مس، آهن، آنتیموان، وانادیم و روی در تمامی ایستگاه‌های مجاور شهرک صنعتی مذکور بالاتر از استاندارد می‌باشد. همچنین، نتایج ارزیابی مواجهه فلزات سنگین منتشره بر سلامتی انسان، نشان داد که خطر ابتلا به بیماری‌های غیر سرطانی، افراد منطقه مورد مطالعه را تهدید نمی‌کند؛ اما خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از فلز سنگین آرسنیک و کادمیوم در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی بالا است.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی سازمان صنایع کوچک و شهرک‌های صنعتی ایران انجام شده است؛ لذا کمال تقدیر و تشکر را از حمایت و همکاری این سازمان داریم. همچنین از همکاری صمیمانه عوامل شهرک صنعتی ناجی زنجان و سازمان حفاظت محیط‌زیست استان زنجان سپاسگزاریم.

بر اساس نتایج شکل ۲ و ۳، مشخص است که مقادیر $Risk_{total}$ به‌دست‌آمده در هر دو فصل زمستان و بهار، برای گروه سنی کودکان، بیشتر از گروه سنی بزرگسالان می‌باشد؛ لذا کودکان در مواجهه با فلزات سنگین هوا، بیشتر در معرض خطر ابتلا به انواع بیماری‌های سرطانی قرار دارند. همچنین، با مقایسه نتایج حاصل ارزیابی خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در دو فصل بهار و زمستان، مشخص می‌شود که در فصل بهار، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از مواجهه با فلزات سنگین آرسنیک و کادمیوم در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه ۲ نسبت به فصل زمستان بیشتر است؛ اما در فصل بهار، خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی ناشی از مواجهه با فلز سنگین سرب در تمامی ایستگاه‌ها کمتر می‌باشد.

بدیهی است که با افزایش فاصله از شهرک صنعتی، غلظت ذرات معلق منتشره از آن کاهش می‌یابد. در نتیجه انتظار می‌رود که خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی کمتر شود. این در حالی است که خطر ابتلا به بیماری‌های سرطانی در برخی از ایستگاه‌های خارج از شهرک صنعتی مقادیر بالایی دارند که می‌تواند به علت مسکونی بودن منطقه و وجود سایر منابع انتشار باشد.

نتیجه‌گیری

شهرک‌های صنعتی، به‌عنوان یکی از منابع تولید کننده آلودگی هوا هستند که بر اساس نوع فعالیت واحدهای آن،

- Barceloux, D.G. and Barceloux, D., 1999. Copper. *Journal of toxicology: clinical Toxicology*. 37(2), 217-230.
- Caldwell, J.C., Woodruff, T.J., Morello-Frosch, R. and Axelrad, D.A., 1998. Application of health information to hazardous air pollutants modeled in EPA's Cumulative Exposure Project. *Toxicology and Industrial Health*. 14 (3), 429-454.
- Davies, D. and Bennett, B., 1985. Exposure of man to environmental copper—An exposure commitment assessment. *Science of the total environment*. 46(1-4), 215-227.
- DEA, 2010. Framework for the management of contaminated land. Republic of South Africa, Department of Environmental Affairs, Cape Town.
- Fadavi, A., Abari, M.F. and Nadoushan, M.A., 2016. Evaluation of AERMOD for distribution modeling of particulate matters (Case study: Ardestan Cement Factory). *Int. J. Pharm. Res. Allied Sci*. 5(4), 262-270.
- Ferreira-Baptista, L. and De Miguel, E., 2005. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric environment*. 39(25), 4501-4512.
- Fotovvat, K., 2021. Investigation of type and amount of heavy metals emitted from Naji industrial town of Zanjan and determination of their distribution radius. Master Thesis. University of Tabriz, Iran. (In Persian with English abstract).
- Geiger, A. and Cooper. J., 2010. Overview of airborne metals regulations, exposure limits, health effects, and contemporary research. Environmental Protection Agency, Air Quality: Washington, DC, USA.
- Gerba, C., 2006. Chapter 14: risk assessment. *Environmental and pollution science*. 2, 553.
- Hanna, S.R., Egan, B.A., Purdum, J. and Wagler, J., 2001. Evaluation of the ADMS, AERMOD, and ISC3 dispersion models with the OPTEx, Duke Forest, Kincaid, Indianapolis and Lovett field datasets. *International Journal of Environment and Pollution*. 16(1-6), 301-314.
- Hu, X., Zhang, Y., Ding, Z., Wang, T., Lian, H., Sun, Y. and Wu, J. 2012. Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM2.5 in Nanjing, China. *Atmospheric environment*. 57, 146-152.
- Huertas, J.I., Huertas, M.E., Izquierdo, S. and González, E.D., 2012. Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. *Journal of environmental management*. 93(1), 121-129.
- Kamunda, C., Mathuthu, M. and Madhuku, M., 2016. Health risk assessment of heavy metals in soils from Witwatersrand Gold Mining Basin, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 13(7), 663.
- Khazini, L., Dehkharghanian, M. and Vaezehir, A., 2021. Dispersion and modeling discussion of aerosol air pollution caused during mining and processing of open-cast mines. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 1-12.
- Lakherwal, D., 2014. Adsorption of heavy metals: a review. *International journal of environmental research and development*. 4(1), 41-48.
- Macêdo, M.F.M. and Ramos, A.L.D., 2020. Vehicle atmospheric pollution evaluation using AERMOD model at avenue in a Brazilian capital

- city. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 13(3), 309-320.
- Martínez-Bravo, M. and Martínez-del-Río, J., 2020. Urban Pollution and Emission Reduction. *Sustainable Cities and Communities*. 905-915.
- Mehrizi, E., Biglari, H., Amiri, R., Baneshi, M.M., Mobini, M., Ebrahimzadeh, G., Zarei, A. and Narooie, M.R., 2017. Determine the important heavy metals in air dust of zahedan, Iran. *Pollut. Res.* 36, 474-480.
- Miri, M., Allahabadi, A., Ghaffari, H.R., Fathabadi, Z.A., Raisi, Z., Rezai, M. and Aval, M.Y., 2016. Ecological risk assessment of heavy metal (HM) pollution in the ambient air using a new bio-indicator. *Environmental science and pollution research*. 23(14), 14210-14220.
- Mohan, M., Bhati, S., Sreenivas, A. and Marrapu, P., 2011. Performance evaluation of AERMOD and ADMS-urban for total suspended particulate matter concentrations in megacity Delhi. *Aerosol and air quality research*, 11(7), 883-894.
- Mohammadi-Moghadam, F., Heidari, M., Farhadkhani, M., Sadeghi, M., Forouzandeh, S., Ahmadi, A. and Khabaz-Ghasemi, E., 2020. TSP, PM10, PM2.5, and PM1 in ambient air of Shahr-e Kord, Iran's rooftop; levels, characterisation and health risk assessment of particles-bound heavy metals. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 1-17.
- Onyele, O.G. and Anyanwu, E.D., 2018. Human health risk assessment of some heavy metals in a Rural Spring, Southeastern Nigeria. *Afr. J. Environ. Nat. Sci. Res.* 1(1), 15-23.
- Parizanganeh, A., Hajisoltani, P. and Zamani, A., 2010. Concentration, distribution and comparison of total and bioavailable metals in top soils and plants accumulation in Zanjan Zinc Industrial Town-Iran. *Procedia Environmental Sciences*. 2, 167-174.
- Rafiei, R., 2019. Experimental study of heavy metal concentrations in environmental dust emitted from the specialized town of Zinc and determination of the share of emission sources (Case study of Zanjan). Master Thesis. University of Tabriz, Iran. (In Persian with English abstract).
- Schroeder, W., Dobson, M., Kane, D. and Johnson, N., 1987. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. *Japca*. 37(11), 1267-1285.
- USEPA, 1999. Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati Ohio, 21.
- USEPA, 2009. Air Toxics Data Analysis Workbook. North Carolina.
- USEPA, 2011. Integrated risk information system. Environmental protection agency region I. Washington DC. 20460.
- USEPA, 2016. Quality Assurance Guidance Document 2.12.
- USEPA, 2017. List of designated reference and equivalent methods.
- Vandenberg, J. J., 2013. Hazardous air pollutants: approaches and challenges in identifying assessment priorities. *Air Pollution and Cancer*. 95.
- Von Schneidmesser, E., Stone, E.A., Quraishi, T.A., Shafer, M.M. and Schauer, J.J., 2010. Toxic metals in the atmosphere in Lahore, Pakistan. *Science of the Total Environment*. 408(7), 1640-1648.

Wang, X., Sato, T., Xing, B., Tamamura, S. and Tao, S., 2005. Source identification, size distribution and indicator screening of airborne trace metals in Kanazawa, Japan. *Journal of Aerosol Science*. 36(2), 197-210.

Zarazma, (accessed 19 April, 2021). <http://zarazma.com/>.

Zati-Maslehati, T., Sadat-Kariman, A., Abolhasani, E., Rafiei, M., 2015. What a chemical analysis lab expert needs to know about sample preparation. *Iranian Journal Of Laboratory Knowledge*. 4(8), 5. (In Persian with English abstract).

Zeng, Y., Cao, Y., Qiao, X., Seyler, B. C. and

Tang, Y., 2019. Air pollution reduction in China: Recent success but great challenge for the future. *Science of the Total Environment*. 663, 329-337.

Zheng, N., Liu, J., Wang, Q. and Liang, Z., 2010. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district. Northeast of China. *Science of the total environment*. 408(4), 726-733.





Environmental Sciences Vol.20 / No.3 / Autumn 2022

87-104

Original Article

Investigation of the concentration and health effects of heavy metals released from the industrial units of Naji Industrial Town

Kimia Fotovvat,¹ Leila_Khazini,^{1*} Yousefali Abedini² and Mohammadreza Yousefi³

¹ Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 2021.09.08 Accepted: 2022.02.08

Fotovvat, K., Khazini, L., Abedini, Y. and Yousefi, M., 2022. Investigation of the concentration and health effects of heavy metals released from the industrial units of Naji Industrial Town. *Environmental Sciences*. 20(3): 87-104.

Introduction: Today, with the expansion of the activity of industrial units, the concentration of pollutants in the air has increased and humans are exposed to them through inhalation, ingestion, and dermal absorption. Among all pollutants, heavy metals have received a great deal of attention from environmentalists due to their toxic nature. High concentrations of heavy metals in the environment can increase the risk of adverse effects on human health. Activity of copper casting units and its alloys made Naji Industrial Town of Zanjan as a main source of heavy metals in the atmosphere; therefore, evaluating the concentration and health effects of heavy metals emitted from the town is of particular importance.

Material and methods: To evaluate the concentration and health effects of heavy metals emission from the industrial units of Naji Industrial Town, sampling of total suspended particles in the town and its adjacent areas (10 stations) was performed in January and May 2021. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) was used to identify heavy metals. The risk of cancer and non-cancerous diseases due to respiration, ingestion and skin absorption of heavy metals in total suspended particles was also evaluated for both age groups of children and adults.

*Corresponding Author: Email Address. khazini@tabrizu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1091>
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.3.10.3>

Results and discussion: In this analysis heavy metals e.g. silver, arsenic, cadmium, chromium, copper, iron, lead, antimony, vanadium and zinc were identified. The concentrations of detected heavy metals were compared with national ambient air quality standards. The concentration of chromium and iron in all stations within Najj Industrial Town was higher than the standard level. Also, the concentrations of silver, cadmium, chromium, copper, iron, antimony, vanadium, and zinc in all stations adjacent to the Industrial Town was higher than the standard. The results of assessing the risk of non-cancerous diseases by exposure to heavy metals in total suspended particles, both in winter and spring, showed that exposure to heavy metals in all stations does not pose a risk to public health. The highest risk of cancer in winter and spring was due to exposure to the arsenic (at station 2, inside the industrial town) and cadmium (at station 4, inside the industrial town), respectively. In spring, the risk of cancer due to exposure to arsenic and cadmium was higher in all stations except station 2 than in winter. However, in the spring, the risk of cancer in all stations was lower than in the winter. The risk index values for the age group of children were higher than the age group of adults; therefore, children are more at risk for various types of cancer and non-cancerous diseases while exposing to heavy metals in the air.

Conclusion: The results of the assessment of exposure to heavy metals released from Najj Industrial Town on human health show that the risk of non-cancerous diseases does not threaten the people of the study area; but the risk of cancer caused by the arsenic and cadmium is high at most of the surveyed stations.

Keywords: Air pollution, Heavy metals, Inductively coupled plasma mass spectrometry, Cancerous diseases.

