

مقایسه کیفیت هوای محیط کار و کاربرد تکنیک زمین آمار در توزیع مکانی $PM_{2.5}$ و PM_{10} در تعدادی از کارگاه‌های صنعتی

سعید شجاعی برجویی^{۱*}، حمیدرضا عظیم زاده^۲

چکیده

مقدمه: کیفیت هوا در کارگاه‌های صنعتی توسط عوامل زیان‌آور شیمیایی مختلفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. هدف این مطالعه مقایسه کیفیت هوای محیط کار تعدادی از کارگاه‌های صنعتی بر اساس تراکم جرمی و تعداد ذرات معلق در هوا و اجرای روش زمین آمار کریجینگ در صنایع است.

روش بررسی: این مطالعه مشاهده‌ای در چهار کارگاه صنعتی شامل کارگاه‌های تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب مس، تولید محصولات آلومینیومی و تولید شیشه دوجداره انجام شد. با استفاده از نمونه‌بردار Particle Mass Counter مدل Tes 5200، تراکم جرمی و تراکم تعداد ذرات معلق در ردیف قطرهای مختلف اندازه‌گیری شد. نقشه توزیع مکانی $PM_{2.5}$ و PM_{10} در هر یک از کارگاه‌ها با استفاده از روش زمین آمار کریجینگ در محیط GIS نسخه ۱۰/۵ تهیه شد.

نتایج: بیشترین تراکم جرمی ($8/42 \text{ mg/m}^3$) و تراکم تعداد ($445058 \text{ Particle/lit}$) در حالت افتراقی و $885446 \text{ Particle/lit}$ در حالت تجمعی) در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی اندازه‌گیری شد. بیشترین تراکم جرمی و تراکم تعداد ذرات معلق به ترتیب برای ردیف قطرهای $10 \mu\text{m}$ و $0/5 \mu\text{m}$ به دست آمد. تفسیر نقشه‌های کریجینگ نشان داد نواحی مختلفی نظیر کوره تابش، پرس قراضه، کوره ذوب آلومینیوم، الک، دستگاه دیاموند، کوره شیشه و قالب‌های شمش در کارگاه‌های مورد مطالعه بیشترین فراوانی $PM_{2.5}$ و PM_{10} را دارند.

نتیجه‌گیری: اجرای عملیات کنترل مهندسی نظیر نصب سیستم‌های تهویه در سالن‌ها و طراحی و نصب هود موضعی در بخش‌های ورودی کوره ذوب آلومینیوم و الک در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی و قالب‌های شمش مس در کارگاه ریخته‌گری و ذوب مس جهت بهبود کیفیت هوا ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ذرات معلق، زمین آمار، قطر آئروپنمیک، کارگاه‌های صنعتی، تراکم جرمی، تراکم تعداد

^۱ کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ دانشیار، گروه محیط زیست، دانشگاه یزد، یزد، ایران

* نویسنده مسئول؛ تلفن تماس: ۰۹۱۳۸۳۶۸۴۳۶، پست الکترونیک: said.shojaee71@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶

مقدمه

کیفیت هوای محیط کار توسط عوامل شیمیایی زبان‌آور مختلفی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گرد و غبار، اسپری، مه، دود، گاز، بخار از جمله عوامل زبان‌آور شیمیایی محیط کار است (۱) که طی فرآیندهای مختلف کاری نظیر جوشکاری، ریخته‌گری، تراشکاری، برش، سایش، سنگ‌زنی و غیره ایجاد می‌شوند (۲).

سالانه ۳ میلیون نفر در اثر مواجهه با آلاینده‌های هوا جان خود را از دست می‌دهند که ۹۰ درصد آن‌ها در کشورهای درحال توسعه زندگی می‌کنند. با این وجود هنوز تماس انسان با این آلاینده‌ها در محیط‌های مسکونی و شغلی وجود دارد و وضعیت کیفیت هوا در داخل ساختمان‌ها و محیط بیرون روز به روز بدتر می‌شود (۳).

He و همکاران معتقدند اندازه ذرات در برآورد مواجهات به دلیل توزیع متفاوت و زیست دسترسی‌شان از اهمیت بسیاری برخوردار است (۴). در واقع نتایج مطالعات نشان می‌دهد، اثرات بهداشتی ذرات معلق به میزان بسیار زیادی به‌اندازه آن‌ها بستگی دارد. Kong و همکاران ذرات معلق از نظر اندازه به پنج طبقه شامل کل ذرات معلق (TSP) با قطر آئروپدینامیکی معادل یا کمتر از ۱۰۰ میکرون، ذرات معلق درشت با قطر ۱۰ میکرون، ذرات ریز با قطر ۲/۵ میکرون، ذرات بسیار ریز با قطر ۱ میکرون، ذرات بسیار خیلی ریز با قطر ۰/۱ میکرون تقسیم نمودند (۵). ذرات معلق با اندازه کمتر از ۲/۵ و ۱۰ میکرون به دلیل داشتن سطح ویژه بسیار بالا می‌توانند آلاینده‌های مختلف محیطی را به عمق ریه نفوذ دهند و در نهایت سبب پیشرفت و ایجاد بیماری‌های تنفسی، قلبی عروقی و غیره شوند (۶).

کیفیت هوا و شدت مواجهه محیطی با ذرات معلق را می‌توان بر اساس تراکم جرمی و تراکم تعداد ذرات مورد سنجش قرار داد. اصطلاح تراکم جرمی و تراکم تعداد به ترتیب اشاره به وزن و تعداد ذرات در واحد حجم هوا (مترمکعب یا سانتی‌متر مکعب) دارد و در برخی مطالعات علاوه بر اندازه‌گیری تراکم جرمی، تراکم تعداد برای ارزیابی کیفیت هوا و میزان مواجهه در محیط‌های کار صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. برخی مطالعات نشان داده‌اند صرفاً اندازه‌گیری تراکم جرمی بدون توجه به تراکم تعداد برای ارزیابی کیفیت هوا و میزان مواجهه با ذرات معلق هوابرد در هوا کافی نمی‌باشد (۷)؛ به عبارت دیگر تراکم تعداد، نشانگر

بهتری از تراکم جرمی ذرات در ارزیابی کیفیت هوا است (۱).

با توجه به اینکه اکثر استانداردهای شغلی بر اساس تراکم جرمی ارائه شده‌اند، مطالعات بسیار اندکی در رابطه با ارزیابی کیفیت هوای محیط کار بر اساس تراکم تعداد ذرات معلق صورت گرفته است. برای مثال گلبابایی و همکاران میانگین مواجهه کارگران با کل ذرات معلق در صنعت آب ماستیک یک شرکت خودروسازی ($1/64 \text{ mg/m}^3$) پایین‌تر از حدود مجاز استاندارد تماس شغلی ایران OEL (3 mg/m^3) اندازه‌گیری نمودند (۸). عظیمی و همکاران در یک مطالعه مشاهده‌ای مواجهه با ذرات معلق قابل استنشاق در ۹۲/۴۷ درصد از کارگران یک واحد صنعتی کاشی سرامیک کم‌تر از حد مجاز TLV (3 mg/m^3) به دست آوردند (۹). صفی نژاد و همکاران مواجهه شغلی ۹۶/۶ درصد از کارگران معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان با ذرات معلق قابل استنشاق بالاتر از حدود استاندارد مجاز مواجهه شغلی ارائه شده از سوی سازمان ACGIH اندازه‌گیری نمودند (۱۰). توکل و همکاران میانگین مواجهه کارگران ساختمانی با گردوغبار قابل تنفس ۸/۹ میلی‌گرم بر مترمکعب اندازه‌گیری نمودند که بالاتر از حد مجاز استاندارد شغلی بود (۱۱).

برای ارزیابی وضعیت کیفیت هوا و اجرای کنترل‌های مهندسی و برنامه‌های حفاظت تنفسی مناسب در صنایع استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش زمین آمار (Geostatistic) به‌منظور راه‌اندازی مطالعات جامع‌تر غربالگری غلظت ذرات معلق هوا ضروری به نظر می‌رسد. امروزه به‌منظور ترسیم نحوه پراکنش و الگوی توزیع مکانی ذرات معلق از روش‌های زمین‌آمار نظیر کریجینگ می‌توان استفاده نمود. در واقع در روش‌های زمین‌آمار سطح پیوسته‌ای به کمک نقاط اندازه‌گیری ایجاد می‌شود تا در مکان‌های فاقد داده بتوان مقادیر مورد نظر را پیش‌بینی نمود. تفاوت اصلی روش زمین‌آمار با آمار کلاسیک این است که در آمار کلاسیک نمونه‌های جامعه مستقل از هم هستند و وجود یک نمونه هیچ اطلاعاتی در مورد نمونه بعدی به ما نمی‌دهد، اما در روش‌های زمین‌آمار وجود همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه موردبررسی قرار می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر با این تکنیک می‌توان با استفاده از داده‌های یک کمیت در مختصات

مساحت ۱۳۵ مترمربع و شبکه 4×4 متر در کارگاه تولید شیشه دوجداره به مساحت ۴۰۰ مترمربع به ترتیب ۳۰، ۱۵، ۱۵، ۲۵ نمونه از ذرات معلق با قطرهای مختلف تهیه شد. آنگاه با توجه به ضریب تغییرات به دست آمده برای هر قطر ذره و فرمول Kerbz (رابطه ۱) درصد خطای نمونه‌برداری تعیین گردید:

$$N_{\text{sample}} = \frac{t_{\alpha}^2 CV^2}{d^2} \quad (1)$$

که در آن مقدار t_{α} در سطح معنی‌دار ۵ درصد برابر با ۱/۹۶ با در نظر گرفتن درجه آزادی بی‌نهایت، CV درصد ضریب تغییرات (نسبت انحراف معیار به میانگین) تراکم جرمی ذرات معلق در هر یک از کارگاه‌ها و d نسبت خطای مجاز یا مورد نیاز (۱/۱۰ معادل ۰/۱) و N_{sample} تعداد نمونه مورد نیاز است (۱۵).

به‌منظور سنجش دقیق تراکم جرمی ذرات با قطر آئرو‌دینامیکی ۱، ۲/۵، ۴، ۷، ۱۰، ۱۰-۱۰۰ (TSP) میکرون برحسب میکروگرم بر مترمکعب و تراکم تعداد ذرات معلق در دو حالت تجمعی (Cumulative mode) و افتراقی (Differential mode) یا طبقاتی برای ذرات با قطرهای ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲/۵، ۴، ۵، ۷، ۱۰ میکرون بر حسب Particle/lit از دستگاه دیجیتالی با قرائت مستقیم Particle Mass Counter مدل Tes 5200 ساخت PROVA کشور تایوان استفاده شد (شکل ۱). اساس کار دستگاه، اندازه‌گیری پراکندگی زاویه‌ای یا پراکنش امواج نوری ناشی از یک دیود لیزری در اثر عبور ذرات معلق با ابعاد مختلف است.

مکانیسم کالیبراسیون در خود دستگاه، تحت لیسانس امریکا با استفاده از یک فیلتر استاندارد صفر صورت می‌گیرد. به این صورت، رابط پلاستیکی حاوی فیلتر استاندارد در ناحیه جریان ورودی هوای دستگاه نمونه‌بردار قرار داده می‌شود تا اعداد تراکم جرمی و تعداد ذرات معلق بر روی صفحه نمایشگر دستگاه صفر شود. با نمونه‌برداری از یک کارگاه دستگاه نمونه‌بردار مجدداً کالیبره گردید تا برای نمونه‌برداری از کارگاه دیگر خطای اندازه‌گیری کاهش یابد. در طول نمونه‌برداری تراکم جرمی و تعداد ذرات، شرایط کارگاه و کارکرد دستگاه در وضعیت یکسان و شرایط متداول شیف‌ت کاری قرار داشت؛ به عبارت دیگر کلیه نمونه‌برداری‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که نمایانگر یکسان بودن شرایط محیطی، تراکم جرمی و تعداد ذرات در طول شیف‌ت

معلوم، مقدار مجهول همان کمیت را در نقطه‌ای با مختصات معلوم دیگری تخمین زد.

در روش زمین آمار کریجینگ هدف یافتن اوزان آماری مشاهدات و نمونه‌ها است، به‌گونه‌ای که علاوه بر ناریب بودن تخمین (MS)، واریانس تخمین نیز حداقل گردد؛ بنابراین مهم‌ترین ویژگی کریجینگ، حداقل سازی واریانس تخمین (واریانس خطا) است. استفاده از روش‌های درون‌یابی مبتنی بر GIS در تعدادی از تحقیقات با اهداف مختلفی منعکس شده است. موسوی و همکاران در مطالعه-ای به بررسی نقش GIS در بهداشت حرفه‌ای و پتانسیل-های کاربرد آن در کنترل آلودگی هوا و نقشه‌برداری مواجهه آلاینده‌های شغلی پرداختند (۱۲). مجیدی و همکاران در تعیین نقاط دقیق نیازمند روشنایی داخلی در سالن مونتاژ یکی از صنایع بزرگ استان زنجان از تکنیک درون‌یابی مبتنی بر GIS استفاده نمودند (۱۳). محمدی کاجی و همکاران توانستند از روش درون‌یابی در محیط GIS برای طراحی نقشه‌های توزیع گرد و غبار و مواجهه کارگران با ذرات قابل استنشاق استفاده کنند (۱۴). بر این اساس در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی کیفیت هوای محیط کار در تعدادی کارگاه کوچک شامل تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش، تولید محصولات آلومینیومی، ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی و تولید شیشه دوجداره با اندازه‌گیری تراکم جرمی، تراکم تعداد و توزیع اندازه تعداد ذرات است. سپس با ایجاد نقشه‌های توزیع مکانی PM_{10} و $PM_{2.5}$ در نواحی مختلف کارگاه‌های مورد بررسی با استفاده تکنیک زمین آمار کریجینگ در محیط GIS به ارزیابی پراکنش این ذرات به‌منظور شناسایی نواحی برای اجرا اقدامات کنترلی بیشتر پرداخته می‌شود.

روش بررسی

این مطالعه مشاهده‌ای در چهار کارگاه صنعتی شامل کارگاه‌های تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی، تولید محصولات آلومینیومی و تولید شیشه دوجداره واقع در شهرک صنعتی فاز ۲ نجف‌آباد اصفهان اجرا گردید. در ابتدا با ایجاد شبکه شطرنجی منظم با فواصل 4×4 متر در کارگاه تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش به مساحت ۴۸۰ مترمربع، شبکه $2/5 \times 2/5$ متر در کارگاه ریخته‌گری و ذوب مس به مساحت ۹۴ مترمربع، شبکه 3×3 متر در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی به

قطرهای آئرویدینامیکی مختلف استفاده شد. همچنین از آزمون مقایسه میانگین دانکن برای مقایسه مقادیر تراکم - جرمی ذرات معلق با قطرهای آئرویدینامیکی مختلف در کارگاه‌های مورد بررسی استفاده شد. تراکم متوسط تعداد ذرات در دو حالت افتراقی و تجمعی در هریک از کارگاه‌ها با استفاده نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ به صورت نمودار ترسیم شد.

کاری باشد. تراکم جرمی کل ذرات اندازه‌گیری شده در هر کارگاه با حدود مجاز استاندارد تماس شغلی ایران OEL (3 mg/m^3) مقایسه گردید. کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری نظیر آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و مقایسه میانگین Duncan در نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۲ صورت گرفت. از آزمون‌های آماری آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای بررسی وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار کارگاه‌ها از نظر تراکم جرمی ذرات معلق با



شکل ۱. نمایشی از دستگاه شمارنده ذرات معلق Particle Mass Counter مدل Tes 5200 ساخت کشور تایوان

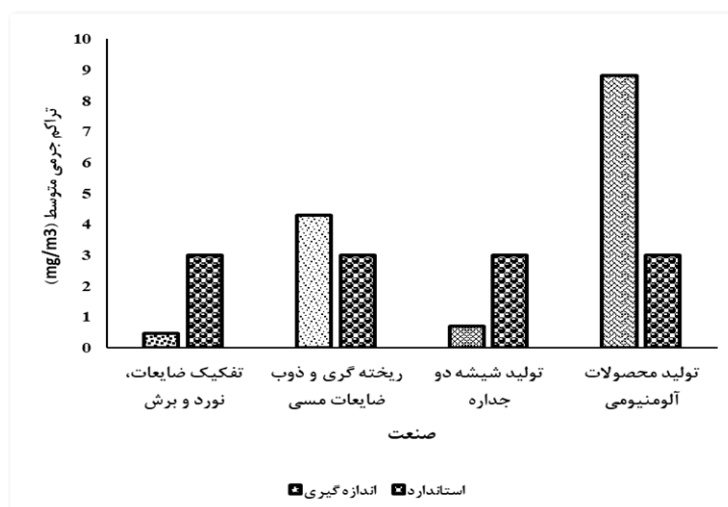
سنجی نظیر میانگین مجذور خطای استاندارد شده (Root mean square standardized error) و متوسط استاندارد شده (Mean standardized)، مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به اینکه واریوگرام به‌عنوان قلب روش زمین آمار محسوب می‌شود، لذا دقت در انتخاب واریوگرام سبب تهیه نقشه‌های درونیابی با دقت بیشتر خواهد شد. در این روش هر بار مقدار متغیر در یک موقعیت معلوم حذف گردید و با استفاده از نقاط مجاور، در هر مدل مقدار آن برآورد شد، سپس نقطه حذف‌شده مجدداً در فرآیند تخمین وارد گشت و این عمل برای تمامی ایستگاه‌ها انجام گرفت. در هر روش کریجینگ، مدل‌های مختلف واریوگرام با شاخص‌های ارزیابی و دقت سنجی مذکور انتخاب و هر یک از مدل‌ها که پس از

برای ارزیابی سطح مواجهه محیطی با ذرات معلق و شناسایی نقاط اصلاحی جهت کاهش آلودگی هوا در بخش‌های مختلف هر یک از کارگاه‌های مورد بررسی، نقشه‌های توزیع مکانی PM_{10} و $PM_{2.5}$ با استفاده از روش زمین آمار کریجینگ در محیط GIS تهیه شد. در ابتدا روش‌های مختلف کریجینگ نظیر معمولی (Ordinary)، ساده (Simple)، جامع (Universal)، نشانگر (indicator)، احتمالی (probability) و مجاور (disjunctive) و مدل‌های واریوگرام (variogram) آن‌ها نظیر کروی (Spherical)، نمایی (Exponential)، گوسی (Guassian) و دایره‌ای (Circular) از طریق اعتبارسنجی متقاطع (Cross validation) با استفاده از شاخص‌های ارزیابی و دقت

نتایج

با استفاده از فرمول حد کیفیت نمونه کربز، درصد خطای مجاز نمونه برداری برای هر قطر ذره کمتر از ۱۰ درصد تخمین زده شد بنابراین تعداد نمونه‌های گرفته شده از کارگاه‌های تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب مس، تولید محصولات آلومینیومی و تولید شیشه دوجداره مناسب بود. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد، بیشترین تراکم جرمی متوسط ذرات معلق فارغ از اندازه آن‌ها مربوط به کارگاه تولید محصولات آلومینیومی ($8/42 \text{ mg/m}^3$) و کمترین تراکم در کارگاه تفکیک ضایعات، نورد و برش ($0/47 \text{ mg/m}^3$) اندازه‌گیری شد. در این پژوهش تراکم جرمی متوسط دو کارگاه ریخته‌گری، ذوب ضایعات مسی و تولید محصولات آلومینیومی بالاتر و دو کارگاه تفکیک ضایعات، نورد، برش و ساخت شیشه دوجداره پایین‌تر از حدود مجاز استاندارد تماس شغلی ایران OEL (3 mg/m^3) برای گردوغبار کلی اندازه‌گیری شد.

اجرای هر روش کریجینگ دارای خطای برآورد کمتری بود به‌عنوان مدل بهینه واریوگرام انتخاب شد. انتخاب هریک از مدل‌های واریوگرام بستگی به حرکت واریوگرام تجربی در نزدیکی مبدأ بود. اگر پدیده موردنظر کاملاً پیوسته باشد، واریوگرام تجربی دارای حرکت سهمی گونه در نزدیکی مبدأ خواهد بود. در چنین شرایطی معمولاً مدل گوسی مناسب است. اگر واریوگرام تجربی در نزدیکی مبدأ حرکت خطی داشته باشد، هر دو مدل کروی و نمایی مناسب خواهد بود. ذکر این نکته قابل بیان است، به‌منظور امکان استفاده از مدل‌های واریوگرام در هر یک از روش‌های مختلف کریجینگ همبستگی مکانی و ناهمسان‌گردی داده‌ها بررسی و در نهایت مدل‌های قابل اجرا انتخاب شدند. وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها با رسم واریوگرام مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای نظیر اثر قطعه (Nugget)، حد آستانه (Sill)، تعداد گام (Lag) و دامنه (Range) از جمله پارامترهای بودند که قبل از اجرای هر مدل واریوگرام بهینه‌سازی شدند.



شکل ۲. مقایسه تراکم جرمی متوسط جمع ذرات معلق هریک از صنایع با استاندارد حدود استاندارد تماس شغلی ایران OEL (3 mg/m^3)

نتایج آزمون آماری آنالیز واریانس یک‌طرفه (جدول ۱) نشان داد تراکم جرمی ذرات PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، PM_4 ، PM_7 ، PM_{10} و TSP در هر یک از کارگاه‌ها مورد بررسی دارای اختلاف معنی‌داری ($P_value = 0/00$) است. نتایج آزمون مقایسه میانگین Duncan (جدول و شکل ۲) نشان داد بیشترین تراکم جرمی PM_{10} ($16/82 \text{ } \mu\text{g/m}^3$)،

در کارگاه ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی است که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر کارگاه‌هاست. ذراتی نظیر PM_7 ($1277/59 \text{ } \mu\text{g/m}^3$)، PM_{10} ($2238/10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) بیشترین تراکم جرمی در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی دارند که اختلاف معنی‌داری با کارگاه

تراکم جرمی ذراتی نظیر PM_{10} ($P_value = 0/60$)، $PM_{2.5}$ ($P_value = 0/92$)، PM_{10} ($P_value = 0/98$)، PM_{10} ($P_value = 0/96$) و PM_{10} ($P_value = 0/95$) در کارگاه‌های تولید شیشه دوجداره و تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش اختلاف معنی‌داری ندارند.

ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی ندارند ($P_value = 0/87$) و همچنین بیشترین تراکم جرمی TSP ($430/196 \mu g/m^3$) در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی به دست آمد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر کارگاه بود.

جدول ۱. نتیجه آنالیز واریانس یک‌طرفه تراکم جرمی ذرات معلق با قطره‌های آئرو‌دینامیکی مختلف در کارگاه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		TSP	PM_{10}	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	
کارگاه	۳	۶۶۹۷۸۵۶۹/۱۶**	۱۹۳۰۳۵۳۸/۴۶**	۷۲۱۰۳۹۵/۷۲**	۹۱۹۳۵۴/۶۹**	۱۱۲۱۹۸/۲۶**	۵۶۵/۰۸**
خطا	-	۷۸۹۲۳۴۷/۴۳	۲۸۷۵۰۴۷/۴۲	۹۷۱۴۸۵/۱۸	۶۲۱۵۰/۳۴	۶۹۹۶/۵۹	۳۷/۵۸

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

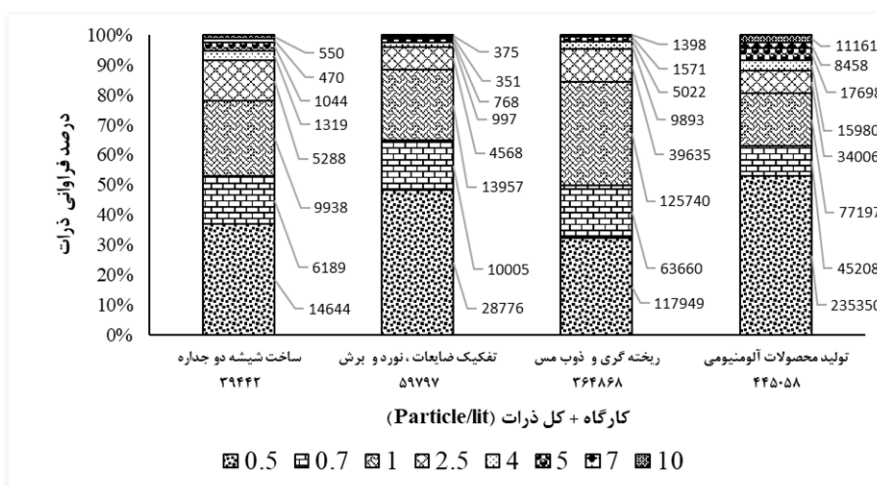
جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین تراکم جرمی ذرات معلق در کارگاه‌های مورد بررسی با استفاده از آزمون Duncan

کارگاه	تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش	ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی	ساخت شیشه دوجداره	ساخت محصولات آلومینیومی	PM/P_value
					$\mu g/m^3$
					PM_{10}
					P_value
					$PM_{2.5}$
					P_value
					PM_{10}
					P_value
					PM_{10}
					P_value
					TSP
					P_value

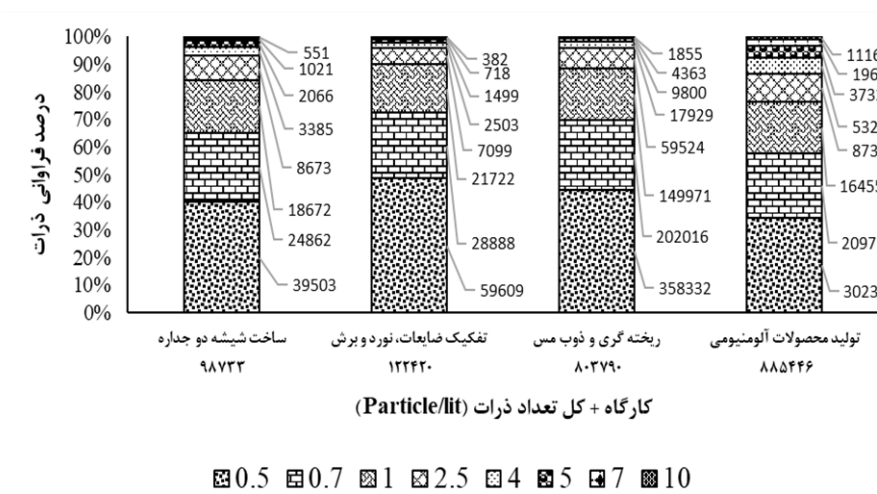
* ردیف با حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

دوجداره است. نتایج دیگر این پژوهش نشان داد بین تراکم جرمی و تعداد ذرات معلق در اندازه‌های مختلف رابطه خطی وجود ندارد. بیشترین تراکم تعداد مربوط به ذرات $0.5 \mu m$ و کمترین تراکم مربوط به ذرات $10 \mu m$ است. برعکس کمترین تراکم جرمی مربوط به ذرات $10 \mu m$ و بیشترین تراکم جرمی مربوط به ذرات $10 \mu m$ و TSP است.

نتایج تراکم متوسط تعداد ذرات در دو حالت افتراقی و تجمعی در شکل ۳ و ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین تراکم تعداد ذرات در حالت افتراقی ($445054 \text{ Particle/lit}$) و تجمعی ($885446 \text{ Particle/lit}$) در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی و کمترین تراکم در حالت افتراقی ($39442 \text{ Particle/lit}$) و تجمعی ($98733 \text{ Particle/lit}$) در کارگاه تولید شیشه



شکل ۳. تراکم متوسط تعداد ذرات معلق با قطرهای مختلف در حالت افتراقی بر حسب Particle/lit و درصد



شکل ۴. تراکم متوسط تعداد ذرات معلق با قطرهای مختلف در حالت تجمعی بر حسب Particle/lit و درصد

RMSS نزدیک به یک بود که بیانگر دقت آماری قابل قبول تخمین است.

برای کلیه صنایع مورد بررسی به استثنا تولید محصولات آلومینیومی مدل کروی برازش گردید. نقشه‌های توزیع مکانی PM_{10} و $PM_{2.5}$ حاصل از روش درون‌یابی کریجینگ، در بخش‌های مختلف کارگاه‌های مورد بررسی در اشکال ۵ الی ۱۲ نشان داده شده است. در کارگاه تولید شیشه دوجداره، بیشترین فراوانی $PM_{2.5}$ در نواحی اطراف کوره و خنک‌کننده آن و کمترین آن در اتاق چسب تخمین زده شد. بیشترین فراوانی PM_{10} در نواحی میانی دو دستگاه دیاموند و قسمت خنک‌کننده کوره و کمترین آن در اتاق چسب مشاهده گردید (شکل ۵ و ۶). در کارگاه تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش، بیشترین فراوانی

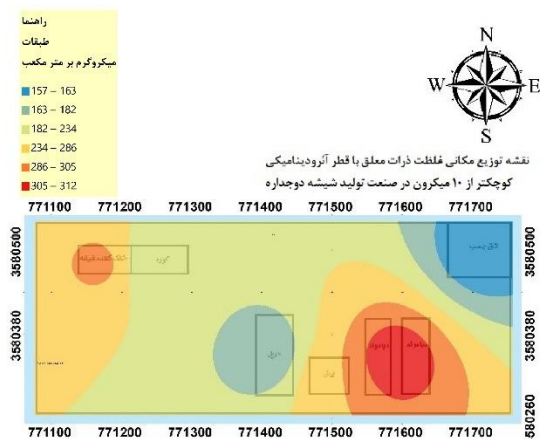
بر اساس تراکم جرمی، نقشه‌های توزیع مکانی $PM_{2.5}$ و PM_{10} در هریک از کارگاه‌ها تهیه شد. به این منظور دو شاخص دقت تخمین MS و RMSS برای انتخاب بهترین روش زمین آماری کریجینگ و مدل واریوگرام مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج انتخاب بهترین روش کریجینگ و مدل‌های واریوگرام مربوطه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی و دقت سنجی MS و RMSS در تهیه نقشه‌های توزیع مکانی تراکم جرمی ذرات برای هر یک از کارگاه‌های مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور ملاحظه می‌گردد در بین روش‌های مختلف کریجینگ روش جامع بهترین روش برای توزیع مکانی PM_{10} و $PM_{2.5}$ است. مقادیر MS نزدیک به صفر به دست آمد و بیانگر نارایب بودن تخمین‌ها در این روش کریجینگ است. همچنین

ذرات در قسمت‌های مخلوطکن و قالب‌گیری به حداقل می‌رسد. در قسمت الک فراوانی PM_{10} نسبتاً زیاد است (شکل ۹ و ۱۰). در کارگاه ریخته‌گری و ذوب مس بیشترین فراوانی $PM_{2.5}$ و PM_{10} در نواحی قالب‌های شمش مس مشاهده شد (شکل ۱۱ و ۱۲).

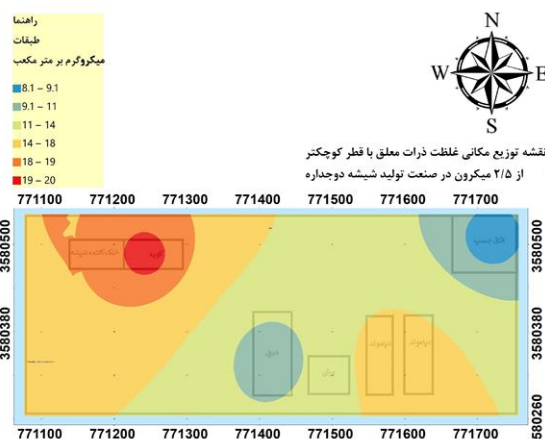
$PM_{2.5}$ و PM_{10} در نواحی اطراف کوره تابش، پرس، نورد و پرس قراضه پیش‌بینی شد (شکل ۷ و ۸). نقشه توزیع مکانی $PM_{2.5}$ در صنعت تولید محصولات آلومینیومی نشان می‌دهد که فراوانی این ذرات در اطراف کوره ذوب آلومینیوم بیشتر است و با دور شدن از کوره ذوب آلومینیوم از فراوانی این ذرات کاسته می‌شود به طوری که فراوانی این

جدول ۳. شاخص‌های دقت تخمین $PM_{2.5}$ و PM_{10} و مدل‌های مناسب برای رسم واریوگرام در صنایع مورد بررسی

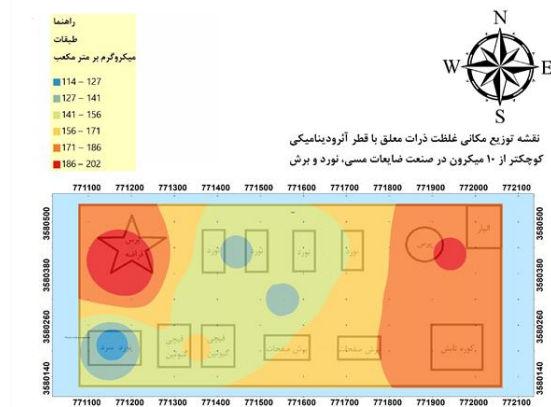
کارگاه	روش کریجینگ	مدل واریوگرام	متغیر	$PM_{2.5}$	PM_{10}
تولید شیشه دوجداره	جامع	کروی	RMSS	۰/۹۸۹	۰/۸۸۴
ضایعات مسی، نورد و برش	جامع	کروی	MS	۰/۰۸۲	۰/۰۷۲
تولید محصولات آلومینیومی	جامع	گوسی	RMSS	۰/۶۰۹	۰/۹۵۴
ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی	جامع	کروی	MS	۰/۰۴۲	۰/۰۸۶
			RMSS	۰/۸۸۷	۰/۴۵۳
			MS	۰/۰۶۱	۰/۰۳۳
			RMSS	۰/۶۸۳	۰/۵۷۵
			MS	۰/۰۵۲	۰/۰۴۲



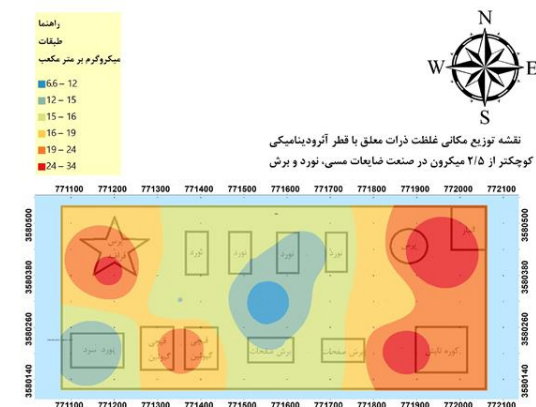
شکل ۶. توزیع مکانی تراکم جرمی PM_{10} در صنعت تولید شیشه دوجداره



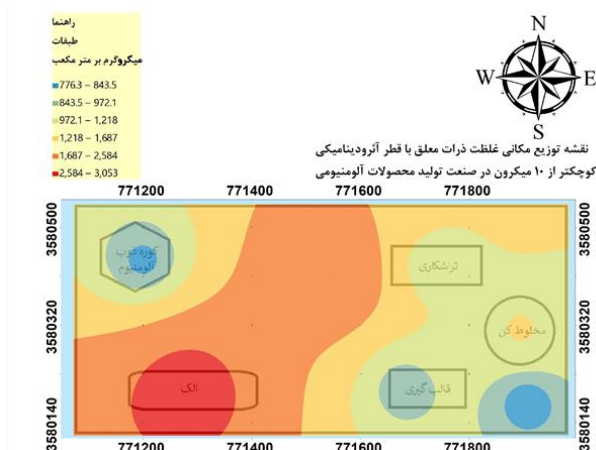
شکل ۵. توزیع مکانی تراکم جرمی $PM_{2.5}$ در صنعت تولید شیشه دوجداره



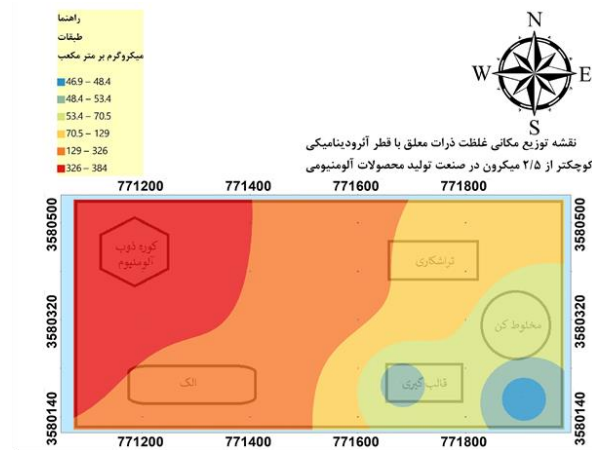
شکل ۸. توزیع مکانی تراکم جرمی PM_{10} در صنعت تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش



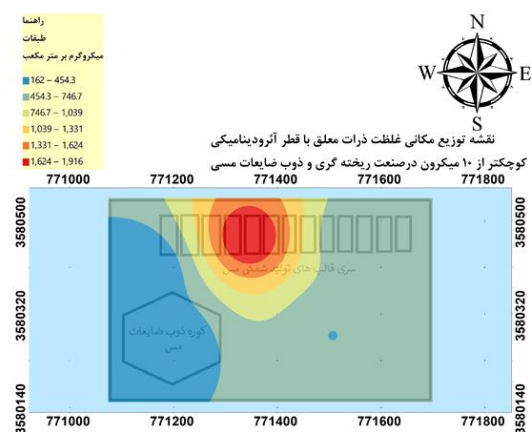
شکل ۷. توزیع مکانی تراکم جرمی $PM_{2.5}$ در صنعت تفکیک ضایعات مسی، نورد و برش



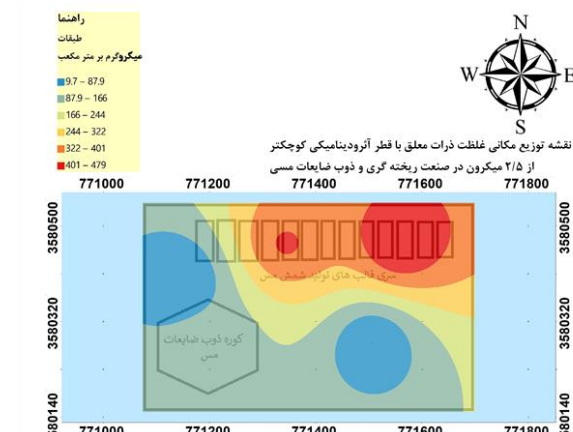
شکل ۱۰. توزیع مکانی تراکم جرمی PM_{10} در صنعت تولید محصولات آلومینیومی



شکل ۹. توزیع مکانی تراکم جرمی $PM_{2.5}$ در صنعت تولید محصولات آلومینیومی



شکل ۱۲. توزیع مکانی تراکم جرمی PM_{10} در صنعت ریخته گری و ذوب ضایعات مسی



شکل ۱۱. توزیع مکانی تراکم جرمی $PM_{2.5}$ در صنعت ریخته گری و ذوب ضایعات مسی

بحث

مطالعات انجام شده در زمینه اپیدمیولوژی محیط زیستی نشانگر این است که نه تنها تراکم جرمی، بلکه تراکم تعداد نیز نقش برجسته‌ای را در ارزیابی اثرات نامطلوب ذرات استنشاقی ایفا می‌کنند. از این رو در مطالعه حاضر، علاوه بر تراکم جرمی، تراکم تعداد ذرات با قطر آئرو دینامیکی متفاوت مورد سنجش قرار گرفت. در مطالعه حاضر متوسط تراکم جرمی ذرات، صرف نظر از قطر آن‌ها در چهار کارگاه تفکیک ضایعات، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب مس، ساخت شیشه دوجداره و تولید محصولات آلومینیومی به ترتیب برابر با 0.47 ، 4.12 ، 0.59 و 8.42 mg/m^3 به دست آمد. در بین صنایع مذکور کارگاه تولید محصولات آلومینیومی بالاتر از حدود مواجهه شغلی بود. در این زمینه، محمدی کاجی و همکاران توانستند متوسط تراکم جرمی ذرات معلق در صنعت الکتروود را برابر

با 8.61 mg/m^3 اندازه‌گیری کنند (۱۴) که بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در کارگاه‌های تفکیک ضایعات، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب مس، ساخت شیشه دوجداره و تولید محصولات آلومینیومی در این مطالعه است. Lee و همکاران توانستند تراکم جرمی فیوم‌های جوشکاری تا 24.4 mg/m^3 اندازه‌گیری کنند (۱۶). گلبابایی و همکاران، تراکم جرمی ذرات در بخش‌های مختلف صنعت سیمان در محدوده $1.89/1.77$ به دست آوردند (۱۷). فرکی و همکاران تراکم متوسط جرمی ذرات معلق در کلیه سالن‌های صنعت UPVC که شامل سالن موادسازی، اکسترودر و آسیاب بود، 39.31 mg/m^3 اندازه‌گیری نمودند. بیشترین تراکم جرمی در سالن مواد سازی (99.42 mg/m^3) و کمترین در سالن اکسترودر (29.75 mg/m^3) به دست آمد. همچنین در این پژوهش نتایج تراکم

را در جوش کاری قوس الکتریکی بر روی استیل کربن $200000 \text{ particle/cm}^3$ گزارش کردند (۲۰). Faroki و همکاران بیشترین تراکم متوسط تعداد ذرات معلق در حالت افتراقی در سالن موادسازی ۳۸۴۲۰۶۶ و کمترین در سالن اکسترودر $807017 \text{ particle/lit}$ اندازه‌گیری نمودند (۱۸) که مقادیر آنها بیشتر از صنایع تولید محصولات آلومینیومی، تفکیک ضایعات، نورد و برش، ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی، تولید شیشه دوجداره در این تحقیق است.

بهترین مکان‌ها برای اولویت اقدامات اصلاحی، با استفاده از تکنیک زمین آمار کریجینگ در محیط GIS شد. با ارزیابی مقادیر RMSS و MS بهترین مدل درون‌یابی کریجینگ انتخاب شد. نتایج این پژوهش نشان داد بهترین مکان‌ها برای اقدامات حفاظتی کارکنان در مقابل PM_{10} و $PM_{2.5}$ در کارگاه‌های تفکیک ضایعات، نورد و برش، نواحی نزدیک کوره تابش، پرس شمش مسی و پرس قراضه است. در فرآیند تفکیک ضایعات و متراکم کردن آنها و قرار دادن آنها در دستگاه پرس قراضه $PM_{2.5}$ انتشار می‌یابند. با جداسازی و محصور نمودن این مناطق در کارگاه مذکور می‌توان تا حدودی کیفیت هوای محیط را بهبود داد. در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی افزایش دما کوره و مذاب ضایعات آلومینیومی منجر به انتشار $PM_{2.5}$ می‌شود. ذرات PM_{10} با توجه به اندازه بزرگ‌تر، در اثر فرآیند لرزش الک و جداسازی ذرات، بیشتر منتشر می‌شوند. با توجه به اینکه انتقال کوره به مکان دیگر به‌منظور بهبود کیفیت هوای محیط کار امکان‌پذیر نیست و از طرف دیگر انتشار $PM_{2.5}$ در هنگام عملیات سرباره‌گیری افزایش می‌یابد، بهتر است کوره در ساعات مشخص و یک تا دو بار در روز روشن شود. در کارگاه ریخته‌گری و ذوب مس، ریختن مذاب مس در قالب‌های شمش مسی منجر به انتشار $PM_{2.5}$ و PM_{10} می‌شود. همچنین عملیات سرباره‌گیری کوره نقش مهمی را در انتشار ذرات به محیط کارگاه ریخته‌گری و ذوب مس دارد. از آنجایی که کارگاه مذکور مجهز به هیچ‌گونه سیستم تهویه مطبوع نمی‌باشد، نصب سیستم تهویه و هود به‌صورت موضعی در نواحی قالب‌های شمش مس در این کارگاه به‌منظور بهبود هوای محیط الزامی است. در صنعت تولید شیشه دوجداره، دستگاه دیاموند که وظیفه برش هم‌زمان شیشه را دارد یکی از عوامل مهم انتشار PM_{10} به محیط است؛ بنابراین نقشه

متوسط جرمی PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، PM_{4} ، PM_{10} و TSP در هریک از سالن‌ها این صنعت نشان داد بیشترین تراکم جرمی این ذرات در سالن آسیاب به علت فرآیندهای مکانیکی و کمترین در سالن اکسترودر است (۱۸). Buonanno و همکاران توانستند تراکم جرمی PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} در شرایط در صنعت خودروسازی به ترتیب $920 \mu\text{g/m}^3$ ، ۹۳۰ و ۹۳۰ تعیین کنند (۱۹). در پژوهش حاضر بیشترین تراکم جرمی PM_{10} ، $PM_{2.5}$ ، PM_{4} در کارگاه ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی و PM_{10} ، $PM_{2.5}$ و TSP در کارگاه ساخت محصولات آلومینیومی اندازه‌گیری شد.

نتایج دیگر این پژوهش نشان داد بین تراکم جرمی و تعداد ذرات رابطه غیرخطی وجود دارد. ذرات ۱۰ میکرون و TSP، بالاترین وزن و ذرات ۱ میکرون کمترین وزن دارا بودند. بر عکس ذرات ۰/۵ میکرون بیشترین تعداد و ذرات ۱۰ میکرون کمترین تعداد را داشتند. این رویکرد با نتایج پژوهش ساجدی‌فر و همکاران تطابق دارد (۶). این محققین بیان داشتند، بین تراکم تعداد و جرم به‌عنوان دو شاخص ارزیابی ذرات تطابقی وجود ندارد و با کوچک‌تر شدن قطر ذرات این عدم تطابق مشهودتر است. بیشترین تعداد ذرات در گروه ذرات بسیار ریز قرار می‌گیرند. این ذرات از نظر مساحت سطح، غالب‌ترین ذرات معلق هوا می‌باشند ولی سهم اندکی در میزان جرم کلی ذرات معلق هوا دارند. این بخش از ذرات معلق به‌طور عمده از احتراق ناشی شده و در مرحله دوم به‌عنوان ذرات ثانویه از تبدیل گاز به ذره ایجاد می‌شوند. این ذرات ذاتاً ناپایدار هستند و از طریق انعقاد و فشردگی به ذرات بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. از آنجایی که ذرات کوچک‌تر به قسمت‌های تحتانی‌تر دستگاه تنفسی نفوذ می‌کنند و پتانسیل بالاتری برای اعمال اثرات نامطلوب بهداشتی متعددی را دارند، لزوم سنجش و ارزیابی ذرات با قطر مختلف و به‌خصوص کسر ریزتر ذرات احساس می‌شود.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد بیشترین تراکم تعداد ذرات در کارگاه ساخت محصولات آلومینیومی $(445058 \text{ particle/lit})$ و کمترین تراکم تعداد در کارگاه ساخت شیشه دوجداره $(39442 \text{ particle/lit})$ در حالت افتراقی است. هرچند استاندارد بر اساس تراکم تعداد ذرات در محیط کار ارائه نشده است اما در این زمینه محققانی به ارزیابی تعداد ذرات در محیط کار پرداخته‌اند. به این منظور Stephenson و همکاران تراکم تعداد ذرات

در سالن کارگاه‌ها از جمله اقدامات ضروری در این زمینه است. همچنین با توجه به نقشه‌های حاصل از روش زمین آمار کریجینگ، نقاط نیازمند طراحی و نصب سیستم‌های هود موضعی برای کاهش انتشار ذرات معلق در محیط در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی بخش‌های ورودی کوره ذوب آلومینیوم و الک و در کارگاه ریخته‌گری و ذوب ضایعات مسی در نواحی قالب‌های شمش مس است.

سپاسگزاری

نویسندگان از رئیس محترم شهرک صنعتی فاز دو نجف‌آباد استان اصفهان و کلیه مدیر عاملین صنایع مورد بررسی جهت همکاری در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

فراوانی ذرات معلق می‌تواند فراوانی ذرات را در هر نقطه پیش‌بینی کند و با ارائه مناطق در معرض خطر ابزار مناسب‌تری برای مدیریت مواجهات باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج کلی حاصل از این مطالعه نشان داد، تراکم جرمی متوسط دو کارگاه تولید محصولات آلومینیومی و ریخته‌گری، ذوب ضایعات مسی بالاتر حدود مجاز استاندارد تماس شغلی ایران $OEL (3 \text{ mg/m}^3)$ برای گردوغبار کلی است. بیشترین تراکم جرمی و تعداد ذرات معلق در کارگاه تولید محصولات آلومینیومی و بعد از آن کارگاه ریخته‌گری، ذوب ضایعات مسی اندازه‌گیری شد؛ بنابراین این کارگاه‌ها با توجه به کیفیت پایین هوا، نیازمند اقدامات کنترل مهندسی هستند. نصب سیستم‌های تهویه

References:

1. Abolhasannejad V, Javad Assari M. *An overview of methods and instruments for the assessment of occupational exposure to nanoparticles*. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2015; 2(1):1-14. [Persian]
2. Nasrallahi Z, Ghaffari M. *Air Pollution in Iran's Manufacturing Industries (Case Study: CO₂ and NOx emissions from fossil fuels consumption)*. Quarterly Journal of Empirical Economics Studies of Iran. 2015; 1(1).
3. He RW, Li YZ, Xiang P, Li C, Cui XY, Ma LQ. *Impact of particle size on distribution and human exposure of flame retardants in indoor dust*. Environmental research. 2018; 162:166-72.
4. He R W, Li Y Z, Xiang P, Li C, Cui X Y, Ma L Q. *Impact of particle size on distribution and human exposure of flame retardants in indoor dust*. Environmental research. 2018; 162, 166-172.
5. Kong S F, Han B, Bai ZP, *Receptor modeling of PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP in different seasons and long-range transport analysis at a coastal site of Tianjin, China, Sci*. Total Environ. 2010; 408 :4681-4694.
6. Shojaee Barjoe S, Azimzadeh H, kuchakzadeh M, MoslehArani A, Sodaiezadeh H. *Dispersion and Health Risk Assessment of PM₁₀ Emitted from the Stacks of a Ceramic and Tile industry in Ardakan, Yazd, Iran, Using the AERMOD Model*. Iran South Med J. 2019; 22 (5):317-332. [Persian]
7. Sajedifar j, Kokabi A H, Azam K, Dehghan S F, Karimi A, Golbabaei F. *The comparative assessment of welding fumes based on mass and number concentration*. Journal of Health and safety at work. 2016; 6(4). [Persian]
8. Golbabaei F, Mokhtari A A, Rahimi A, Shahtaheri SJ. *Evaluation of workers' exposure to Metalworking Fluid (MWF) mist factors affecting its dispersion in an automobile manufacturing factory*. journal of kermanshah university of medical sciences. 2007;4(12): 413-423. [Persian]
9. Azimi M, Mansouri Y, Rezai Hachasu V, Aminaie F, MihanPour H, Zare Sakhvidi MJ. *Assessment of respiratory exposure of workers with airborne particles in a ceramic tile industry: a case study*. Occupational Medicine Quarterly Journal. 2018;10(1):45-53. [Persian]
10. Safinejad M, Azari MR, Zendehtdel R, Rafieepour A, Khodakarim S, Khodarahmi B. *Occupational and biological monitoring of workers exposed to airborne dust in Gol-e-Gohar Iron Ore mine*. Health. 2019;16(1):23-32. [Persian]

11. Tavakol E, Azari MR, Salehpour S, Khodakarim S. *Determination of construction workers' exposure to respirable crystalline silica and respirable dust*. J Saf Promot Inj Prev. 2016;3(4):263-70. [Persian]
12. Moussavi Najarkola SA, Mirzaei R. *The Role of GIS in Occupational Health Practice: A New Approach*. Health Scope. 2013; 2(3):116-8.
13. Madjidi F, Arghami S, Nadirkhanloo Z. *Application of GIS to study Illuminance in Workplace*. Iran Occupational Health. 2016;12(6):81-8.
14. Mohammadi Kaji S, Zare Sakhvidi M J, barkhordari A, mostaghasi M, Zare Sakhvidi F, Ghorbani R, Soltani gerd Faramarzi R. *The Application of GIS and Durable Contaminated Maps of Dust in the Workplace with the Purpose of Assessing Inhalation Exposure*. Journal of Occupational Medicine. 2016. 8(1): 34-42. [Persian]
15. Dehghan R, Rahimi M, nejad koorki F, Afshani A, Amini M. *Comparison of Dispersion of Air Pollutants Carbon Monoxide and Unburned Hydrocarbon Gases in Combustion Chamber of Gas and Gasoline Cars in the Years 2009-2013 in Shiraz*. jehe. 2019; 7 (1) :1-10. [Persian]
16. Lee MH, McClellan WJ, Candela J, Andrews D, Biswas P. *Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace*. Journal of Nanoparticle Research. 2007; 9(1):127-36.
17. Golbabaee F, Faghihi Zarandi A, Ebrahimnezhad P, Baneshi Mohammad R, Mohseni Takloo H, Shokri A R , Panahi D. *Assessment of Occupational Exposure of a Cement Production Plant with Inhalable Dust Crystal and Crystalline Silica*. Journal of Health and Safety. 2012; 2 (1). [Persian]
18. Faroki H, Shiyardeh M, Shojaee S. *An investigation of mass concentration, number, and distribution of dust particles in the main parts of the UPVC factory*. Studies Science Environmetal. 2019; 1 (4):954-964. [Persian]
19. Buonanno G, Morawska L, Stabile L. *Exposure to welding particles in automotive plants*. Journal of Aerosol Science. 2011;42(5):295-304.
20. Stephenson D, Seshadri G, Veranth JM. *Workplace exposure to submicron particle mass and number concentrations from manual arc welding of carbon steel*. AIHA. 2003;64(4):516-21.

Comparison of work environment air quality and application of geostatistic technique in the spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in a number of industrial workshops

Shojaee Barjoe S*, Azimzadeh HR

Department of Environmental Sciences, School of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract

Introduction: Air quality in industrial workshops is affected by various harmful chemical agents. Purpose of this study was to compare work environment air quality in a number of industrial workshops based on the mass concentration and number of suspended particles in air and application of Kriging geostatistical method in industries.

Materials and Methods: This observational study was carried out in four workshops including cuprous waste separation works, rolling and cutting, casting and copper smelting, manufacturing aluminum products and double-glazed glass production. Using particle mass counter sampler of Tes 5200 model, mass concentration and number concentration of suspended particles in row of different diameters were measured. The spatial distribution map of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in each of workshops was prepared using Kriging geostatistic method in GIS environment Version 10.5.

Results: The highest mass concentration (8.42 mg/m^3) and number concentration (445058 Particle/lit in differential mode and 885446 Particle/lit in cumulative mode) were measured in the manufacturing aluminum products workshop. The highest mass concentration and number concentration of suspended particles were obtained for row diameters of $10 \mu\text{m}$ and $0.5 \mu\text{m}$, respectively. Interpretation of Kriging maps showed that various areas of the industries such as radiation furnace, scrap press, aluminum smelter, sieve, diamond machine, glass furnace and ingot molds had the highest frequency of $PM_{2.5}$ and PM_{10} .

Conclusion: Engineering control actions such as installation of ventilation systems in halls and design and installation of a local hood in the entrance sections of the aluminum smelting furnace and sieve in manufacture of aluminum products workshop and copper ingot molds in casting and smelting workshop is essential for improved air quality.

Key words: Suspended particles, Geostatistics, Aerodynamic diameter, Industrial Workshops, Mass Concentration, Number Concentration

This paper should be cited as:

Shojaee Barjoe S, Azimzadeh HR. ***Comparison of work environment air quality and application of Geostatistic technique in the spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in a number of industrial workshops.*** Occupational Medicine Quarterly Journal 2020;11(4): 23-35.

****Corresponding Author:***

Email: said.shojaee71@gmail.com

Tel: +98 9138368436

Received: 17.07.2019

Accepted: 14.01.2020