

# ارزیابی شاخص‌های آلودگی منفرد و تلفیقی برخی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع خاک چینی، کاشی سرامیک، شن ماسه و شیشه شهرستان اردکان در زمستان سال ۱۳۹۷

سعید شجاعی برجونی\*، حمیدرضا عظیم زاده، اصغر مصلح آرائی

گروه محیط زیست، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۳۰

## چکیده

زمینه و هدف: تلاش برای اشتغال‌زایی در کشورهای در حال توسعه، هم سو با توسعه صنایع، فلزات سنگین به طور پیوسته به محیط زیست انتشار می‌یابند. این مطالعه با هدف سنجش غلظت فلزات سنگین و ارزیابی سطح آلودگی غبار اطراف تعدادی از صنایع با استفاده از شاخص‌های اکولوژیکی صورت گرفت.

روش کار: این مطالعه توصیفی تحلیلی و مقطعی در فصل زمستان با نصب ۳۵ تله غبارگیر در اطراف صنایع خاک چینی، کاشی سرامیک، شن ماسه و شیشه در شهرستان اردکان انجام شد. با استفاده از دستگاه ICP-MS غلظت فلزات سنگین در غبار اندازه‌گیری شد. با استفاده از شاخص‌های فاکتور آلودگی (CF)، شاخص آلودگی (PI)، غنی‌شدگی (EF)، شاخص آستانه آلودگی (PI<sub>T</sub>)، قدر مطلق بردار شاخص آلودگی (PI<sub>vector</sub>)، شاخص آلودگی جدید (PI<sub>N</sub>)، شاخص آلودگی چند عنصره (MEC)، میانگین وزنی شاخص آلودگی (PI<sub>wAvg</sub>)، شاخص آلودگی تلفیقی (IPI)، فاکتور مواجهه (ExF) و نسبت میانگین محدوده اثرات میانه (MERMQ) سطح آلودگی غبار مورد ارزیابی و در GIS نسخه ۱۰/۵ پهنه‌بندی شد.

یافته‌ها: میانگین غلظت فلزات سنگین در غبار به صورت روی (۳۳۱۰/۵۴ mg/kg) < سرب (۱۳۷/۲۸ mg/kg) < مس (۱۳۷/۲۸ mg/kg) < نیکل (۶۳/۶۵ mg/kg) < آرسنیک (۳۵/۱۲ mg/kg) < کبالت (۱۳/۷۳ mg/kg) < مولیبدن (۴/۴۰ mg/kg) اندازه‌گیری شد. در کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری شاخص CF عناصر سرب، آرسنیک و روی در کلاس آلودگی بسیار بالا و شاخص PI سرب در کلاس آلودگی شدید قرار گرفت. فلز روی در ۳۰ ایستگاه غنی‌شدگی خیلی بالا را نشان داد. برای کاربری حفاظت محیط زیست، شاخص PI<sub>T</sub> عنصر روی در کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری در کلاس آلودگی خیلی شدید قرار گرفت. همچنین بر اساس شاخص IPI کلیه ایستگاه‌ها در کلاس شدیداً آلوده قرار گرفتند. فلزات سنگین در ۳۲ ایستگاه بر اساس شاخص MERMQ، دارای ۷۶ درصد سمیت و بر اساس شاخص PI<sub>N</sub> در کلاس آلوده بودند. بیشترین مقادیر شاخص‌های MEC (۳/۴۳) و PI<sub>vector</sub> (۳۵/۹۳) در ایستگاه‌های S<sub>۱</sub> و S<sub>۱۵</sub> (PI<sub>wAvg</sub> ۴۲/۲۷) در ایستگاه‌های S<sub>۱</sub> و S<sub>۱۲</sub> و ExF (۱۱۷/۱۱) در ایستگاه S<sub>۱</sub> به دست آمد. نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج پهنه‌بندی تعدادی از شاخص‌های آلودگی، جهت باد غالب منطقه نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های پایین دست صنایع دارد.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، صنایع، شاخص‌های آلودگی، غبار اتمسفری راسب شونده

## مقدمه

غبار اتمسفری راسب شونده از مهمترین راه‌های ورود آلاینده‌های سمی نظیر فلزات سنگین به چرخه بوم شناختی است. تلاش برای صنعتی شدن و اشتغال زایی در کشورهای در حال توسعه، به تلاش‌های گسترده‌ای برای جذب صنایع سنگین با پتانسیل آلودگی بالا منجر شده است. هم سو با توسعه صنایع، به علت رشد مداوم شهرنشینی در بسیاری از بخش‌های جهان فلزات سنگین از طریق غبار اتمسفری به طور پیوسته به محیط زیست انتشار می‌یابند و تهدید بزرگی بر سلامت انسان می‌گذارند.<sup>۱،۲</sup>

فلزات سنگین غبار اتمسفری راسب شونده به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی محیط زیست می‌توانند علاوه بر معلق بودن در هوا و کاهش کیفیت هوای اتمسفری، به دلیل خاصیت تجزیه ناپذیری که دارند در خاک و بافت زنده موجودات تجمع پیدا کنند. از آن جا که فلزات سنگین تاثیر قابل توجهی بر کیفیت محیط زیست دارند به عنوان یکی از منابع اصلی آلاینده محیط زیست به شمار آیند. فعالیت‌های مختلف موجب پراکنده شدن فلزات سنگین در اتمسفر شده و در نتیجه به صورت گرد و غبار آلوده در خاک‌های سطحی انباشته می‌شوند. از سوی دیگر، خاک‌های آلوده به فلزات سنگین در صورت وزش باد، با تولید گرد و غبار می‌توانند سهم مهمی در افزایش غلظت فلزات در هوا داشته باشند و بر کیفیت هوا اثر گذارند. بنابراین وجود فلزات سنگین معلق در هوا و خاک یکی از نگرانی‌های مورد توجه کارشناسانی است که در زمینه کاهش اثرات بهداشتی مرتبط با محیط، فعالیت می‌کنند.<sup>۳، ۴</sup>

بدین منظور اندازه گیری فلزات سنگین در خاک و گرد و غبار می‌تواند در تعیین روش مناسب کنترل آلودگی محیط زیست بسیار مهم باشد.

اثرات فلزات سنگین بر سلامت انسان بسیار متنوع است. برای مثال ترکیبات آرسنیک سبب بروز سرطان، نار سایه در رشد جنین، آسیب دیدگی پوست و مشکلات گردش خون

می‌گردد.<sup>۵</sup>

سرب، سیستم اعصاب مرکزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و همچنین سبب ایجاد کم خونی، عقب افتادگی فیزیکی و ذهنی و کاهش توانایی یادگیری در کودکان می‌شود.<sup>۶</sup>

مس نیز در مقادیر اندک یک عنصر ضروری برای بدن بوده و اجزای اصلی آنزیم‌های اکسایشی - کاهششی و هموسیانین است که کمبود آن سبب بروز کم خونی و فرورفتگی در ستون فقرات می‌شود ولی در مقادیر بیش تر سمی بوده و سبب بروز مسمومیت مزمن مس، آسیب دیدگی کبد و کلیه و بیماری‌های ویلسون و بدلینگتون می‌شود.<sup>۷</sup>

مولیبدن در مقادیر اندک برای بدن ضروری است و در عملکرد آنزیم‌ها نقش ایفا می‌کند. از طرف دیگر به نظر می‌رسد که این عنصر سمی بوده و سبب نار سایه در رشد جنین می‌شود.<sup>۸</sup>

روی در مقادیر اندک برای بدن ضروری بوده و اجزای اصلی بسیاری از آنزیم‌ها را تشکیل می‌دهد. همچنین در بلوغ جنسی و تولیدمثل نیز نقش ایفا می‌کند. کمبود آن سبب کاهش رشد و عقب ماندگی گنادها و یا سلول‌های تولیدکننده گامت می‌شود. مقادیر بیش تر آن سمی بوده و سبب بروز اسهال و بیماری تب فلزی می‌شود.<sup>۸</sup>

ترکیبات نیکل سبب اختلالات عصبی نظیر سرفه، گیجی، سردرد، بی خوابی، توهم، تشنج، اختلالات تنفسی نظیر سرفه های خشک، خیز ریه، تب و سیانوز، اختلالات قلبی-عروقی نظیر تاکیکاردی، آسیب میوکارد و افزایش تعداد گلبولهای قرمز می‌شود.<sup>۹</sup>

کبالت یکی از عناصر مهم در تولید سیانوکوبالامین بوده که در رشد و عملکرد طبیعی سلول‌های بدن به ویژه سلول‌های مغز استخوان و سیستم عصبی ضروری است. اما مقادیر بالای آن موجب ایجاد تغییرات ژنتیکی، سرطان، نکروز سلول‌های کلیه، اختلالات تنفسی و قلبی، کاهش وزن و بی اشتهاپی در انسان می‌شود.<sup>۱۰</sup>

و نسبت میانگین محدوده اثرات میانه (Mean Effects Range-Median Quotien) قابل محاسبه است<sup>۱۴</sup>. در تمام این روش‌ها تلاش این است که بر اساس مقایسه مناطق، تحلیل‌های آماری و استفاده از غلظت مرجع میزان آلودگی مشخص شود. مقادیر مرجع معمول مورد استفاده شامل غلظت زمینه، غلظت پوسته زمین و مقادیر مرجع نظارتی هستند که مناسب‌ترین مرجع، غلظت زمینه منطقه مورد مطالعه است. غلظت زمینه خارج از منطقه برای ارزیابی مناطق با آلودگی ضعیف مناسب نیست، در حالیکه به طور خاص و دقیق، غلظت زمینه داخل منطقه روشی بهینه جهت ارزیابی آلودگی غبار یا خاک است. غلظت زمینه وابسته به مکان و مقیاس منطقه است و به طور معمول باید به مقیاس محلی، محدود شود. شواهد نشان داده است که غلظت زمینه در داخل و بین مناطق مختلف، متفاوت است<sup>۱۵</sup>.

از آن‌جا که روش‌های کمی ارزیابی آلودگی غبار به مقادیر غلظت مرجع تکیه دارند یک مشکل عمده در ارتباط با روش صحیح ارزیابی آلودگی غبار، شناسایی مقادیر مناسب مرجع در شرایطی است که خاک منطقه آلوده نشده باشد<sup>۱۶</sup>.

در سال‌های اخیر با توسعه صنعتی در ایران، محققین مختلفی را واداشت تا به دنبال رصد آلودگی در محیط باشند. در بسیاری از استان‌های کشور، تحقیقاتی در رابطه با استفاده از شاخص‌های آلودگی برای ارزیابی وضعیت آلودگی به فلزات سنگین وجود دارد. از مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات Naeini و همکاران با هدف ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در اطراف کارخانه سیمان نائین از شاخص‌های مختلف آلودگی نظیر PI و IPI برای کاربری حفاظت محیط زیست استفاده نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد آلودگی فلزات سنگین در منطقه در کلاس زیاد قرار دارد<sup>۱۷</sup>، Siyahati Ardakani و همکاران با استفاده از شاخص‌های PI و EF وضعیت آلودگی فلزات سنگین در اطراف صنایع فولاد و گندله سازی شهرستان اردکان مورد

هر چند یکی از دلایل حضور فلزات سنگین در محیط زیست، سنگ مادری و طبیعی است ولی بسیاری از تحقیقات انجام گرفته در محیط‌های طبیعی، منشأ آلودگی‌های فلزات سنگین را عوامل و فعالیت‌های انسانی مختلف از جمله صنایع و ماشین‌آلات صنعتی دانسته‌اند. از این رو شناخت صنایع آلوده کننده و میزان آلودگی ناشی از فعالیت آن‌ها از نظر مدیریت آلودگی‌های محیط زیست، برنامه ریزی برای کاهش این آلودگی‌ها (به عنوان مثال از طریق گیاه پالایی و غیره) و مدیریت سیمای سرزمین ضروری به نظر می‌رسد<sup>۱۱</sup>.

EPA (۱۹۹۸) ارزیابی ریسک اکولوژیک را به عنوان فرآیندی برای ارزیابی احتمال رویداد اثرات اکولوژیکی مضر به صورت نتیجه‌ای از در معرض محرک بودن تعریف نمود. هدف از ارزیابی ریسک اکولوژیک، ارزیابی اثرات اکولوژیکی فعالیت‌های انسان برای حفاظت و مدیریت محیط زیست است. امروزه بسیاری از ضرایب ریسک آلودگی (با هدف تشخیص تجمع غیرعادی آلاینده‌ها) توسعه داده شده برای آب و رسوب می‌توانند برای تجمع طولانی مدت فلزات سنگین در خاک‌ها، مواد آلی، گرد و غبار و سایر مواد محیطی استفاده شوند<sup>۱۲، ۱۳</sup>.

ضرایب ریسک آلودگی با استفاده از شاخص‌های کمی نظیر شاخص غنی‌شدگی (Enrichment Factor)، فاکتور آلودگی (Contamination Factor)، فاکتور مواجهه (Exposure Factor)، شاخص آلودگی چند عنصره (Multi-Element Contamination)، شاخص آلودگی (Pollution Index)، شاخص آلودگی تلفیقی (Integrated pollution Index)، شاخص آلودگی آستانه (Threshold Pollution Index)، شاخص آلودگی جدید (New Pollution Index)، قدر مطلق بردار شاخص آلودگی (Vector Modulus of Pollution Index)، شاخص آلودگی آستانه تلفیقی (Integrated Threshold Pollution Index)، شاخص آلودگی (Weighted Average of Pollution Index)

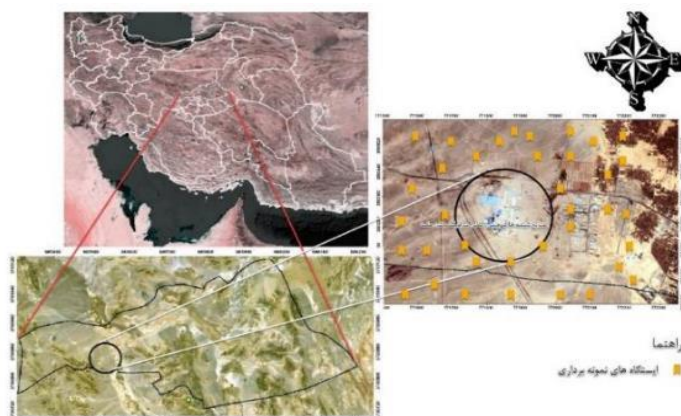
$PI_T$ ,  $PI_N$ ,  $PI_{vector}$ ,  $JPI$ ,  $PI_{wAvg}$  و  $MERMQ$  انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

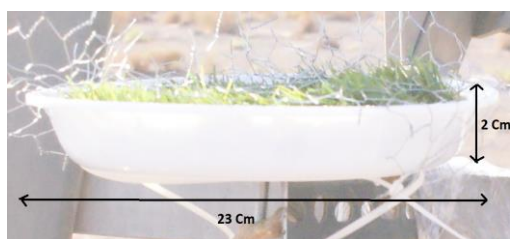
این مطالعه توصیفی - تحلیلی - مقطعی در فصل زمستان در اطراف تعدادی از صنایع بزرگ شامل صنایع خاک چینی، کاشی سرامیک، شن ماسه و شیشه در شهرستان اردکان انجام شده است. مختصات جغرافیایی صنایع مذکور به گونه ای است که در "  $20^{\circ}50'$  تا  $32^{\circ}$  " و "  $18^{\circ}44'$  عرض شمالی و "  $53^{\circ}53'23''$  تا "  $57^{\circ}04'$  طول شرقی و در ضلع شمال غربی شهرستان اردکان واقع شده اند (شکل ۱). تولید گرد و غبار زیاد توسط این صنایع و انتقال آن در سطح رو ستاها و شهرهای اطراف، آمار بالای ظهور بیماری های مادرزادی و تعداد زیاد شکایات مردمی با تاسیس این صنایع از عوامل اصلی ضرورت انجام این پژوهش بود. محدود مطالعاتی برای انجام این پژوهش وسعتی برابر با ۸ کیلومتر مربع انتخاب گردید. در این محدوده انواع مختلفی از کاربری ها اعم از کشاورزی، پارک، توسعه شهری و مرتع وجود دارد. بر اساس اطلاعات هواشناسی اخذ شده از سازمان هواشناسی استان یزد، اقلیم منطقه مطابق روش دومارتن در کلاس خشک و فرا سرد قرار می گیرد.

ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد، شاخص  $EF$  عمدتاً کلاس پایین آلودگی خاک را نشان می دهد و شاخص  $PI$  در غالب ایستگاه‌ها در کلاس آلودگی متوسط قرار دارد<sup>۱۸</sup>، Huang و همکاران با استفاده از شاخص ارزیابی ریسک، فلزات سنگین در خاک های مجاور معدن سرب و روی، کلاس آلودگی را متوسط تا زیاد برآورد نمودند<sup>۱۹</sup>، اشاره کرد.

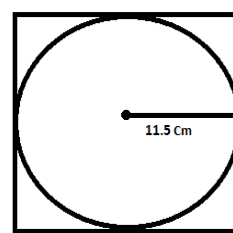
باتوجه به اینکه تاکنون مطالعه مقطعی در رابطه با آلودگی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع شیشه، خاک چینی، کاشی سرامیک و شن ماسه در شهرستان اردکان در فصل زمستان صورت نگرفته است، تحقیق در این زمینه می تواند اطلاعات جامع و راهکارهای مناسبی را در اختیار تصمیم گیران برای ایجاد سیاست های کاهش سطح آلودگی و بهبود شرایط زندگی مردمان ساکن در آن ناحیه قرار دهد تا از گسترش آلودگی به محیط اطراف آن جلوگیری شود. از این رو تحقیق حاضر با توجه به این موضوع و اهمیت شاخص های ریسک اکولوژیکی در ارزیابی آغشتگی فلزات سنگین در غبارهای راسب شونده اتمسفری، به بررسی سنجش غلظت فلزات سنگین سرب، کبالت، آرسنیک، باریوم، مس، مولیبدن و روی در غبار اطراف صنایع شیشه، خاک چینی، کاشی سرامیک و شن ماسه شهرستان اردکان در فصل زمستان و ارزیابی در جه آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص های کمی نظیر شاخص  $EF$ ،  $CF$ ،  $ExF$ ،  $MEC$ ،  $PI$ .



شکل ۱: موقعیت صنایع و ایستگاه های نمونه برداری در پهنه مورد بررسی



(ب)



(ا)

**شکل ۲:** نمای گرافیکی (ا) و واقعی (ب) تله‌های غبارگیر از نوع چمن مصنوعی با قابلیت به دام اندازی ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرون

تله‌های غبارگیر جمع‌آوری و در فویل‌های آلومینیومی قرار داده شدند. سپس بلافاصله نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل داده شدند. برای جداسازی غبار از تله‌ها از دو روش تکاندن و شستشو با آب مقطر استفاده شد. غبارهای که به روش شستشو جمع‌آوری شده بود به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای معین قرار داده شدند تا کاملاً خشک گردند<sup>۱۷</sup>. بعد از جمع‌آوری غبار از تله‌ها، اقدام به اندازه‌گیری فلزات سنگین سرب، کبالت، آرسنیک، روی، مس، مولیبدن و نیکل با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمایی جفت شده القایی (ICP-MS)، Perkin-Elmer، ELAN9000 USA شد. بدین منظور حدود ۰/۱ گرم نمونه غبار، با حجم کافی از محلول هضم‌کننده مواد جامد که شامل ۴ میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$ ، ۰/۱ میلی‌لیتر  $\text{HCl}$  و یک میلی‌لیتر  $\text{HF}$  بود به ظروف تفلونی افزوده و در سیستم مایکروویو هضم نمونه‌ها صورت گرفت. پس از هضم نمونه، ظروف تفلون بر روی صفحه گرمایی سرامیکی قرار داده شد تا نمونه‌ها خشک شوند. مواد باقی‌مانده نهایی در  $\text{HNO}_3$  ۰/۱۴ مولار حل شدند و سپس به بطری‌های ۵۰ میلی‌لیتری PE منتقل گردیدند و در نهایت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند<sup>۲۱</sup>. در نهایت غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های محلول و شاهد با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمایی جفت شده القایی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

برای ارزیابی سطح آلودگی غبار آغشته به فلزات سنگین از شاخص‌های آلودگی مختلفی استفاده گردید که در جدول ۱ روابط و در جدول ۲ کلاس‌های هریک از شاخص‌های مورد

برای اجرای پژوهش حاضر ابتدا اقدام به تهیه نمونه بردارهای گردید که قابلیت به دام انداختن ذرات گرد و غبار با قطر آئرودینامیکی کوچکتر از ۱۰ میکرون دارا بودند. بدین منظور از تله‌های غبارگیر از نوع چمن مصنوعی استفاده شد. تله‌ها به گونه‌ای طراحی گردید که در بشقاب‌های پلاستیکی با قطر ۲۳ سانتی‌متر، شعاع ۱۱/۵ سانتی‌متر و عمق ۲ سانتی‌متر قرار داده شد (شکل ۲). همچنین ارتفاع بلندی چمن‌ها به گونه‌ای تنظیم گردید که حدود ۱ سانت از لبه بشقاب بزرگتر باشند تا ذرات غبار بیشتری به دام افتد. برای جلوگیری از نشستن پرند بر روی بشقاب از خار ضد پرند استفاده گردید<sup>۲۰، ۱۷</sup>. بعد از آماده‌سازی تله‌های غبارگیر، نمونه برداری از غبار راسب شونده به روش سیستماتیک تصادفی صورت گرفت. به این صورت با بازدیدهای میدانی و بررسی عکس‌های هوایی در نرم‌افزار گوگل ارث، توزیع ایستگاه‌های نمونه برداری در منطقه به صورت سیستماتیک تصادفی تعیین شد. به این صورت منطقه مورد مطالعه به شبکه‌های  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$  تقسیم بندی و محل تلاقی شبکه‌ها به عنوان موقعیت نقاط نمونه برداری تعیین شد. با حذف تعدادی از نقاط انتخابی که در مکان‌های نامناسب (زمین محل استقرار صنایع، جاده و غیره) قرار گرفته بودند، ۳۵ ایستگاه مشخص گردید و اطلاعات موقعیت مکانی آن‌ها در دستگاه موقعیت یاب جهانی (GPS) برای نصب ایستگاه‌ها و شناسایی مجدد آنها در مرحله جمع‌آوری غبار ثبت گردید.

بعد از گذشت سه ماه از زمان نصب تله‌ها<sup>۱۷</sup>، تک تک

صنعتی در افزایش غلظت هر یک از فلزات سنگین مورد ارزیابی قرار گرفت.

شاخص  $PI_T$  در واقع نسبت متوسط غلظت فلز سنگین اندازه گیری شده به سطوح آستانه آن فلز در خاک است. برای محاسبه شاخص آلودگی آستانه از مقادیر آستانه ای که توسط سازمان محیط زیست ایران ارائه شده است، استفاده گردید<sup>۲۴</sup>.<sup>۲۵</sup> مطابق مرجع، غلظت آستانه فلزات سرب، کبالت، آرسنیک، روی، مس، مولیبدن و نیکل برای کاربری پارک به ترتیب برابر ۲۹۰، ۵۰، ۷۰، ۵۰۰، ۵۰۰، ۴۰ و ۵۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم، برای کشاورزی به ترتیب ۷۵، ۵۰، ۴۰، ۵۰۰، ۲۰۰، ۴۰ و ۱۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم، برای مرتع به ترتیب ۲۹۰، ۵۰، ۷۰، ۵۰۰، ۵۰۰، ۴۰ و ۵۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم، برای مسکونی ۸۰، ۵۰، ۴۰، ۵۰۰، ۴۰۰، ۴۰ و ۱۵۵ میلی گرم بر کیلوگرم و برای حفاظت محیط زیست به ترتیب ۳۰۰، ۲۰، ۱۷، ۲۰۰، ۶۳، ۴ و ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم است.

علاوه بر شاخص های منفرد، شاخص های تلفیقی و ریسک اکولوژیکی مختلفی برای ارزیابی شدت آلودگی فلزات سنگین در کنار یک دیگر استفاده گردید. شاخص تلفیقی  $PI_{Vector}$  یا قدر مطلق بردار شاخص آلودگی اولین بار توسط Gong و همکاران معرفی شد که از تقسیم توان دوم شاخص آلودگی برای هر فلز سنگین به تعداد فلزات سنگین مورد بررسی به دست می آید<sup>۲۶</sup>.

شاخص  $PI_{wAvg}$  یا میانگین وزنی شاخص آلودگی از یک روش آماری ساده برای ارزیابی سمیت فلزات سنگین در منطقه مورد نظر است. این شاخص تلفیقی توسط Qingjie و Jun با وزن دادن به هر شاخص آلودگی فلز سنگین به دست می آید. ارزش وزنی فلزات سنگین سمی در این شاخص از ۱ تا ۵ متغیر بوده که مقادیر آن توسط Qingjie و Jun پیشنهاد شده است. بر اساس این پیشنهادیه ارزش ۵ و ۱ به ترتیب مربوط به فلزی است که بیشترین و کمترین سمیت را دارد<sup>۲۷،۲۸</sup>. در این مطالعه ارزش وزنی برای شاخص های

بررسی ارائه شده اند. در اغلب منابع شاخص های آلودگی در دو گروه شاخص های منفرد و شاخص های پیچیده شامل شاخص های تلفیقی و شاخص های ریسک اکولوژیکی طبقه بندی شده اند. شاخص های منفرد شامل شاخص های فاکتور غنی شدگی (Enrichment Factor)، فاکتور آلودگی (Contamination factor)، شاخص آلودگی منفرد (Single pollution index) و شاخص آستانه آلودگی (pollution index threshold) هستند.

شاخص EF توسط محققین مختلف برای ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در بخش های مختلف محیط زیست و میزان تاثیر احتمالی فعالیت های انسان زاد بر غلظت فلزات سنگین گرد و غبار استفاده شده است و به پنج کلاس آلودگی تقسیم می شود (جدول ۲). در واقع این شاخص با استاندارد سازی یک فلز آزمایشی در مقابل فلز مرجعی که کمترین تغییر غلظت را در محیط دارد، محاسبه می شود. معمولاً فلزات آهن، آلومینیوم و منگنز به عنوان فلزات مرجع در نظر گرفته می شوند<sup>۲۲</sup>. در این پژوهش از فلز آهن به عنوان فلز مرجع استفاده شد.

شاخص PI نسبت غلظت فلز مورد بررسی در غبار به غلظت مرجع فلزات در خاک منطقه مورد بررسی می باشد. در شاخص PI معمولاً مقادیر مرجع مختلف نظیر مقادیر غلظت عناصر پیش از صنعتی شدن، میانگین پوسته زمین، مقادیر غلظت زمینه و غیره استفاده می شود. این شاخص آلودگی منطقه را به ۳ کلاس تقسیم می کند (جدول ۲). غلظت زمینه مورد استفاده در این پژوهش برای محاسبه شاخص ها، توسط Siyahati Ardakani و همکاران در عمق ۲ الی ۳ متری خاک منطقه مورد مطالعه، در جای که تغییرات غلظت فلزات سنگین بسیار ناچیز و هیچ گونه آلودگی به آن جا سرایت نکرده بود، اندازه گیری شد<sup>۲۳</sup>. علاوه بر استفاده از غلظت زمینه در شاخص های آلودگی، با مقایسه مقادیر غلظت فلزات سنگین در نمونه های غبار با مقادیر غلظت زمینه، تاثیر انتشارات

ارزیابی شاخص‌های آلودگی منفرد و تلفیقی برخی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع خاک چینی، ...

آلودگی سرب و آرسنیک برابر ۵، کبالت و باریوم برابر ۱، مس، مولیبدن و روی برابر ۲ در نظر گرفته شد.

جدول ۱: شاخص‌های آلودگی شامل شاخص‌های منفرد، تلفیقی و ریسک اکولوژیکی

شاخص	نوع شاخص	فرمول	رفرنس
EF	منفرد	$EF = \frac{\frac{C_n(\text{sample})}{C_{\text{Ref}}(\text{sample})}}{\frac{B_n(\text{background})}{B_{\text{Ref}}(\text{background})}}$	34
CF	منفرد	$CF = \frac{C_M}{C_{np}}$	35
PI	منفرد	$PI = \frac{C_n}{B_n}$	36
PI <sub>T</sub>	منفرد	$PI_T = \frac{C_i}{C_{TL}}$	37
PI <sub>Vector</sub>	تلفیقی	$PI_{\text{Vector}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI_i^2}$	26
PI <sub>wAvg</sub>	تلفیقی	$PI_{w\text{Avg}} = \sum_{i=1}^m w_i PI_i$	27
PI <sub>N</sub>	تلفیقی	$PI_N = \sum_{i=1}^m w_i^2 PI_i$	29
IPI	تلفیقی	$IPI = \text{mean}(PI_i)$	30
ExF	تلفیقی	$y = \sum \frac{C_n - C_{av}}{C_{av}}$	31
MEC	تلفیقی	$MEC = \frac{(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_n}{T_n})}{n}$	32
MERMQ	ریسک اکولوژیکی	$MERMQ = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ERM_i}}{n}$	33

توضیحات:  $C_n$ : غلظت فلزات سنگین در غبار،  $B_n$ : غلظت زمینه ژئوشیمیایی فلز سنگین ( $n$ )،  $C_n(\text{sample})$ : غلظت فلز سنگین در نمونه غبار آنالیز شده،  $C_{\text{Ref}}(\text{sample})$ : غلظت مرجع در نمونه غبار آنالیز شده،  $B_n(\text{background})$ : غلظت فلز در محیط مرجع،  $B_{\text{Ref}}(\text{background})$ : غلظت فلز مرجع در محیط مرجع،  $C_M$ : غلظت فلز سنگین در نمونه غبار،  $C_{np}$ : غلظت فلز سنگین قبل از صنعتی شدن،  $C_{TL}$ : سطوح آستانه غلظت فلز سنگین،  $n$ : تعداد فلزات سنگین مورد بررسی،  $PI_i$ : شاخص آلودگی منفرد هر فلز سنگین در نمونه غبار،  $w_i$  (کوچک) و  $W_i$  (بزرگ) کلاس درجه آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی،  $\text{mean}(PI_i)$ : میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی،  $C_{av}$ : غلظت زمینه فلز سنگین در پروفیل خاک،  $ERM_i$ : میانگین محدوده اثرات،  $T$ : سطوح قابل تحمل فلزات سنگین در خاک یا غبار،  $n$ : تعداد فلزات سنگین می‌باشد.

جدول ۲: کلاس‌های آلودگی شاخص‌های منفرد، تلفیقی و ریسک اکولوژیکی

شاخص	ارزش	کیفیت غبار	رفرنس
EF	$EF < 2$	حداقل غنی شدگی	34
	$EF = 2-5$	غنی شدگی متوسط	
	$EF = 20-50$	غنی شدگی چشمگیر	
	$EF = 40-200$	غنی شدگی خیلی بالا	
	$EF > 40$	غنی شدگی فوق العاده زیاد	
CF	$CF < 1$	آلودگی پایین	35
	$1 \leq CF \leq 3$	آلودگی متوسط	
	$3 \leq CF \leq 6$	آلودگی قابل توجه	
	$CF \leq 6$	آلودگی بسیار بالا	
PI	$PI < 1$	غیر آلوده تا کمی آلوده	36
	$1 \leq PI \leq 3$	آلودگی متوسط	
	$PI \leq 3$	آلودگی شدید	
PI <sub>T</sub>	$PI_T < 1$	غیر آلوده	37
	$1 \leq PI_T \leq 2$	کمی آلوده	
	$2 \leq PI_T \leq 3$	آلودگی متوسط	
	$PI_T \leq 5$	آلودگی خیلی شدید	
PI <sub>N</sub>	$PI_N = 7-0$	غیر آلوده	29
	$PI_N = 95-7/1$	بسیار کمی آلوده	
	$PI_N = 95/1 - 518/1$	کمی آلوده	
	$PI_N = 518/1 - 2548/6$	آلوده	
IPI	$PI_N = 2548/6 - \infty$	خیلی آلوده	30
	$IPI < 1$	کمی آلوده	
	$1 \leq IPI \leq 2$	آلودگی متوسط	
MERMQ	$IPI < 2$	به شدت آلوده	33
	$MERMQ \leq 0/1$	سمیت کم (۹ درصد)	
	$0/5 \leq MERMQ < 0/1$	کم تا متوسط (۲۱ درصد)	
	$1/5 \leq MERMQ < 0/5$	متوسط تا بالا (۴۹ درصد)	
	$1/5 > MERMQ$	سمیت بالا (۷۶ درصد)	

مقادیر این شاخص با ضرب شاخص آلودگی هر فلز سنگین در توان دوم درجه شاخص آلودگی هر فلز سنگین (۱ الی ۵) به دست می‌آید<sup>۲۹</sup>.  
شاخص IPI یا شاخص آلودگی تلفیقی در واقع میانگین

شاخص آلودگی جدید PI<sub>N</sub> شاخصی مفید برای ارزیابی غنی شدگی فلزات سنگین در غبار است که در ۵ کلاس آلودگی، توسط Caeiro و همکاران با در نظر گرفتن درجه شاخص آلودگی فلزات سنگین از ۱ الی ۵ تعریف گردید.

مورد نظر، CV: ضریب تغییرات که برابر است با نسبت انحراف معیار داده‌ها به میانگین مقادیر نمونه گیری اولیه. در این مطالعه برای  $t^2$ ، مقدار  $t$  در سطح معنی دار ۵ در صد برابر با ۱/۹۶ با در نظر گرفتن درجه آزادی بی نهایت تعیین گردید<sup>۴</sup>. کلیه پهنه بندی‌ها مربوط به شاخص‌های  $PI_{vector}$ ،  $PI_N$ ،  $MEC$ ،  $PI_{wavg}$ ،  $IPI$  و  $ExF$  در محیط ArcGIS نسخه ۱۰/۵ صورت گرفت.

### یافته‌ها

بر اساس نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل آماری میانگین غلظت روی، مولیبدن، آرسنیک، سرب، کبالت، نیکل و مس در غبار نمونه برداری شده اطراف صنایع به ترتیب برابر ۳۳۱۰/۵۴، ۴/۴۰، ۳۵/۱۲، ۱۳۷/۲۸، ۱۳۷/۷۳، ۴۵/۹۱ و ۶۳/۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم است. کمترین و بیشترین غلظت فلزات سنگین اندازه گیری شده در نمونه‌های غبار به ترتیب مربوط به روی (۵۵۳۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و کبالت (۷/۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم) بود. میانگین غلظت فلزات روی، مولیبدن، آرسنیک، سرب، کبالت، نیکل و مس به ترتیب حدود ۵۶، ۴، ۱، ۳، ۸، ۱، ۲ و ۲ برابر از غلظت زمینه بیشتر بود. به طوری که عناصر روی، مولیبدن، آرسنیک، مس و سرب در کلیه نمونه‌ها و عناصر کبالت و نیکل در ۶۰ درصد از نمونه‌ها بالاتر از غلظت زمینه بودند. همچنین در کلیه نمونه‌ها چهار عنصر روی، مولیبدن، آرسنیک و سرب و در ۴۰ درصد از نمونه‌ها، مس بالاتر از مقادیر میانگین آن‌ها در پوسته زمین بود. مقادیر غلظت دو عنصر کبالت و نیکل در کلیه نمونه‌ها پایین تر از مقادیر میانگین آن‌ها در پوسته زمین بود. با توجه به یکنواختی رخساره زمین شناختی (دشت سر پوشیده) که مجموعه کارخانجات و ایستگاه‌های نمونه برداری در آن قرار دارد، انتظار می‌رود در صورت وجود منشأ طبیعی غبار اطراف صنایع مورد بررسی، غلظت عناصر موجود در آن نیز نرمال و

شاخص آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی در نمونه‌های غبار می‌باشد<sup>۳۰</sup>. کلاس‌های آلودگی این شاخص در جدول ۲ ارائه شده است.

شاخص  $ExF$  شاخصی بسیار مفید برای ارزیابی شدت آلودگی کلیه فلزات سنگین در یک منطقه می‌باشد<sup>۳۱</sup>.

شاخص ریسک اکولوژیکی  $MERMQ$  ابزاری مناسب برای ارزیابی اثرات مضر فلزات سنگین غبار صنایع در خاک و سایر بسترهای زیست محیطی است. برای محاسبه این شاخص نیاز به پارامتر  $ERM$  (Effects Range-Median) می‌باشد.  $ERM$  در واقع غلظت شیمیایی از یک فلز سنگین (۱۰ و ۵۰ پرسنتایل) است که باعث اثرات نامطلوب بیولوژیکی در محدوده اثرات میانه ( $ERM$ ) می‌شود. مقادیر پارامتر  $ERM$  برای فلزات سنگین آرسنیک، مس، روی، نیکل و سرب به ترتیب برابر با ۷۰، ۲۷۰، ۴۱۰، ۵۱/۶ و ۲۱۸ است.

شاخص  $MEC$  یا شاخص آلودگی چند عنصری، از نسبت تقسیم غلظت فلزات سنگین و سطوح قابل تحمل عناصر به تعداد فلز سنگین مورد بررسی به دست می‌آید. سطوح قابل تحمل فلزات آرسنیک، کادمیوم، مس، نیکل، سرب و روی به ترتیب برابر با ۲۰، ۳، ۱۰۰، ۱۰۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد که توسط Kloke ارائه شده است. مقادیر بیشتر از یک این شاخص اشاره به اثرات انسان زاد بر روی غلظت فلزات سنگین در خاک و غبار دارد<sup>۳۲، ۳۳</sup>.

بعد از محاسبه شاخص‌ها، کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری مربوط به غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های غبار و مقادیر شاخص‌های آلودگی به دست آمده در نرم افزار آماری SPSS ورژن ۲۲ انجام شد. در صد خطای نمونه برداری برای هر فلز سنگین با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه گردید:

$$N = \frac{t^2 \times CV \%^2}{E \%^2} \quad (14)$$

در این رابطه؛  $N$ : تعداد نمونه‌های لازم،  $E$ : درصد خطا،  $t$ : از جدول مربوطه بر اساس درجه آزادی در سطح معنی دار

ضرایب تغییر بالاتر از ۱۰۰٪ نشان دهنده تغییرپذیری بی نهایت بالا است<sup>۱۹</sup>. نتیجه محاسبه درصد ضریب تغییرات برای هر یک از فلزات سنگین نشان داد، برای فلزات سنگین روی، کبالت و نیکل درصد ضریب تغییرات در محدوده تغییرپذیری متوسط قرار دارد. در حالی که برای سایر فلزات درصد ضریب تغییرات در محدوده تغییر پذیری اندک به دست آمد (جدول ۳).

نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های منفرد نظیر غنی شدگی، شاخص آلودگی و فاکتور آلودگی در شکل ۳ ارائه شده است. مطابق نتایج، بیشترین مقادیر شاخص‌های PI، CF و EF به ترتیب برابر با ۷۹/۱۲، ۹۳/۸۸ و ۳۰/۶۹ مربوط به ایستگاه‌های S<sub>۱</sub>، S<sub>۱۷</sub> و S<sub>۱۸</sub> برای عنصر روی بود. بر اساس شاخص CF، کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری برای سه عنصر سرب، آرسنیک و روی در کلاس بسیار بالا آلودگی قرار گرفتند. این در حالی است که برای فلزاتی نظیر نیکل و کبالت کلیه ایستگاه‌ها و برای مس ۲۰ ایستگاه (۵۷/۱۴ درصد نمونه‌ها) در کلاس آلودگی پایین شاخص فاکتور آلودگی قرار داشتند.

دامنه تغییرات آن کم باشد. این در حالی است که وجود منشاء انسانی می‌تواند دامنه غلظت را افزایش داده و در نقاطی بیش از حدود نرمال آن را فزونی دهد و عامل غیرنرمال شدن داده‌ها شود. لیکن در صورت غیرنرمال بودن داده‌های عناصر سنگین احتمال وجود منشاء انسان ساخت در آن با توجه به دوری یا نزدیکی به منشاء وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، توزیع غلظت کلیه فلزات سنگین به استثناء کبالت در منطقه طبق نتایج آزمون Kolmogorov-Smirnov از توزیع نرمال با چولگی مثبت به سمت غلظت‌های پایین تر تبعیت نمی‌کند. این در حالی است که فلزاتی نظیر سرب و روی دارای کشیدگی مثبتی بودند که نشان دهنده شیب بیشتر نمودار توزیع این عناصر نسبت به منحنی توزیع نرمال بود. درصد خطای نمونه برداری برای کلیه فلزات سنگین به استثناء نیکل کمتر از ۱۰ درصد محاسبه گردید. همان طور که می‌دانیم، ضریب تغییرات (CV)، درجه تغییرپذیری غلظت‌های یک فلز را در غبار نشان می‌دهد. در صورتی که  $CV \leq 20\%$  باشد، نشان دهنده تغییرپذیری اندک،  $20\% < CV \leq 50\%$  تغییرپذیری متوسط و  $50\% < CV \leq 100\%$  تغییرپذیری بالا است. در حالی که

جدول ۳: آماره‌های توصیفی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع مورد بررسی

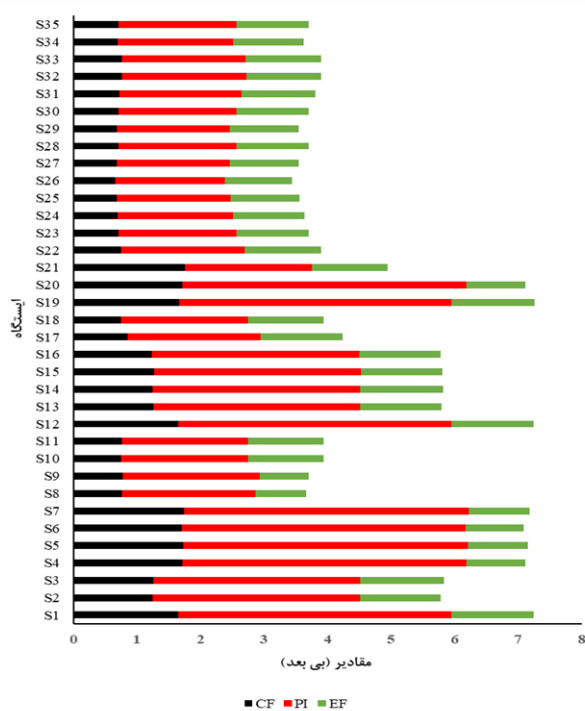
آماره عناصر واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	غلظت* زمینه پسته زمین استاندارد	**میانگین انحراف استاندارد	استاندارد خطا چولگی	کولموگروف کوشیدگی -اسمیرنوف	ضریب درصد خطای تغییرات نمونه برداری (درصد)
روی	۲۷۴۲	۵۵۳۹	۳۳۱۰/۵۴	۵۹	۸۴۳/۳۲	۱/۶۸	۲/۰۵	۲۵/۴۷
مولیبدن	۳/۹۰	۵/۲۰	۴/۴۰	۱/۰۱	۰/۳۴	۰/۹۰	-۰/۰۱	۷/۷۲
آرسنیک	۳۲/۱۰	۳۹/۱۰	۳۵/۱۲	۹/۶۰	۲/۴۶	۰/۴۱	-۱/۲۲	۷/۰۰
سرب	۹۲	۲۱۳	۱۳۷/۲۸	۱۷	۲۳/۳۷	۱/۲۴	۰/۷۷	۱۷/۰۲
کبالت	۷/۲۱	۱۹	۱۳/۷۳	۸	۳/۷۰	-۰/۲۷	-۰/۷۳	۲۶/۹۴
نیکل	۲۳	۶۹	۴۵/۹۱	۲۳	۱۶/۱۱	۲/۷۲	-۱/۴۱	۳۵/۰۹
مس	۴۰	۱۰۳	۶۳/۶۵	۲۳	۴/۱۸	۱/۵۸	-۱/۳۷	۶/۵۶

\* رفرنس: غلظت زمینه خاک شهرستان اردکان که توسط Siyahati Ardakani و همکاران (۱۳۹۷) اندازه‌گیری شده است<sup>۱۸</sup>

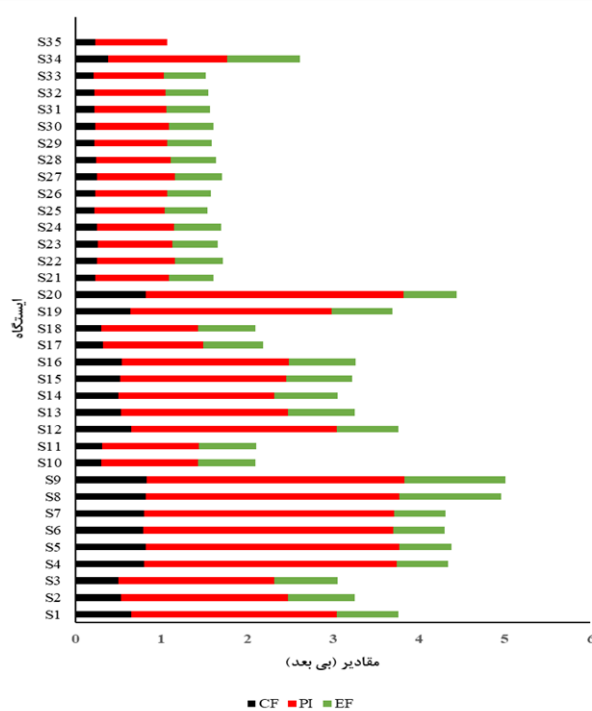
\*\* رفرنس: Naderizadeh و همکاران<sup>۳۸</sup>، Mazloomi و همکاران<sup>۳۹</sup>

درصد) و ۲ ایستگاه (۵/۷۱ درصد) محاسبه گردید. نتایج حاصل از شاخص EF نشان داد، فلزاتی نظیر مس، نیکل و کبالت حداقل غنی شدگی را در کلیه ایستگاه‌ها دارا هستند. این در حالی است که فلزاتی نظیر سرب، آرسنیک و مولیبدن به ترتیب در ۵ ایستگاه (۱۴/۲۸ درصد)، ۳۱ ایستگاه (۸۸/۵۷ درصد) و ۲۸ ایستگاه (۸۰ درصد) دارای کلاس حداقل غنی شدگی بودند. کلاس غنی شدگی متوسط تنها برای فلزاتی نظیر سرب، آرسنیک و مولیبدن به ترتیب در ۱۶ ایستگاه (۴۵/۷۱ درصد)، ۴ ایستگاه (۱۱/۴۲ درصد) و ۷ ایستگاه (۲۰ درصد) محاسبه شد. کلاس غنی شدگی چشمگیر در ۱۴ ایستگاه (۴۰ درصد) برای سرب و در ۵ ایستگاه (۱۴/۲۸ درصد) برای روی وجود داشت. همچنین غنی شدگی خیلی بالا تنها برای فلز روی در ۳۰ ایستگاه معادل ۸۵/۷۱ درصد ایستگاه‌ها برآورد گردید.

تنها ۱۵ ایستگاه برای فلز مس (۴۲/۸۵ درصد نمونه‌ها) و ۲۳ ایستگاه برای فلز مولیبدن (۶۵/۷۱ درصد نمونه‌ها) در کلاس آلودگی متوسط بود. در حالی که مولیبدن در ۱۲ ایستگاه معادل ۳۴/۲۸ درصد از نمونه‌ها در کلاس آلودگی قابل توجه قرار داشت. بر اساس شاخص PI، برای فلزات سنگین مس، سرب، آرسنیک، روی و مولیبدن به ترتیب ۱۴ ایستگاه (۴۰ درصد)، ۳۵ ایستگاه (۱۰۰ درصد)، ۳۲ ایستگاه (۹۱/۴۲ درصد)، ۳۵ ایستگاه (۱۰۰ درصد) و ۳۲ ایستگاه (۹۱/۴۲ درصد) در کلاس شدید آلودگی این شاخص قرار گرفتند. تنها ۲۱ ایستگاه (۶۰ درصد) برای فلزات مس و نیکل، ۳۳ ایستگاه (۹۴/۲۸ درصد) برای کبالت، ۳ ایستگاه (۸/۵۷ درصد) برای فلزات آرسنیک و مولیبدن در کلاس آلودگی متوسط این شاخص قرار گرفتند. کلاس آلودگی غیرآلوده تا کمی آلوده تنها برای دو فلز نیکل و کبالت به ترتیب در ۱۴ ایستگاه (۴۰

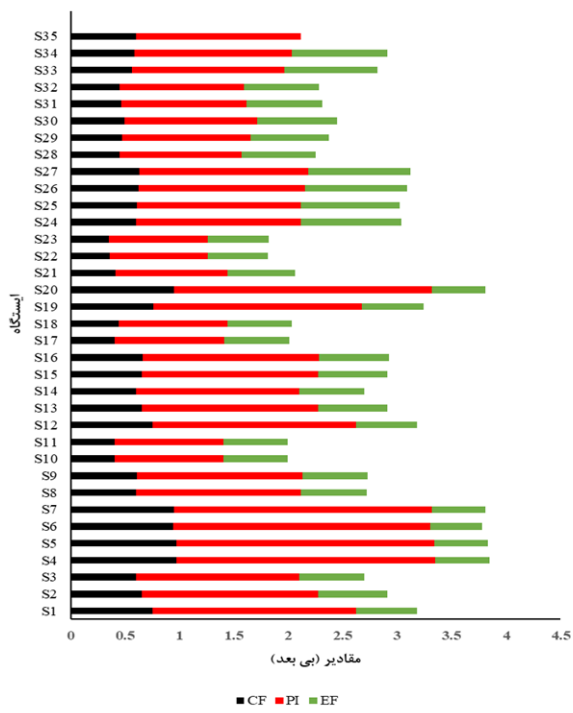


ب

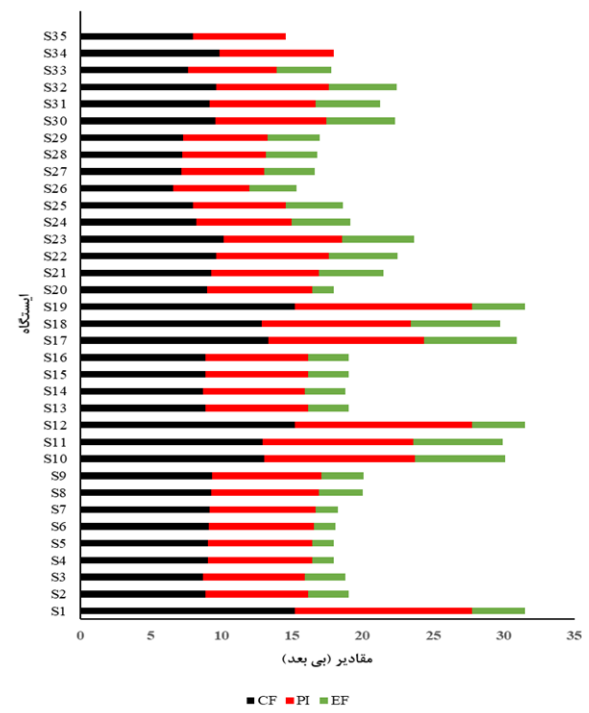


الف

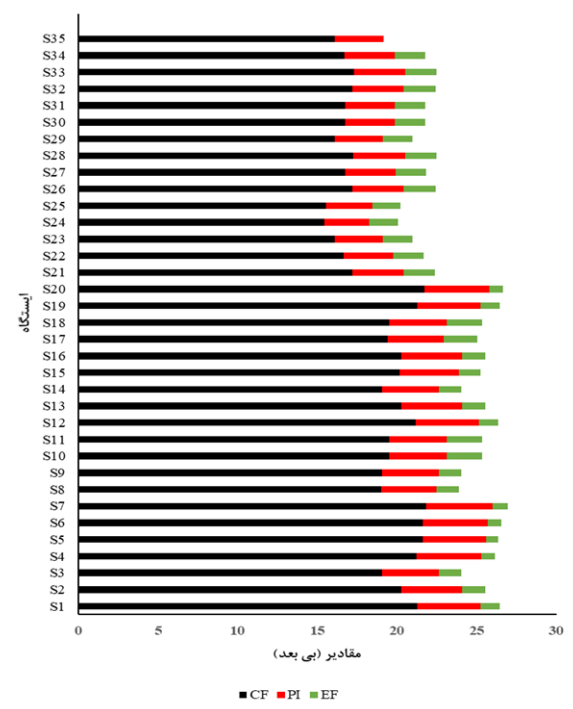
سعید شجاعی برجوئی و همکاران



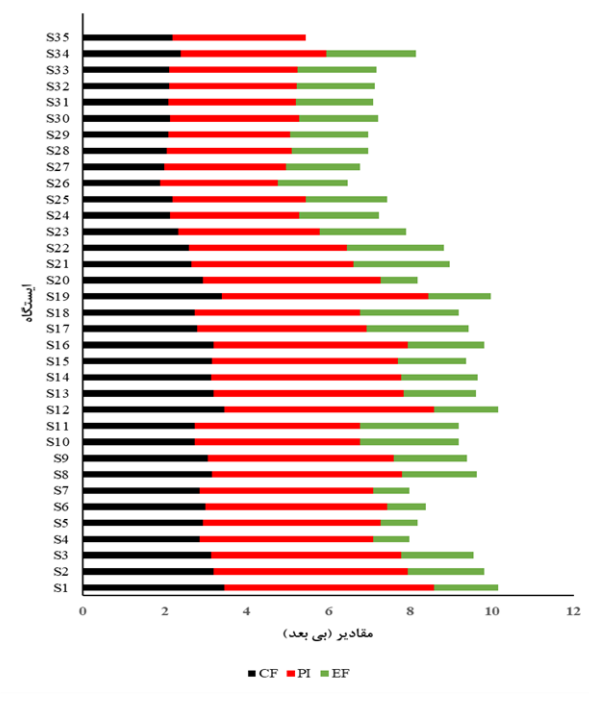
ا



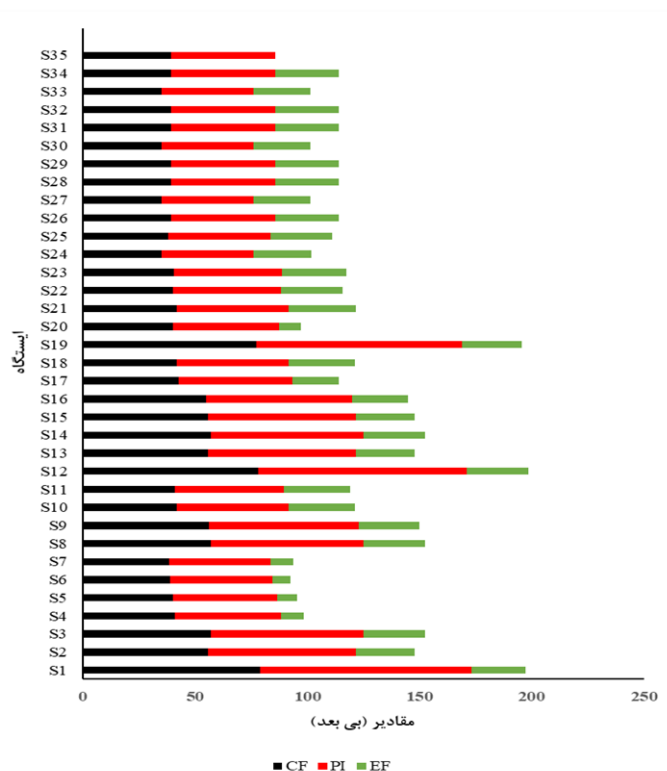
ب



ح



د

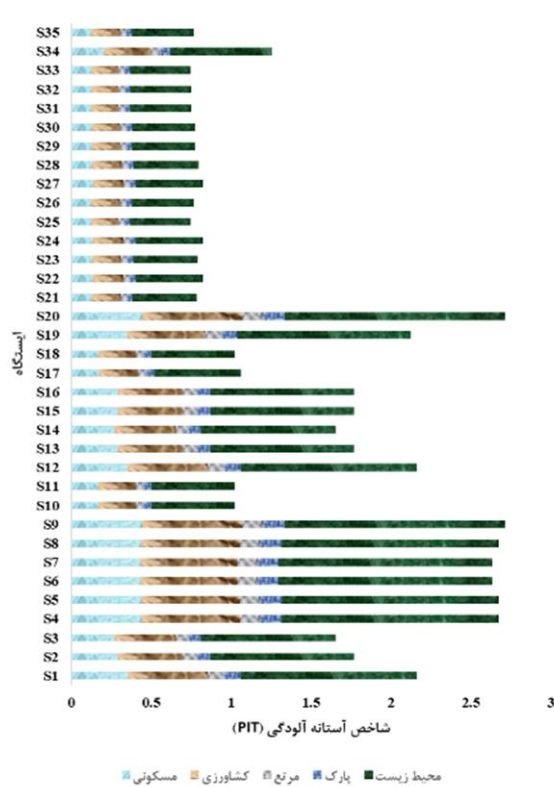
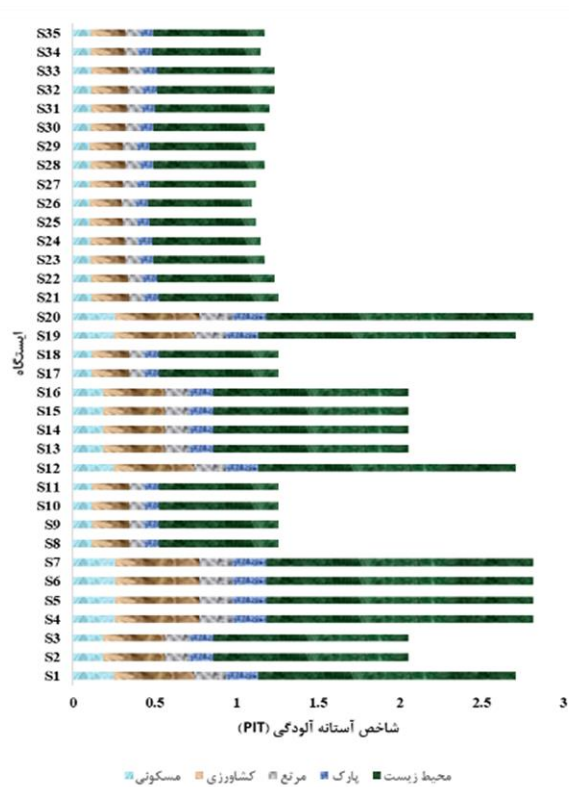


### خ

شکل ۳: نتایج مقادیر شاخص‌های CF، PI، EF برای عناصر نیکل (الف)، مس (ب)، سرب (پ)، کبالت (ت)، مولیبدن (ث)، آرسنیک (ح) و روی (خ)

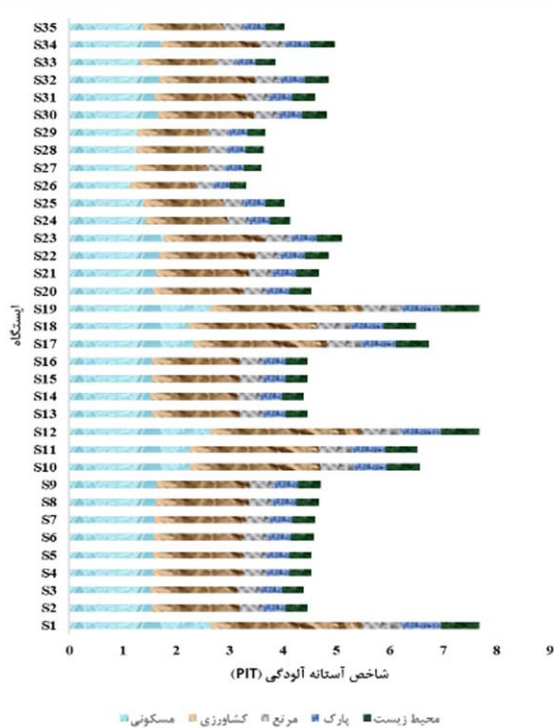
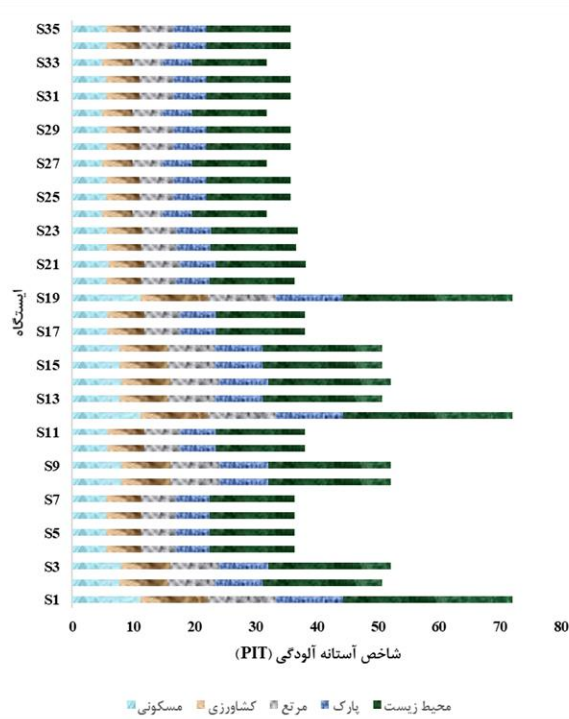
مسکونی در ۲۸ ایستگاه در کلاس کمی آلوده و در ۷ ایستگاه در کلاس آلودگی متوسط قرار داشتند. در حالی که این فلز برای دو کاربری پارک و مرتع در کلاس غیرآلوده قرار داشت. برای کاربری حفاظت محیط زیست قرار گیری فلزات سنگین در کلاس‌های آلودگی صورت زیر توصیف می‌شود: فلز روی در کلیه ایستگاه‌ها در کلاس آلودگی خیلی شدید قرار گرفت. دو فلز سرب و کبالت در کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری در کلاس غیرآلوده قرار داشتند. سه عنصر مولیبدن، نیکل و مس به ترتیب در ۱۴، ۲۵ و ۲۱ ایستگاه در کلاس غیرآلوده و ۲۱، ۱۰ و ۱۴ ایستگاه در کلاس کمی آلوده قرار گرفتند. آرسنیک تنها فلزی بود که در ۲۰ ایستگاه در کلاس آلودگی متوسط و در ۱۵ ایستگاه در کلاس کمی آلوده قرار داشت.

نتایج حاصل از محاسبه شاخص  $PI_T$  فلزات سنگین برای هر یک از کاربری‌های کشاورزی، مسکونی، پارک و مرتع در شکل ۴ نمایش داده شده است. بیشترین مقدار این شاخص (۲۷/۶۹) برای فلز روی برای کاربری حفاظت از محیط زیست تخمین زده شد. مطابق شکل فلز روی برای کاربری‌های کشاورزی، مسکونی، پارک و مرتع در ۴ ایستگاه مشخص ( $S_{33}$  و  $S_{30}$ ،  $S_{27}$ ،  $S_{24}$ ) در کلاس آلودگی شدید و در ۳۱ ایستگاه در کلاس آلودگی خیلی شدید قرار دارند. همچنین قابل ذکر است که ۵ فلز مولیبدن، آرسنیک، کبالت، نیکل و مس در کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری، برای کاربری‌های کشاورزی، مسکونی، پارک و مرتع در کلاس غیرآلوده این شاخص قرار داشتند. فلز سرب برای دو کاربری کشاورزی و



ب

الف



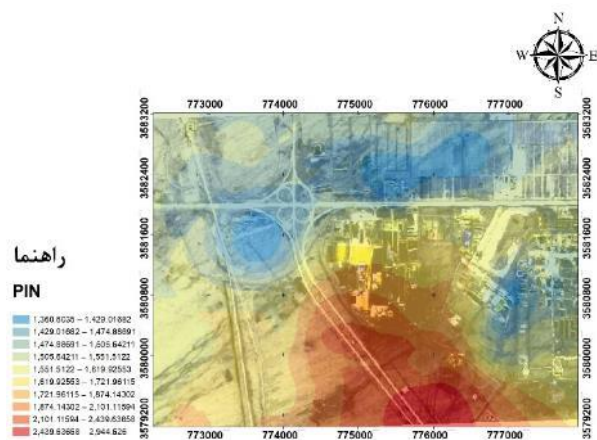
ارزیابی شاخص‌های آلودگی منفرد و تلفیقی برخی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع خاک چینی، ...



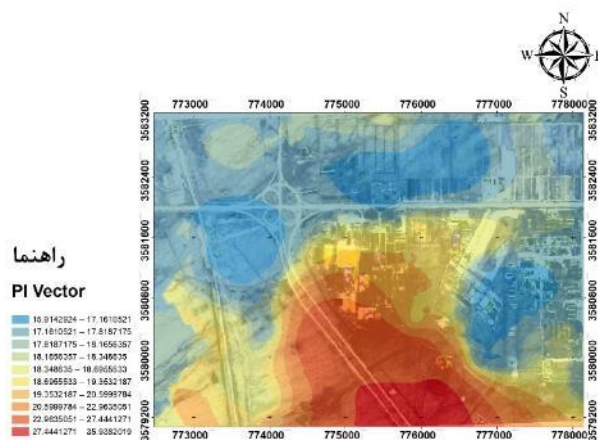
**شکل ۴:** نمودار تغییرات شاخص آستانه آلودگی (PIT) فلزات سنگین نیکل (الف)، مس (ب)، سرب (پ)، روی (ت)، مولیبدن (ث)، کبالت (ح) و آرسنیک

[ DOI: 10.29252/jehe.7.3.314 ] [ Downloaded from jehe.abzums.ac.ir on 2026-06-24 ]

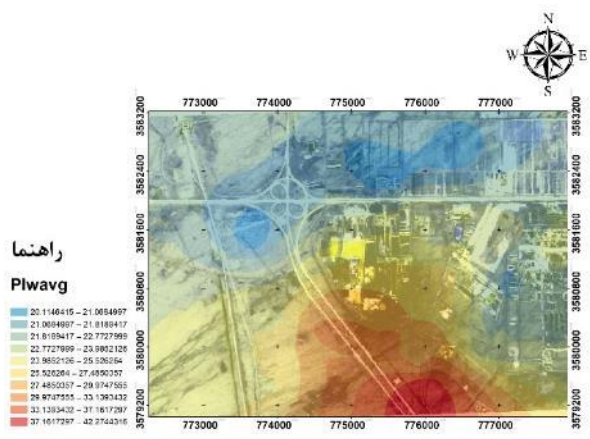
(خ) برای کاربری‌های کشاورزی، مسکونی، پارک، مرتع و حفاظت محیط زیست



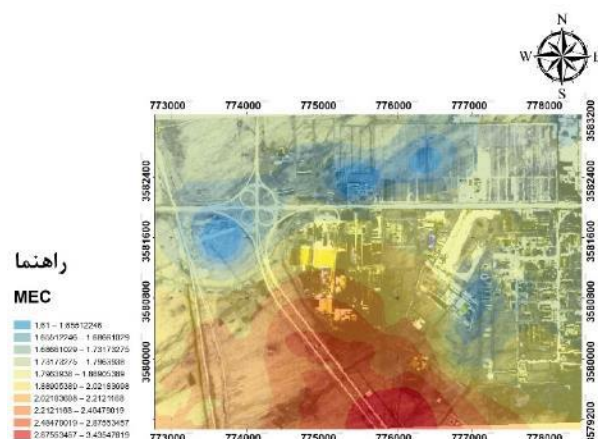
(ب)



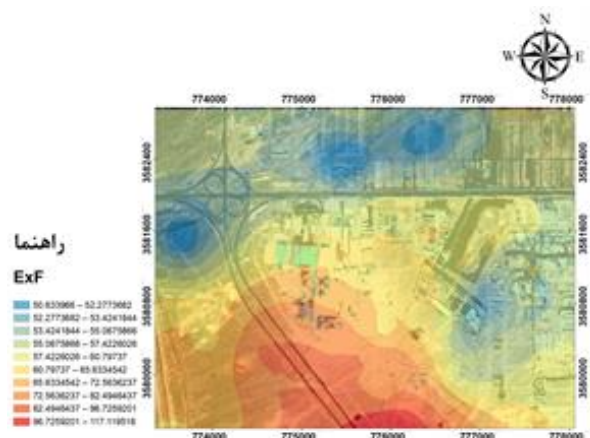
(آ)



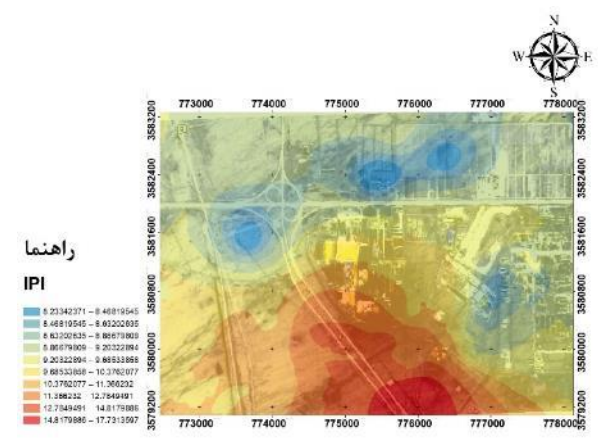
(ت)



(پ)



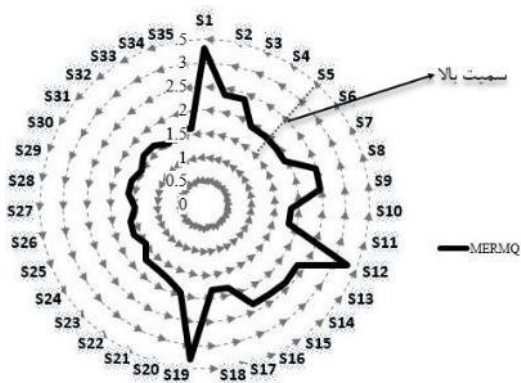
(ج)



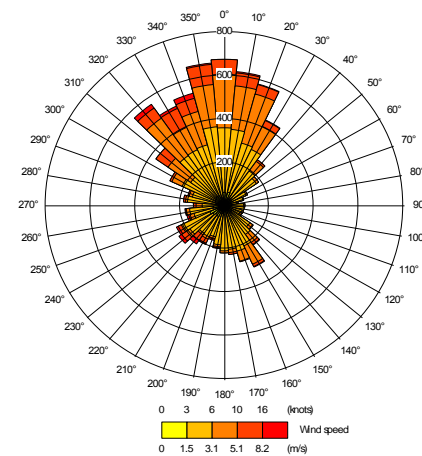
(ث)

شکل ۵: پهنه بندی شاخص‌های PIvector (آ)، PIN (ب)، MEC (پ)، PIwavg (ت)، ExF (ج) فلزات سنگین غبار اطراف صنایع

ارزیابی شاخص‌های آلودگی منفرد و تلفیقی برخی فلزات سنگین در غبار اتمسفری راسب شونده پیرامون صنایع خاک چینی، ...



شکل ۷: توزیع مقادیر شاخص MERMQ فلزات سنگین در ایستگاه‌های نمونه برداری



شکل ۶: گلاباد منطقه مورد مطالعه

غالب به سمت جنوب بود (شکل ۶). به این ترتیب اکثر ایستگاه‌های نمونه برداری که در پایین دست صنایع مورد بررسی بودند، در کلاس آلودگی بالاتر قرار گرفتند. دامنه تغییرات شاخص ریسک اکولوژیکی MERMQ برابر با  $3/29$  -  $1/48$  به دست آمد. بر اساس این شاخص، سه ایستگاه  $S_{24}$ ،  $S_{27}$  و  $S_{33}$  در کلاس آلودگی متوسط تا بالا (۴۹ درصد سمت) و ۳۲ ایستگاه دیگر در کلاس سمت بالا (۷۶ درصد سمت) قرار گرفتند (شکل ۷).

### بحث

شواهد حاکی از آن است که توسعه صنایع شیشه، کاشی و سرامیک، خاک چینی و شن ماسه در چند سال اخیر در شهر ستان اردکان باعث ورود طیف و سببی از آلاینده‌ها نظیر فلزات سنگین از طریق انتشار گاز و ذرات از دودکش‌ها و فرسایش بادی مواد اولیه و نیز پسماند انباشته شده در منطقه شده است. بنابراین ارزیابی شرایط آلودگی در اطراف این صنایع به منظور پیشگیری، کنترل و هشدار به جوامع بشری از اهمیت فراوانی برخوردار است. با این وجود، پژوهش حاضر با دو هدف سنجش غلظت فلزات سنگین در غبار اطراف

در شکل ۵، نقشه‌های پهنه بندی شاخص‌های  $PI_{vector}$ ،  $PI_N$ ،  $MEC$ ،  $PI_{wavg}$  و  $IPI$  نشان داده شده است. مطابق شکل، دامنه تغییرات شاخص‌های  $PI_{vector}$  برابر با  $35/93$  -  $15/91$ ،  $PI_N$  برابر با  $1360/60$  -  $2944/52$ ،  $MEC$  برابر با  $1/61$  -  $3/43$ ،  $PI_{wavg}$  برابر با  $20/11$  -  $42/27$ ،  $IPI$  برابر با  $17/73$  -  $8/23$  و  $ExF$  برابر با  $117/11$  -  $50/63$  بود. بیشترین مقادیر شاخص‌های  $MEC$  ( $3/43$ ) و  $PI_{vector}$  ( $35/93$ ) در ایستگاه‌های  $S_1$  و  $S_{15}$  ( $PI_{wavg}$  ( $42/27$ )) در ایستگاه‌های  $S_1$  و  $S_{12}$  ( $ExF$  ( $117/11$ )) در ایستگاه  $S_1$  به دست آمد. هر چند برای شاخص‌های  $PI_{vector}$  و  $PI_{wavg}$  کلاس آلودگی تعیین نشده است، اما با بررسی کلاس‌های آلودگی شاخص  $PI_N$  نتایج نشان داد، ۳۲ ایستگاه در کلاس آلوده و ۳ ایستگاه ( $S_1$ ،  $S_{12}$  و  $S_{19}$ ) در کلاس خیلی آلوده قرار دارند. بر اساس شاخص  $IPI$  کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری در کلاس شدیداً آلوده قرار گرفتند.

از سوی دیگر، بر اساس آمار و اطلاعات به دست آمده از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک به منطقه مورد مطالعه (ایستگاه هواشناسی میبد) و تحلیل میزان فراوانی باد و تعیین جهت باد غالب گلاباد منطقه تهیه گردید که طبق آن جهت باد

صنایع مذکور در فصل زمستان و ارزیابی درجه آلودگی آن بر اساس برخی شاخص‌ها صورت گرفت. نتایج نشان داد، میانگین غلظت فلزات سنگین در غبار به ترتیب روی ( $\text{mg/kg}$ )  $3310/54 <$  سرب ( $137/28 \text{ mg/kg}$ )  $<$  مس ( $\text{mg/kg}$ )  $63/65 <$  نیکل ( $45/91 \text{ mg/kg}$ )  $<$  آرسنیک ( $35/12 \text{ mg/kg}$ )  $<$  کبالت ( $13/73 \text{ mg/kg}$ )  $<$  مولیبدن ( $4/40 \text{ mg/kg}$ ) است. از طرف دیگر میانگین غلظت فلزات سنگین بالاتر از غلظت زمینه (کلیه فلزات سنگین) و پوسته زمین (به استثناء کبالت و نیکل) بود. به عبارت دیگر، میانگین غلظت روی، سرب، مس، نیکل، آرسنیک، کبالت و مولیبدن در کلیه ایستگاه‌ها نسبت به غلظت زمینه آن‌ها در خاک منطقه مورد مطالعه بسیار بیشتر بود. حداکثر غلظت مس، نیکل، کبالت و آرسنیک به ترتیب با مقادیر  $103$ ،  $69$ ،  $19$  و  $39/1$  میلی گرم بر کیلوگرم در ایستگاه‌های  $S_4$ ،  $S_5$ ،  $S_6$  و  $S_7$  که مابین صنایع مورد بررسی و مسیر ریلی انتقال کنسانتره سنگ آهن واقع اند، اندازه گیری شد که تقریباً در این ایستگاه‌ها مس و آرسنیک چهار، نیکل سه و کبالت دو برابر غلظت زمینه بود. از آن جا که مسیر ریل راه آهن در حاشیه غربی منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است و حمل مواد معدنی مختلف از جمله کنسانتره سنگ آهن برای مصرف در صنایع منطقه و همچنین سایر استان‌ها باعث انتشار مواد خام و اولیه در جریان انتقال از مسیر ریلی می‌شود. احتمالاً علاوه بر صنایع کاشی سرامیک، خاک چینی و شیشه، مسیر ریلی انتقال کنسانتره سنگ آهن در افزایش غلظت عناصر مس، نیکل، کبالت و آرسنیک تاثیر گذار بوده است. بر اساس تحقیقات Siyahati Ardakani و همکاران<sup>۱۸</sup>، Sistani و همکاران<sup>۴۰</sup> و Hormozi Nejad و همکاران<sup>۴۱</sup> فلزات سنگین مس، نیکل، کبالت و آرسنیک از عناصر اصلی در مواد اولیه تولید فولاد بوده که افزایش غلظت آن‌ها در غبار و خاک‌های سطحی مبین تاثیر صنایع فولاد است. همچنین نتایج نشان داد؛ حداکثر غلظت روی ( $5539$  میلی گرم بر کیلوگرم)، سرب ( $213$  میلی گرم بر کیلوگرم) و مولیبدن ( $5,20$  میلی گرم بر

کیلوگرم) در ایستگاه‌های  $S_{12}$  و  $S_{19}$  نزدیک به کارخانه فرآوری شن و ماسه و جاده میبد اردکان است. Mohamadi و همکاران<sup>۴۲</sup> بیان داشتند که غلظت روی و سرب در کنار جاده به علت پارگی و ساییدگی رزین تایرها، فرسودگی گاردریل حفاظ جاده‌ها و تابلوهای راهنمایی و رانندگی، بنزین سربدار و وزنه‌های سربی بالانس چرخ خودروها افزایش می‌یابد. کاربرد فلزات روی و مولیبدن در فرآیند تولید کاشی سرامیک در مراحل ایجاد پوشش فلزی بر روی کاشی و سرامیک (مولیبدن)، کاهش ویسکوزیته و تنش سطحی مذاب لعاب (اکسید روی) باعث انتشار بیشتر این فلزات در محیط می‌شود. سرب به شکل  $\text{PbO}$  در ایجاد شفافیت و صاف بودن شیشه نقش دارد. اکسید روی باعث افزایش مقاومت حرارتی و مکانیکی شیشه و خواص مکانیکی و شیمیایی آن می‌شود. پودر خاکستری  $\text{CoO}$  و پودر سیاه  $\text{Cu}_2\text{O}$  به عنوان مواد رنگی در تولید شیشه‌های رنگی نقش دارند. آرسنیک به عنوان یک ماده خام فرعی به شکل  $\text{ASO}_3$  برای ایجاد سهولت در حذف حباب‌های شیشه ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. همچنین این فلز عامل تصفیه کننده و متعادل کننده ی سیلیسیم در رنگ زدایی شیشه است<sup>۴۳، ۴۴</sup>.

با توجه به یکنواختی رخساره زمین شناختی (دشت سر پوشیده) که مجموعه کارخانجات و ایستگاه‌های نمونه برداری در آن قرار دارد، انتظار می‌رود در صورت وجود منشأ طبیعی غبار اتمسفری غلظت عناصر موجود در آن نیز نرمال و دامنه تغییرات آن کم باشد. این در حالی است که وجود منشأ انسانی می‌تواند دامنه غلظت را افزایش داده و در نقاطی بیش از حدود نرمال آن را فزونی دهد و عامل غیرنرمال شدن داده‌ها شود. لیکن در صورت غیرنرمال بودن داده‌های عناصر سنگین احتمال وجود منشأ انسان ساخت در آن با توجه به دوری یا نزدیکی به منشأ وجود دارد. نتایج تحقیق حاضر منعکس کننده توزیع غیرنرمال غلظت کلیه فلزات به استثناء کبالت در ایستگاه‌های نمونه برداری نصب شده اطراف صنایع مورد

العاده زیاد، برای مس حداقل تا چشمگیر، برای نیکل حداقل تا فوق العاده زیاد، برای سرب متوسط تا خیلی بالا و برای روی حداقل تا خیلی بالا اندازه گیری نمودند.<sup>۴۸</sup>

از شاخص  $PI_T$  برای تعیین آستانه آلودگی فلزات سنگین در کاربری‌های مسکونی، پارک، مرتع، کشاورزی و حفاظت محیط زیست که در محدوده مورد مطالعه بودند، استفاده شد. نتایج نشان داد روی برای کلیه نمونه‌ها و در کلیه کاربری‌ها در کلاس خیلی شدید آلودگی و کبالت در کلاس غیرآلوده این شاخص قرار دارند که این مطلب نمایانگر حساسیت محیط زیست نسبت به آلودگی فلز روی در منطقه است. چهار عنصر مولیبدن، آرسنیک، نیکل و مس برای چهار کاربری کشاورزی، مسکونی، پارک و مرتع در کلاس غیرآلوده و برای حفاظت محیط زیست در کلاس غیرآلوده تا کمی آلوده قرار دارند. فلز سرب برای دو کاربری مرتع و حفاظت محیط زیست در کلاس غیرآلوده و برای کاربری‌های کشاورزی و مسکونی در کلاس‌های کمی آلوده تا متوسط قرار داشت.

علاوه بر استفاده از شاخص‌های منفرد در ارزیابی آلودگی غبار صنایع از شاخص‌های تلفیقی استفاده گردید. بر اساس شاخص  $PI_N$  اکثر ایستگاه‌ها در کلاس آلوده قرار گرفتند. شاخص  $IPI$  کلیه ایستگاه‌های نمونه برداری را در کلاس به شدت آلوده قرار داد. نتایج تحقیقات Rezaipoor bagheadar و همکاران بر روی رسوبات باطله ناشی از فرآوری سنگ آهن در مجتمع معدنی چغارت بافق استان یزد نشان داد، مقادیر شاخص  $IPI$  در ۲۵ نمونه برداشته شده از منطقه در کلاس آلودگی متوسط قرار دارد.<sup>۴۹</sup> Dolezalova Weissmannova و همکاران در تحقیقی با هدف ارزیابی ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین در خاک‌های اطراف معدن زغال سنگ و ریخته گری استراوا جمهوری چک توانستند با استفاده از شاخص  $IPI$  آلودگی منطقه در کلاس شدید قرار دهند.<sup>۵۰</sup> در تحقیق حاضر مقادیر شاخص MEC بالاتر از عدد یک به دست آمد که اشاره به فعالیت‌های انسان زاد در افزایش غلظت فلزات

بررسی بود. تمامی این فاکتورها به نحوی می‌توانند تاییدکننده منشاء احتمالی از نوع انسان زاد فلزات سنگین به استثناء کبالت در غبار اطراف صنایع باشند. احتمالاً فعالیت صنایع غیرفلزی مورد بررسی و تردد و سایل نقلیه باعث افزایش غلظت فلزات سنگین شده باشد. در مطالعه Rout و همکاران بر روی غلظت فلزات سنگین در غبار ریزشی اطراف یک ناحیه معدنی زغال سنگ در هند، غلظت فلزات سنگین به صورت روی < سرب < مس < نیکل < کبالت اندازه گیری شد که مشابه نتایج مطالعه حاضر است.<sup>۴۵</sup> Cujic و همکاران غلظت فلزات سنگین در اطراف بزرگترین نیروگاه سوخت زغال سنگ را به صورت روی < نیکل < سرب < مس < کبالت اندازه گیری نمودند.<sup>۴۶</sup>

نتایج دیگر مطالعه حاضر نشان داد، بیشترین مقدار شاخص‌های منفرد  $PI$ ،  $CF$  و  $EF$  مربوط به فلز روی و سرب است که باعث قرارگیری این عناصر در بالاترین کلاس آلودگی شده است. بر عکس نیکل و کبالت در پایین ترین کلاس آلودگی این شاخص‌ها قرار داشتند. در پژوهش Sistani و همکاران بر روی ارزیابی غنای فلزی و درجه آلودگی فلزات سنگین سرب، روی و نیکل خاک‌های مجاور صنایع فولاد کرمان، نتایج نشان داد فلز نیکل در پایین ترین کلاس آلودگی شاخص‌های  $EF$  و  $CF$  قرار دارد. در حالی که فلزات سرب و روی بر اساس شاخص  $CF$  به ترتیب در کلاس‌های آلودگی متوسط و پایین و بر اساس شاخص  $EF$  به ترتیب در کلاس‌های قابل توجه و متوسط قرار گرفتند.<sup>۴۰</sup> Mohammad و همکاران در طی یک بررسی بر روی میزان آلودگی فلزات سنگین نیکل، مس، سرب و روی در مناطق صنعتی شهر بالاترین مقادیر شاخص  $PI$  مربوط به فلز نیکل است و فلز نیکل در کلاس‌های متوسط تا شدید، مس کم تا شدید، سرب بدون آلوده تا کمی آلوده و روی بدون آلودگی تا متوسط متغیر هستند.<sup>۴۷</sup> Ozkul غنی شدگی ( $EF$ ) فلزات سنگین در خاک اطراف نیروگاه تانک بیلک برای فلز آرسنیک چشمگیر تا فوق

نیز در بررسی آلودگی خاک‌های مجاور مجتمع فولاد مبارکه، جهت باد غالب را به عنوان عامل پراکنش فلزات سنگین در خاک منطقه معرفی کردند.<sup>۵۲</sup>

نتایج مطالعه حاضر می‌تواند مقادیر مرجع در مطالعات و ارزیابی‌های آینده کارخانجات مورد بررسی باشد. از آن جایی که غلظت فلزات سنگین مداوم در حال تغییر است بنابراین بایستی در بازده‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به درجه بالای آلودگی فلزات سنگین در غبار راسب شونده پیرامون صنایع، توصیه می‌شود که صنایع غیرفلزی مورد بررسی به ویژه صنایع شیشه و کاشی سرامیک به دور از نقاط مسکونی انتقال یابند. چرا که با توجه درجه آلودگی غبار، تحرک فلزات سنگین در دراز مدت باعث ورود این آلاینده‌ها به چرخه بوم شناختی خواهد شد و سلامت جوامع محلی اطراف را تحت تاثیر قرار خواهد داد. با توجه به فاصله دو کیلومتری صنایع مورد بررسی به اراضی کشاورزی ممکن است فلزات سنگین صنایع از طریق ترسیب اتمسفری وارد محصولات شوند و به دنبال آن باعث پدیدار شدن انواع بیماری‌ها در انسان شوند. بنابراین پیشنهاد می‌شود از کاشت محصول در زمین‌های کشاورزی اطراف صنایع ممانعت به عمل آید. از سوی دیگر قوانین زیست محیطی باید این کارخانجات را به استفاده از اقدامات احتیاطی و تکنولوژی‌های جدید برای حفاظت محیط زیست از آلاینده‌های خطرناک وادار نماید. از دیگر راهکارهای مدیریتی در راستای کنترل آلودگی غبار صنایع مورد بررسی، کاشت گونه‌های درختی و درختچه ای مقاوم به شرایط آلودگی منطقه در اطراف صنایع است. با توجه به غلظت زیاد فلزات سنگین مورد بررسی در غبار راسب شونده اتمسفری پیرامون صنایع کاشی سرامیک، شیشه، خاک چینی و شن ماسه توصیه می‌شود سلامت کارکنان این صنایع و ساکنین اطراف آن‌ها توسط مراکز بهداشتی منطقه دائما مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه دپوی ضایعات این صنایع در معرض مسیر باد قرار می‌گیرد، توصیه می‌شود

سنگین در غبار دارد. نتایج پهنه بندی شاخص‌های  $PI_N$ ،  $PI_{vector}$ ،  $PI_{wavg}$ ، MEC، ExF و IPI در محیط GIS نشان داد، بیشترین مقادیر شاخص‌ها  $PI_N$ ،  $PI_{vector}$  و MEC به ترتیب با مقادیر ۲۹۴۴/۵۲، ۳۵/۹۳ و ۳/۴۳ در ایستگاه‌های  $S_1$  و  $S_5$  بوده که این ایستگاه‌ها به ترتیب ۱۲۸۷ و ۱۰۶۵ متر از صنایع کاشی سرامیک، خاک چینی و شیشه و ۷۴۳ و ۵۱۲ متر از صنایع فرآوری شن و ماسه فاصله دارند. بیشترین مقادیر شاخص‌های  $PI_{wavg}$ ، IPI و MERMQ به ترتیب با مقادیر ۴۲/۲۷، ۱۷/۷۳ و ۳/۲۹ در ایستگاه‌های  $S_1$  و  $S_{12}$  با فواصل ۱۲۸۷ و ۵۲۵ متر از کارخانه کاشی و سرامیک و ۷۴۳ و ۵۲۸ متر از کارخانه فرآوری شن ماسه بود. بیشترین مقادیر شاخص ExF با مقدار ۱۱۷/۱۱ در ایستگاه  $S_1$  به دست آمد. نزدیکترین ایستگاه ( $S_{10}$ ) از صنایع کاشی سرامیک، خاک چینی و شیشه به فاصله ۱۲۷ متر بود که مقادیر شاخص‌های مورد بررسی در این ایستگاه کمتر تخمین زده شد. احتمالا به علت ارتفاع بلند دودکش صنایع، باد غالب منطقه، تاثیر جاده و مسیر ریلی انتقال سنگ آهن، دپو ضایعات صنایع باعث تجمع بیشتر آلاینده‌ها در فواصل دورتر شده باشد. همانند نتایج Siyahati Ardakani و همکاران<sup>۳۳</sup> و Hormozi Nejad و همکاران<sup>۴۱</sup>، ایستگاه‌های که حداکثر مقادیر شاخص‌ها در آن‌ها تخمین زده شد، در پایین دست صنایع و در جهت باد غالب منطقه واقع بودند. به عبارت دیگر جهت وزش باد در پراکنش عناصر موثر بوده و با توجه به اینکه در اکثر نقاط با دور شدن از کارخانه غلظت عناصر کاهش یافته است می‌توان چنین بیان کرد که کارخانجات مورد بررسی به عنوان منبع آلودگی می‌باشند و این امکان نیز وجود دارد، عناصر انتشار یافته از این صنایع پس از سال‌ها در خاک انباشته شده و باعث آلودگی خاک‌های منطقه شوند. Sadr و همکاران در ارزیابی آلودگی بخشی از خاک‌های استان اصفهان، ضمن معرفی فعالیت‌های صنعتی به عنوان مهمترین عامل در ورود فلزات به خاک، جهت باد غالب را در انتشار آن موثر تشخیص دادند<sup>۵۱</sup>. Khaledan و همکاران

MERMQ, ExF, MEC,  $PI_{wavg}$ ,  $PI_{vector}$ , PIN,  $PI_T$ , EF, PI و IPI استفاده گردید تا پویایی پراکنش را بر حسب آلودگی و وضعیت کلی آلودگی ایستگاه‌های نمونه برداری تشریح کنند. بر این اساس، میانگین غلظت کلیه فلزات سنگین غبار راسب شونده بالاتر از غلظت زمینه فلزات در خاک منطقه بود. بر اساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته، علاوه بر انتشارات صنایع احتمالاً عوامل دیگری نظیر مسیر انتقال کنسانتره سنگ آهن و تردد وسایل نقلیه در جاده‌ها در افزایش غلظت برخی عناصر تاثیر گذار بوده است. بر اساس شاخص‌های منفرد آلودگی، بالاترین میزان آلودگی برای فلز روی تخمین زده شد. همچنین شاخص‌های تلفیقی مورد بررسی منعکس کننده میزان بالای آلودگی فلزات سنگین در منطقه مورد بررسی بود. به طوری که شاخص IPI کلاس آلودگی فلزات سنگین را طبقه شدیداً آلوده و شاخص ریسک اکولوژیکی MERMQ در طبقه متوسط تا بالا قرار داد. بر اساس نتایج پهنه‌بندی تعدادی از شاخص‌های آلودگی، جهت باد غالب منطقه نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات سنگین در ایستگاه‌های پایین دست صنایع دارد.

### تشکر و سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه در مقطع کارشناسی ارشد با کد اخلاق IR.YAZD. REC.1398.027 است که با حمایت دانشگاه یزد اجرا شده است. نویسندگان از کلیه افرادی که در مراحل مختلف انجام این پژوهش یاری نمودند، نهایت سپاس و قدردانی ابراز می‌دارند.

### References

1. Neurosis B, Rostamy N, Tavakoli M, Rostami nia M. Evaluation of polluting industries effects on soil heavy metals (Case Study: Ilam Cement Factory). *Geo and Enviro Studies* 2016;5(19): 100-89 [In Persian].
2. Shojaee Barjoe S, Azimzadeh H, kuchakzadeh MR, et al. Dispersion and Health Risk Assessment of PM10 Emitted

دپوها در اراضی واقع در چند کیلومتری دور از مراکز جمعیتی حساس انتقال یابند.

برای اجرای عملی پژوهش حاضر، این تحقیق با یک سری محدودیت‌ها رو به رو بود. اصلی‌ترین محدودیت در مرحله نمونه برداری از غبار اطراف صنایع بود. پیدا نمودن مکان مناسب برای نصب تله‌ها و مخفی ماندن آن‌ها از دید مردم، تخریب و کنده شدن برخی از تله‌های غبار گیر توسط اهالی منطقه از مشکلات اجرایی این پژوهش بود. سایر محدودیت‌ها شامل زمان بر بودن جمع آوری غبار از تله‌های چمنی و انتخاب مکان مناسب و استریل برای جداسازی غبار، هزینه بالای مواد شیمیایی و اسید برای آنالیز نمونه‌ها بود. از آن جایی که این تحقیق در فصل زمستان برای برخی فلزات سنگین به نگارش در آمده است، پیشنهاد می‌شود غلظت عناصر سمی تر از جمله جیوه در فصول مختلف و در سالهای متوالی اندازه گیری و مورد بررسی قرار گیرد.

### نتیجه گیری

به طور کلی نتایج مطالعه حاضر نشان داد که غلظت فلزات سنگین در غبار اطراف صنایع همانند خاک‌های سطحی می‌تواند به صورت ابزار ژئوشیمیایی قدرتمندی برای پایش اثرات فعالیت‌های صنعتی صنایع مورد بررسی به کار گرفته شود. در این پژوهش، میزان غلظت فلزات سنگین سرب، کبالت، آرسنیک، باریوم، مس، مولیبدن و آلومینوم در غبار اطراف صنایع مورد بررسی با مطالعات آماری، غلظت زمینه و شاخص‌های آلودگی منفرد و تلفیقی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای درک پیچیدگی پراکنش آلاینده‌ها، مدل‌های ریاضی CF،

from the Stacks of a Ceramic and Tile industry in Ardakan, Yazd, Iran, Using the AERMOD Model. *Iran South Med J* 2019;22(5): 317-32 [In Persian].

3. Kamani H, Hoseini M, Safari Gh, al. e. Concentrations of Heavy Metals in surface soil of Zahedan City. *J Health* 2017;8(2): 182-90 [In Persian].

4. Shojaee Barjoe S, Azimzadeh H, MoslehArani A, Kuchakzadeh M. Occupational monitoring and health risks assessment of respiratory exposure to dust in an industrial unit of production Khak-e-Chini. *Occup Med* 2019;11(3): 14-25 [In Persian].
5. Kuo CC HB, Umans JG, et al. Arsenic exposure, arsenic metabolism, and incident diabetes in the strong heart study. *Diabetes Care* 2015;38(4): 620-7.
6. Thongsringklee M, Robson MG, Siriwong W. Health effects of low level exposure to lead among communication radio repair workers at Samutsakhon province, Thailand. *HERAJ* 2020: 1-8.
7. Attaeian B, Mortazavi S, Farokhzadeh B, M. K. Evaluation and Mapping Spatial distribution of Copper Pollution in Soil and Water of Vineyard Garden. *J Environ Health Eng* 2019;6(3): 293-310.
8. Gupta P. *Toxic Effects of Metals and Micronutrients. Concepts and Applications in Veterinary Toxicology*: Springer; 2019. p. 83-119.
9. Genchi G, Carocci A, Lauria G, et al. Nickel: Human Health and Environmental Toxicology. *Int J Environ Res Publ Health* 2020;17(3): 679.
10. Leyssens L VB, Van Der Straeten C, et al., Cobalt toxicity in humans—A review of the potential sources and systemic health effects. *Toxicology* 2017(387): 43-56.
11. Jiang X, Lu W, Zhao H, et al. Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2014;14(6): 1599-610.
12. Raheleh H KM, Khodai k, shahsawary AA, et al. Evaluation of pollution and ecological risk of heavy metals in surface soils around granitoids of Ahar-East Azarbaijan region. *Res Earth Sci* 2016;7(26): 1-20 [In Persian].
13. US EPA. Guidelines for ecological risk assessment: EPA/630/R- 95/002F. *Fed Regist* 1998;63(93): 26846-924.
14. Weissmannova, Helena Dolezalova, Pavlovsky JirI. Indices of soil contamination by heavy metals—methodology of calculation for pollution assessment (minireview). *Environ Monit Assess* 2017;189(12): 616.
15. Wu J, Teng Y, Lu S, et al. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PloS one* 2014;9(11): e112917.
16. Ravankhah N, Mirzaei R, Masoum S. Evaluation of geoaccumulation index, contamination factor, and principal component analysis for estimating soil contamination. *Iran J Health Environ* 2015;8(3): 345-56 [In Persian].
17. Yadegamia Naeini F, Azimzadeh HR, Mosleh Arani A, et al. Ecological risk assessment of heavy metals from cement factory dust. *Environ Health Engin Manag J* 2019;6(2): 1-9.
18. Siyahati Ardakani GhR, Mirsanjari M, Azimzadeh HR, Solgi E. The environmental assessment of some heavy metals in surface soil around pelletizing industries and Ardakan steel. *Iran J Health Environ* 2018;11(3): 464-49 [In Persian].
19. Huang S, Yuan C, Li Q, et al. Distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical Pb-Zn mining area. *Polish J Environ Studies* 2017 26(3): 1105-12.
20. Kwata MG. Comparison of methods for measurement of dust deposition in South African mining sectors (Doctoral dissertation, University of Pretoria). University of Pretoria; 2014.
21. Wysocka I, Vassileva E. Determination of cadmium, copper, mercury, lead and zinc mass fractions in marine sediment by isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry applied as a reference method. *J Microchemical* 2016;128: 198-207.
22. Sistani N, Moeinaddini M, Khorasani N, et al. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *Iran J Health Environ* 2017;10(1): 75-86 [In Persian].
23. Siyahati Ardakani G, Mirsanjari M, Azimzadeh H, Solgi E. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Topsoil around Major Industries of Ardakan City. *Toloo e Behdasht* 2019;7(6): 95-110 [In Persian].
24. Soil Resource Quality Standards and Guidelines. Iran Environmental Protection Agency 2014: URL: <http://environment-lab.ir/in> [In Persian].
25. Nazarpour A, Ghanavati N, Babaenejad T. Evaluation of the level of pollution and potential ecological risk of some heavy metals in surface soils in the Ahvaz oil-field. *Iran J Health Environ* 2017;10(3): 391-400 [In Persian].
26. Gong Q, Deng J, Xiang Y, et al. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *J China Univ Geosci* 2008;19: 230-41.
27. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res* 1980;14(8): 975-1001.
28. Qingjie G, Jun D, Yunchuan X, et al. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *J China Univ Geosci* 2008;19(3): 230-41.
29. Caeiro S, Costa MH, Ramos TB, et al. Assessing heavy metal contamination in Sado Estuary sediment: An index analysis approach. *Ecol Indicat* 2005;5: 151-69.
30. Sonomdagva C, Chultem B, Byambatseren C, et al. Contamination and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil of Major Cities in Mongolia. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16: 2552.
31. Kowalska JB, Mazurek R, Gasiorek M, Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive

- evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environ Geochem Health* 2018;40: 2395–420.
32. Kloke A. Contents of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants grown on contaminated soil. In UN-ECE Symposium, Geneva 1979 Aug 20.
33. Christophoridis C, Dedepsidis D, K. F. Occurrence and distribution of selected heavy metals in the surface sediments of Thermaikos Gulf, N. Greece. Assessment using pollution indicators. *J Hazard Mater* 2009;168(2-3): 1082-91.
34. Edith-Etakah BT, Shapi M, Penaye J, et al. Background concentrations of potentially harmful elements in soils of the Kette-Batouri region, Eastern Cameroon. *Res J Environ Toxicol* 2017;11: 40-54.
35. Tesleem O, Kolawole Akinade S, Olatunji MT, et al. Heavy Metal Contamination and Ecological Risk Assessment in Soils and Sediments of an Industrial Area in Southwestern Nigeria. *J Health Pollut* 2018;8(19): 1-16.
36. Kaydan Z, Nazarpour A, Ghanavati N. Evaluation of Soil Pollution with Heavy Metals (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni and V) in Ahvaz Parks (2016). *J Health* 2019;10(2): 228-39 [In Persian].
37. Wang X, Lei L, Huang K, Zhai Y. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *J Hazard Mater* 2009;161(2-3): 1058–62.
38. Naderizadeh Z, Ayoubi S, Khademi H. Assessment of concentration and heavy metals contamination in atmospheric dust from urban and industrial areas of Bushehr Province. *J Nat Environ* 2016;69(2): 531-48 [In Persian].
39. Mazloomi S, Esmaili-Sari A, Bahramifar N, Moeinaddini M. Assessment of the metals and metalloids level in street dust of the east and west of Tehran. *Iran J Health Environ* 2017;10(2): 281-92 [In Persian].
40. Sistani N, Moeinaddini M, Khorasani N, et al. Heavy metal pollution in soils nearby Kerman steel industry: metal richness and degree of contamination assessment. *IJHE* 2017;10(1): 75-86 [In Persian].
41. Hormozi Nejad Z, Rastmanesh F, Zarasvandi A. Contamination assessment of heavy metals in the soils around Khouzestan Steel Company (Ni, Mn, Pb, Fe, Zn, Cr). *J Econ Geol* 2016;8(2): 415-29 [In Persian].
42. Mohamadi M, Ghasemi R, Naeimi M. Distribution Pattern of Heavy Metals in Roadside Topsoils around the Rasht-Qazvin Freeway. *J Health* 2018;9(3): 249-58 [In Persian].
43. Andreola F, Barbieri L, Soares BQ, et al. Toxicological analysis of ceramic building materials—Tiles and glasses—Obtained from post-treated bottom ashes. *Waste Manag* 2019;98: 50-7.
44. Alghamdi AS, Almugren KS. Assessment of the chemical compositions and natural radioactivity in ceramic tiles used in some Saudi Arabian buildings. *J Aust Ceram Soc* 2019;55(4): 1099-107.
45. Rout TK, Masto RE, Padhy PK, et al. Dust fall and elemental flux in a coal mining area. *J Geochem Explor* 2014;144: 443-55.
46. Cujic M, Dragovic S, Dordevic M, et al. Environmental assessment of heavy metals around the largest coal fired power plant in Serbia. *Catena* 2016;139: 44-52.
47. Mohammad AF, Panahpour E, Nazarpour A. The Study on the Level of Pollution and Spatial Distribution of Concentrations of Heavy Metals (Cr, Ni, Cu, Pb and Zn) in the Industrial City of Mah-Shahr. *J Nat Environ* 2018;71(3): 399-412 [In Persian].
48. Ozkul C. Heavy metal contamination in soils around the Tunçbilek thermal power plant (Kütahya, Turkey). *Environ Monit Assess* 2016;188(5): 284.
49. Rezaipoor baghedar A, Vagharfard H, Azimzadeh H, et al. Using of the PI, IPI and Mcd indices for evaluating of contamination status of some metals in waste sediments caused by iron ore processing in Chogart Mineral Complex of Bafgh. *Arid Biome* 2016;6(1): 1-13 [In Persian].
50. Doležalova Weissmannova H, Mihocova S, Chovanec P, Pavlovsky J. Potential Ecological Risk and Human Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Industrial Affected Soils by Coal Mining and Metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *Int J Environ Res Publ Health* 2019;16(22): 4495.
51. Sadr S, Afyuni M. Spatial variability of arsenic under different land use in Isfahan region. *J Sci Tech Agr Nat Resour* 2010;13(50): 65-75.
52. Khaledan Sh, Taghavi L, Paykanpour Fard P. Investigation of spatial distribution of lead and cadmium using geostatistical techniques and GIS (case study: field's surrounding Mobarakeh steel complex). *Iran J Health Environ* 2017;10(2): 151-64 [In Persian].

# Evaluation of Individual and Integrated Pollution Indices of Some Heavy Metals in Atmospheric Dust Deposition Around Khak-e-chini, Tile and Ceramic, Sand and Gravel and Glass in Ardakan County Industries in Winter 2018

Saeed Shojae Barjoe\*, HamidReza Azimzadeh, Asghar Mosleh Arani

Department of Environmental pollution, Yazd University Yazd, Iran

\* E-mail: [said.shojae71@gmail.com](mailto:said.shojae71@gmail.com)

Received: 7 Dec 2019 ; Accepted: 18 Apr 2020

## ABSTRACT

**Background and objective:** Striving for employment in developing countries, as industries develop, heavy metals are released to the environment continuously. The purpose of this study was to measure heavy metal concentrations and to evaluate dust pollution levels in a number of industries using ecological indices.

**Methods:** This cross-sectional, descriptive-analytical study was conducted in winter by installing 35 dust traps around the industrial Khak-e-chini, Tile and Ceramic, Sand and Gravel and Glass in Ardakan county. The concentration of heavy metals in dust was measured by ICP-MS. The level of dust pollution was assessed using Contamination Factor, Pollution Index, Threshold Pollution Index, New Pollution Index, Vector Modulus of Pollution Index, Weighted Average of Pollution Index, Enrichment Factor, Multi-Element Contamination, Mean Effects Range-Median Quotient, Exposure Factor and Integrated pollution indices and it was zoned in GIS version 10.5.

**Results:** Mean heavy metal concentrations in dust were measured in the form of Zinc (3310.54 mg/kg) > Pb (137.28 mg/kg) > Copper (63.65 mg/kg) > Nickel (45.91 mg/kg) > Arsenic (35.12 mg/kg) > cobalt (13.73 mg/kg) > molybdenum (4.40 mg/kg). In all sampling stations CF index of lead, arsenic and zinc elements was in very high pollution class and PI index in severe pollution class. Zinc metal showed very high enrichment at 30 stations. For environmental protection user, zinc element PIT index in all sampling stations was very severe in the pollution class. Also, all stations were in severe pollution class based on the IPI index. Based on MERMQ index the heavy metals at 32 stations had 76% toxicity and based on  $PI_N$  index were in polluted class. Highest values of MEC (3.43) and  $PI_{vector}$  (35.93) indices were obtained at  $S_1$  and  $S_{15}$  stations,  $PI_{wAvg}$  (42.27) at  $S_1$  and  $S_{12}$  and ExF (117.11) at  $S_1$  stations.

**Conclusion:** Based on results of zoning a number of pollution indices, dominant downwind in region plays has important role in increase of concentration of heavy metals in downstream stations the industries.

**Keywords:** Heavy metals, Industries, Pollution indices, Atmospheric dust deposition