

بررسی غلظت جرمی، تراکم تعداد و توزیع اندازه تعداد ذرات معلق (PNSD) در بخش های اصلی

تولید محصول یک کارخانه تولید پروفیل UPVC

هادی فرخی^{۱*}، سید مهدی جبارزاده شایده^۲، سعید شجاعی برجوئی^۳

۱- دانشجوی دکتری، آلودگی های محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

*نویسنده مسئول: hadiraad57@gmail.com

۲- استادیار، گروه آلودگی های محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

۳- دانشجو کارشناسی ارشد، آلودگی های محیط زیست، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۶

چکیده

ذرات معلق از جمله عوامل مهم زیان آور محیطی هستند که بر سلامت انسان تاثیر دارند. در این مطالعه، غلظت جرمی، توزیع اندازه تعداد، تراکم تعداد و روند تغییرات ذرات در یک بازه زمانی مشخص در کارخانه تولید محصول UPVC مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه حاضر به صورت مقطعی در بخش های مختلف یک کارخانه UPVC انجام شده است. بیشترین میانگین غلظت جرمی ذرات با قطر آئرودینامیکی ۱، ۲/۵، ۴، ۷، ۱۰ میکرون و TSP و تراکم تعداد ذرات با قطر ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲/۵، ۴، ۷، ۱۰ در سالن مواد سازی و کمترین در سالن اکسترودر مشاهده شد. میانگین کل غلظت جرمی و تراکم تعداد ذرات مجموعاً در سه سالن به ترتیب برابر با $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ۲۷۲۸۶/۳۷ \pm ۳۹۳۱۳/۹۳ و 6295221 ± 191025 ذره بر متر مکعب ارزیابی شد. همچنین بیشترین فراوانی ذرات با قطر کوچکتر از ۷ و ۷-۱۰ μm به ترتیب در سالن مواد سازی و آسیاب و کمترین آن به ترتیب در سالن آسیاب و موادسازی است. به علت بالا بودن غلظت جرمی و تراکم تعداد ذرات، اجرای کنترل های مهندسی و برنامه های حفاظت تنفسی مناسب در سالن آسیاب ضروری است.

کلمات کلیدی

"ذرات معلق"، "UPVC"، "غلظت جرمی"، "تراکم تعداد"

An Investigation of Mass Concentration, Number, and Distribution of Dust Particles in the Main Parts of the UPVC Factory

Hadi Farrokhi^{1,*}, Seyyed Mehdi Jabbarzadeh Shaydeh², Saeed Shojaei Barouei³

1. Ph.D Student, Environmental Pollution, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

2. Assistant Professor, Department of Environmental Pollution, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

3. Student, Masters, Environmental Pollution, Yazd University, Yazd, Iran

*Email Address: hadiraad57@gmail.com

Abstract

Dust causes the hazardous effect on human health. In recent research, mass concentration, number of particles, and its distribution, as well as trend changes, is considered at the identified time interval in the UPVC factory. This cross sectional study was conducted in different sections of a UPVC plant. The maximum mean mass concentration of 0.7, 1, 2.5, 4, 10 μm , Total Suspended Particles (TSP), the number of particles with 0.5, 0.7, 1, 2.5, 4, 7 and 10 μm diameter were measured in mixing primary material hall, and the minimum was measured in extruder hall. Mean total concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and the number of particles (particles/ m^3) in three halls was measured in the range of $39313.93 \pm 27286.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and 6295221 ± 191025 particles/ m^3 , respectively. The maximum number of particles with the diameter less than 7 μm and 7-10 μm were measured in mixing primary material and grinding halls. Due to the high mass concentration and number of particles, it is recommended to execute the dust controlling management in grinding hall.

Keywords

"Suspended particles", "UPVC", "mass concentration", "Number density"

مواجهه طولانی مدت با $PM_{2.5}$ ، با انواع بسیاری از سرطان‌ها نظیر سرطان دستگاه گوارش فوقانی، سرطان ارگان‌های گوارشی جانبی، سرطان ریه در مردان و سرطان سینه در زنان مرتبط است (Wong and et al, 2016). بنابراین، تعیین رابطه بین اندازه، تراکم تعداد (تعداد ذرات در متر مکعب) و غلظت جرمی (وزن ذرات در متر مکعب) ذرات با استفاده از ابزارهای سنجش جرم برای بررسی اثرات بهداشتی مهم است (Vianna and et al, 1981). در رابطه با تخمین تراکم تعداد، غلظت جرمی و توزیع اندازه ذرات معلق در هوا مطالعات متعددی صورت گرفته است. تتر و همکاران (۲۰۱۷) با هدف تعیین ارتباط بین مقدار ذرات معلق با فعالیت‌های نظیر باز کردن در اتاق، تردد و سایر فعالیت‌ها در بخش‌های مختلف بیمارستان جان‌هاپکینز به این نتیجه رسیدند که حداقل یک در اتاق عمل در ۴۷ درصد نمونه‌گیری‌ها باز است. میانگین $APCS$ (تراکم تعداد ذرات معلق هوا) در خطوط اصلی و اتاق عمل به ترتیب ۹/۲۳۸ و ۱۴/۲۹۲ ذره در متر مکعب ارزیابی شد و به ازای باز بودن هر در، تراکم تعداد ذرات معلق ۱۳ درصد افزایش یافت (Teter and et al, 2017) ($p < 0.015$). Bhangar و همکاران (۲۰۱۶) در طی یک تحقیق آزمایشی چهار روزه در بخش خصوصی مراقبت‌های ویژه نوزادان با هدف ارزیابی تراکم تعداد، غلظت جرمی و توزیع ذرات در یک اتاق کودک بدون نوزاد و یک مکان پرورش اطفال زودرس به این نتیجه رسیدند که، مقادیر ذرات خیلی ریز (۱ - ۰/۳ میکرومتر) در اتاق به دلیل فیلتراسیون بالا ذرات با کارایی بالا، سه تا چهار مرتبه پایین‌تر از خارج از اتاق است. بخشی از تعداد ذرات در مکان پرورش اطفال زودرس با محدوده ۰/۲ (برای ذرات با قطر بیشتر از ۱۰ میکرومتر) تا ۰/۶ (برای ذرات با قطر ۰/۵-۰/۳ میکرومتر) تعیین شد. همچنین نتایج نشان داد غلظت ذرات با افزایش نوزادان و مدت و فعالیت کارکنان افزایش می‌یابد (Bhangar and et al, 2016). زانگ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از نمونه‌بردار GRIMM1109 با زمان نمونه‌برداری ۶ ثانیه و جمع‌آوری داده به صورت میانگین یک دقیقه توانستند غلظت-جرمی و تراکم PM_1 ، $PM_{2.5}$ و PM_{10} در یک سلف دانشگاه در واحدهای باز و بسته پخت‌وپز اندازه‌گیری کنند. نتایج نشان داد غلظت PM_1 در محیط‌های باز و بسته نسبت به سایر ذرات عمدتاً بیشتر است و پخت‌وپز نقش مهمی در افزایش ذرات معلق دارد. نتایج دیگر این تحقیق نشان داد غلظت جرمی PM_{10} در کافه‌تریای روباز می‌تواند ۰/۴۵ میلی‌گرم بر متر مکعب باشد که ۸/۵ بار بیشتر از سلف سنتی دانشجویی است (Zhang and et al, 2017). کیم و همکاران (۲۰۱۷) با اندازه‌گیری تراکم PM قابل استنشاق توسط کاربران مترو در دو ایستگاه حمل‌ونقل سئول و کره به این نتیجه رسیدند که، تراکم تعداد ذرات (PNC)

آلودگی هوا یکی از مهمترین مسائل مهم سلامت انسان و اثرات زیان‌آور ذرات معلق هوا بر یکی از نگرانی‌های مهم محسوب می‌شود. مطالعات اپیدمیولوژی نشان داده است که سطوح ذرات معلق در هوا با اثرات بهداشتی منفی کوتاه و بلند مدت رابطه دارد (Huang and Lin, 2003) (Jaffe and et al, 2014). امروزه آلودگی هوا ناشی از ذرات معلق از مقوله‌های بحث‌انگیز و مشکل‌آفرین کشور ماست و در این میان کارخانجات صنعتی حتی علی‌رغم داشتن سیستم‌های تصفیه صنعتی، سهم قابل توجهی در انتشار آلاینده‌های هوا دارند (منصوری و همکاران، ۱۳۹۰). ذرات معلق ناشی از کارخانجات PVC یکی از سمی‌ترین آلاینده‌ها است. PVC با پلیمریزاسیون مونومرهای ونیل کلراید (VCM) تولید می‌شود. منابع متعددی در رابطه با اثرات سمی حاد ونیل کلراید (VC) بر روی سلامت انسان وجود دارد. نتایج مطالعات تجربی بر روی موش‌ها نشان داده است مونومرهای ونیل کلراید در دوزها و غلظت‌های مختلف اثرات سرطان‌زایی بالقوه‌ای بر انواع بافت و اندام‌های مختلف دارد. مواجهه موش‌ها با غلظت ۵۰۰۰۰ ppm ونیل کلراید منجر به آتاکسی و مشکل تنفسی می‌شود (Zarei and et al, 2010). آنژیوسارکوما (Angiosarcoma) کبد (تومورهای عروقی غیرمعمول)، سرطان‌های سیستم گوارشی، تنفسی، عصبی و لنفوی در اغلب کارگرانی که در مواجهه با مونومرهای ونیل کلراید هستند شایع است (Vianna and et al, 1981). در همه مطالعات انجام شده مواجهه با ذرات معلق (PM) با تعیین غلظت جرمی (میکروگرم بر متر مکعب) ذرات با قطر ائرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرومتر (PM_{10}) یا کمتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) ارزیابی شده است (Wichmann and et al, 2000). نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تراکم تعداد، نشانگر بهتری از غلظت جرمی ذرات است به طوری که تراکم ذرات را یکی از مهمترین شاخص‌های کیفیت هوا دانسته‌اند (Gomišček and et al, 2004). روس کائن و همکاران (۲۰۰۱) بیان کردند که برای ارزیابی جامع کیفیت هوا، هم تراکم تعداد و هم غلظت جرمی ذرات اهمیت ویژه‌ای دارند (Ruuskanen and et al, 2001). از طرف دیگر اندازه ذرات مهم است. ذراتی که قطر بزرگتر و کوچکتر از ۲/۵ میکرومتر دارند معمولاً به عنوان ذرات درشت و ریز یاد می‌شوند. ذرات کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر به ذرات خیلی ریز یا نانو ذره معروفند (Soysal and et al, 2017). هرچقدر اندازه ذرات کوچکتر باشد به علت سطح ویژه نسبتاً بزرگتر آن‌ها و ورود آن‌ها به بخش‌های عمیق‌تر ریه می‌تواند اثرات مضر بر بدن انسان داشته باشند (Ozgen and et al, 2016). به گونه‌ای که

اکسترودر از چهار بخش تشکیل شده است که شامل: قیف تغذیه کننده برای ورود مواد به اکسترودر، سیلندر حاوی ماردون جهت فشردن و راندن مواد در طول سیلندر، قالب خمیر، کالیبراتور حاوی خلأ برای خنک کردن مواد قالب شده، کشش، برچسب زن، برش و پالت محصول می باشد. محصول به دست آمده برای چاپ تصویر وارد دستگاه چاپ شده و از آنجا بسته بندی می شود. ضایعات تولید شده از دستگاه اکسترودر وارد سالن آسیاب و خردکن برای بازیافت مواد می شود. برای نمونه گیری از ابزار Particle Mass Counter مدل TES-5200 با نام عمومی پایشگر حجمی و شمارنده پرتابل ذرات قادر به سنجش تراکم تعداد ذرات در ۸ کانال در اندازه های کمتر از ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲/۵، ۴، ۷، ۱۰ میکرون و غلظت جرمی ذرات با قطر آئرو دینامیکی ۱، ۲/۵، ۴، ۷، ۱۰ و TSP است صورت گرفت. با انجام پیش-آزمون و با در نظر گرفتن خطای نوع اول ۵٪ و توان ۸۰٪ و استفاده از فرمول کوکران در برآورد حد کفایت نمونه برای یک میانگین (بعد از تصحیح برای جامعه محدود) حداقل تعداد نمونه مورد نیاز ۴۸ نمونه تعیین گردید. برای بررسی دقیق تر و بالابردن توان آزمون، مجموعاً تعداد ۶۰ نمونه از قسمت های اصلی کارخانه اندازه گیری شد. نمونه گیری کاملاً تصادفی و به صورت لحظه ای یا گراب (Grab sample) با حجم نمونه برداری ۲/۸۳ لیتر در ارتفاع ۱/۵ متر انجام گرفت. نمونه برداری در پنج روز در ساعات و دقایق مختلف در سه سالن اصلی فرآیند تولید انجام گردید و فاصله زمانی بین هر اندازه گیری به طور معمول ۱۸ دقیقه تنظیم شد. برای تجزیه و تحلیل داده های به دست آمده از نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ استفاده گردید. ابتدا داده ها به صورت خام و صرف نظر از نرمال بودن آنها برای توصیف غلظت متوسط جرمی ذرات معلق همراه با انحراف معیار در هریک از سالن های مورد بررسی نمایش داده شد. سپس با انجام آزمون نرمالیت، نرمال بودن داده ها بررسی و از آزمون های آماری تجزیه واریانس یک طرفه و مقایسه میانگین دانکن برای مقایسه مقادیر غلظت جرمی در بخش های مختلف استفاده گردید.

نتایج

نتایج پارامترهای آماری غلظت جرمی ذرات در جدول ۱ ارائه شده است. این نتایج نشان داد که بیشترین میانگین غلظت جرمی PM_{10} ، PM_7 ، $PM_{2.5}$ ، PM_1 و TSP در سالن های مواد سازی و اختلاط مواد و کمترین میانگین غلظت جرمی در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی است. همچنین بیشترین میانگین غلظت جرمی PM_4 در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی و کمترین میانگین غلظت جرمی در سالن مواد سازی و اختلاط مواد گزارش گردید. با صرف نظر از اندازه ذرات حداکثر میانگین غلظت جرمی ذرات معلق در سالن مواد سازی و اختلاط مواد اولیه

با اندازه $0/3 - 0/42$ در فضای باز بیشتر است و حرکت به سمت عمق بیشتر زمین تراکم این ذرات کاهش و ذرات با اندازه ۱ تا ۱۰ میکرومتر افزایش می یابد (Kim and et al, 2017). لوناتی (۲۰۱۱) و همکاران غلظت جرمی ذرات معلق (PM) در اندازه های مختلف $0/5 - 0/3$ میکرومتر و $10 - 2/5$ میکرومتر را اندازه گیری کردند. نتایج نشان داد غلظت جرمی ذرات معلق $0/5 - 0/3$ در هوای آزاد و کف جاده مشابه است در حالی که غلظت جرمی ذرات معلق $10 - 2/5$ میکرومتر در بزرگراه بیشتر از هوای آزاد است (Lonati and et al, 2011). راموس و همکاران (۲۰۱۵) غلظت جرمی ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ در سیستم های مختلف حمل و نقل عمومی را مقایسه کردند و استنشاق PM را برحسب دوز / کیلومتر با استفاده از نرخ میانگین استنشاق بزرگسالان، فاصله متحرک و زمان اقامت ارائه دادند (Ramos and et al, 2015) و همکاران (۲۰۱۶) Lei. and et al، غلظت جرمی $PM_{2.5}$ در هوای آزاد و بسته را در سیستم های مختلف حمل و نقل عمومی اندازه گیری کردند و دوز استنشاق PM در هر فرد و در هر موقعیت برای دوره زمانی یک روزه ارائه دادند (Lei and et al, 2016). گام اول و اساسی در کنترل آلودگی هوا، نظارت بر غلظت و تراکم تعداد ذرات معلق است. تغییرات تراکم تعداد ذرات معلق می تواند بینش ارزشمندی را در رابطه با تغییرات فرآیند انتشار، رفتار و سرنوشت ذرات گرد و غبار در هوا و تاثیر آن بر سلامت انسان فراهم می کند (Wang and et al, 2010). هدف از ارائه این مقاله بررسی دینامیک غلظت جرمی و تراکم تعداد ذرات معلق با قطر آئرو دینامیکی متفاوت و توزیع اندازه تعداد آنها در سالن های اصلی یک کارخانه تولید پانل و پروفیل UPVC است. نتایج این تحقیق می تواند این بینش ارزشمند را برای ما فراهم آورد.

روش بررسی

برای انجام پژوهش سالن مواد سازی و اختلاط مواد، سالن اکستروژن، چاپ و بسته بندی و سالن آسیاب و خردکن ضایعات در یکی از صنایع تولید پانل و پروفیل در و پنجره UPVC با شیفته کاری ۸:۰۰ صبح الی ۱۴:۰۰ بعد ظهر انتخاب شد. سپس فرآیند تولید به شرح زیر بررسی گردید: ابتدا مواد اولیه که شامل پلی و نیل کلراید و آهک (به عنوان پرکننده) و افزودنی های نظیر پایدار کننده حرارتی (نظیر نمک فلزات سنگین عمدتاً نمک سرب)، پایدار کننده نوری (نظیر اکسید تیتان)، اصلاح کننده ضربه بر پایه اکریلیکی می باشد، در سالن مواد سازی و اختلاط، مواد اولیه وارد دستگاه مخلوط کن شده و در دمای $110 - 140$ °C حرارت دیده و مخلوط می گردند، سپس در دمای 45 °C در مخلوط کن خنک کننده، خنک می گردند. ماده اولیه به دست آمده به سالن اکسترودر انتقال و از آن جا وارد دستگاه اکسترودر می شود. هر دستگاه

(۹۹۴۲۲/۴۶ میکروگرم بر متر مکعب) و حداقل میانگین غلظت (۳۸۱/۲ میکروگرم بر متر مکعب).
جرمی ذرات در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی تعیین شد

جدول ۱. مقادیر غلظت جرمی ذرات بر حسب میکروگرم بر متر مکعب

قطر ذرات	تعداد نمونه	حداقل غلظت جرمی	حداکثر غلظت جرمی	میانگین غلظت جرمی	انحراف معیار	سالن
۱	۳۷	۱/۹۰	۴۶/۲۰	۱۲/۹۷	۱۳/۲۴	اکسترودر
۲.۵	۳۷	۱۳/۱۰	۴۹۷	۱۱۶/۴۱	۱۴۴/۶۰	
۴	۳۷	۳۸/۹۰	۱۱۴۶/۲۰	۲۷۸/۹۸	۲۹۱/۷۴	
۷	۳۷	۷۶/۳۰	۲۷۳۶/۵۰	۵۶۴/۰۷	۵۶۲/۶۲	
۱۰	۳۷	۱۰۴	۴۴۲۱/۲۰	۷۸۴/۶۴	۸۱۵/۵۳	
TSP	۳۷	۱۴۷	۹۷۰۴/۷۰	۱۲۱۸/۶۲	۱۶۱۲/۹۷	
جمع	۳۷	۳۸۱/۲	۱۸۵۵۱/۸	۲۹۷۵/۶۹	۳۴۴۰/۷	
۱	۹	۶	۱۶/۴۰	۹/۴۳	۳/۱۳	موادسازی
۲.۵	۹	۱۴۸/۱۰	۲۷۱	۱۸۶/۷۷	۳۸/۸۰	
۴	۹	۶۴۲/۹۰	۱۱۶۱/۴۰	۷۹۸/۸۶	۱۵۳/۹۹	
۷	۹	۶۹۶۲/۸۰	۱۰۸۰۹	۸۸۲۴/۹۱	۱۱۴۲/۷۶	
۱۰	۹	۱۲۱۲۶/۵۰	۱۹۸۱۷۸	۴۰۷۹۳/۶۱	۵۹۱۷۵/۳۳	
TSP	۹	۲۲۷۷۵/۱۰	۶۴۵۰۶/۷۰	۴۸۸۰۸/۸۸	۱۳۶۱۰/۰۶	
جمع	۹	۴۲۶۶۱/۴	۲۷۴۹۴۲/۵	۹۹۴۲۲/۴۶	۷۴۱۲۴/۰۷	
۱	۱۵	۵/۵۰	۱۶/۹۰	۱۱/۵۰	۲/۷۵	آسیاب
۲.۵	۱۵	۷۵/۸۰	۲۶۰/۵۰	۱۷۵/۲۰	۴۳/۵۹	
۴	۱۵	۳۵۳/۸۰	۱۰۶۳/۴۰	۷۷۱/۳۹	۱۶۶/۴۵	
۷	۱۵	۱۰۳۳/۹۰	۴۱۴۶/۸۰	۲۸۳۵/۵۰	۷۸۴/۱۲	
۱۰	۱۵	۱۵۹۸/۹۰	۶۳۷۸/۱۰	۴۴۷۱/۶۸	۱۲۷۹/۷۲	
TSP	۱۵	۲۶۱۸/۷۰	۱۰۹۸۶/۲۰	۷۲۷۸/۳۸	۲۰۱۷/۷۲	
جمع	۱۵	۵۶۸۶/۶	۲۲۸۵۱/۹	۱۵۵۴۳/۶۵	۴۲۹۴/۳۵	
میانگین کل	۶۱	۱۶۲۴۳/۰۶	۱۰۵۴۴۸/۷۳	۳۹۳۱۳/۹۳	۲۷۲۸۶/۳۷	کل سالن ها

نتایج حاصل از آزمون تجزیه واریانس نتایج نشان داد که نوع سالن بر غلظت اندازه‌های مختلف PM به استثنا PM₁ تاثیر معنی‌داری دارد (جدول ۲)

جدول ۲. مقایسه غلظت جرمی ذرات در بخش‌های مختلف کارخانه

منابع تغییر	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₄	PM ₇	PM ₁₀	TSP
نوع سالن	۰/۲۸۶ ^{NS}	۲/۳۶۷ ^{**}	۴/۰۳۹ ^{**}	۱۰/۷۸۹ ^{**}	۱۴/۴۵ ^{**}	۱۵/۶۵۱ ^{**}
درجه آزادی	۶۱	۶۱	۶۱	۶۱	۶۱	۶۱
خطا	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳	۶۳
کل	۲	۲	۲	۲	۲	۲

** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

نگریدید. در بین سه سالن مورد بررسی از لحاظ غلظت جرمی PM₇ و TSP اختلاف معنی‌داری مشاهده شد. به طوری که بیشترین غلظت جرمی این ذرات در سالن آسیاب و خردکن و کمترین غلظت جرمی در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی مشاهده شد (جدول ۳).

نتایج آزمون دانکن نشان داد که بیشترین میانگین غلظت جرمی PM_{2.5} و PM₄ و PM₁₀ در سالن آسیاب و خردکن و کمترین غلظت جرمی پارامترهای مذکور در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی است. تفاوت معنی‌داری برای PM_{2.5} و PM₄ در سالن موادسازی، اختلاط مواد و سالن آسیاب و خردکن مشاهده

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین غلظت جرمی ذرات معلق در بخش‌های مورد بررسی کارخانه با استفاده از آزمون دانکن

سالن PM	سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی	سالن موادسازی و اختلاط مواد	سالن آسیاب و خردکن
PM ₁	۰/۹۰ ^a	۱/۱۳ ^a	۱/۰۴ ^a
PM _{2.5}	۱/۷۷ ^b	۲/۲۲ ^a	۲/۴۲ ^a
PM ₄	۲/۲۴ ^b	۲/۸۷ ^a	۳/۰۵ ^a
PM ₇	۲/۵۷ ^c	۳/۴۳ ^b	۴/۰۱ ^a
PM ₁₀	۲/۸۳ ^c	۳/۴۷ ^b	۳/۶۲ ^a
TSP	۲/۹۰ ^c	۳/۸۴ ^b	۴/۶۷ ^a

*حروف متفاوت نشان دهنده اختلاف معنی‌دار بین سالن هاست (میانگین‌هایی که حداقل ۱ حرف مشترک دارند، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری بر اساس آزمون دانکن هستند).

تراکم تعداد در سالن موادسازی و اختلاط مواد و کمترین تراکم تعداد در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی است (جدول ۴).

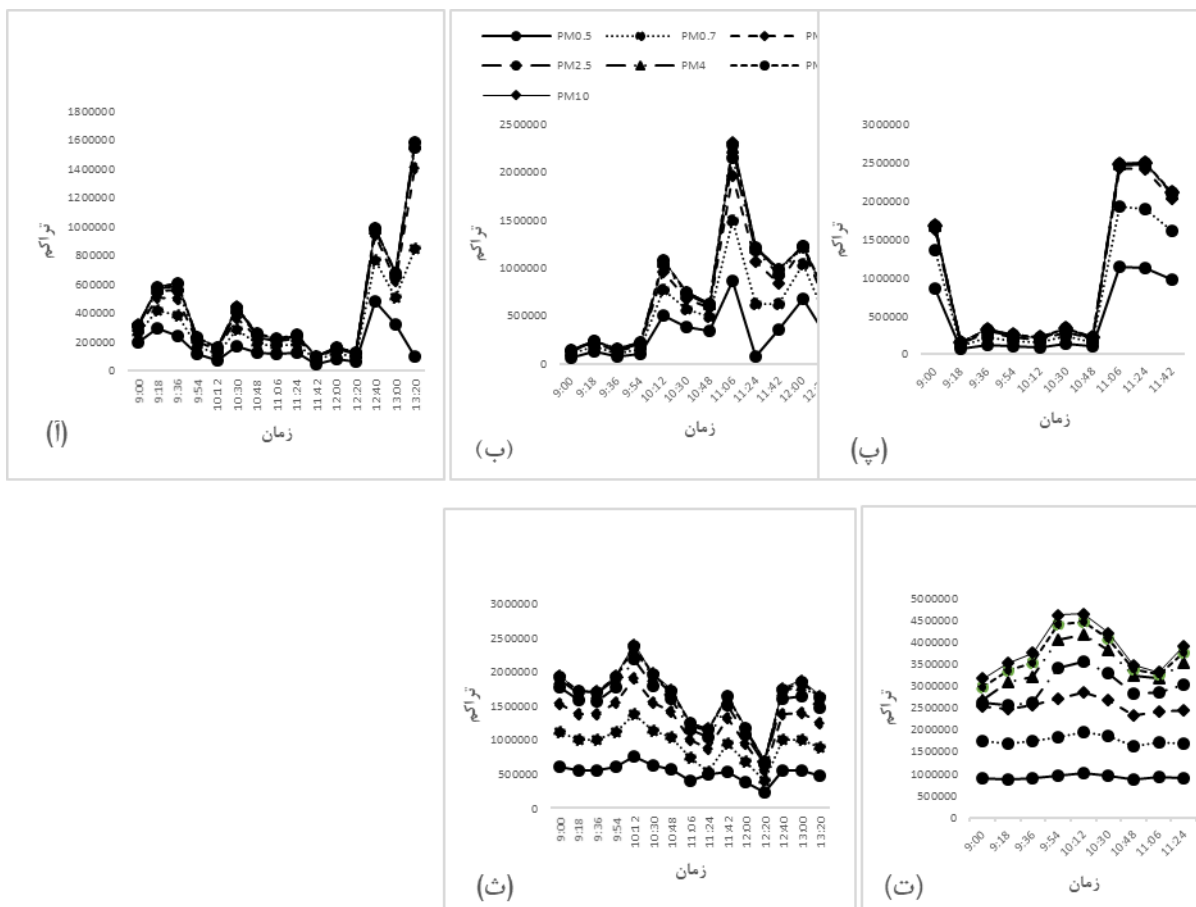
با مقایسه تراکم تعداد ذرات صرف نظر از نوع ذره در هر یک از سالن‌های مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت بیشترین میانگین

جدول ۴. مقادیر تراکم ذرات بر حسب ذره بر متر مکعب

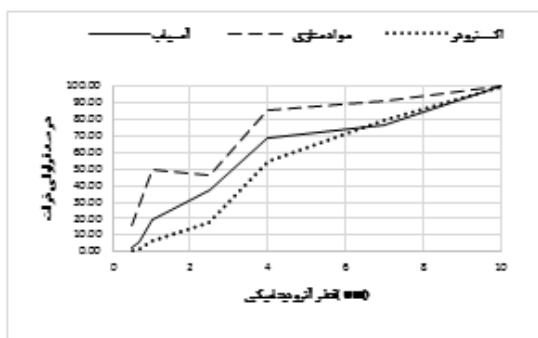
سالن	انحراف معیار	میانگین تراکم تعداد	حداکثر تراکم تعداد	حداقل تراکم تعداد	تعداد نمونه	قطر ذرات
اکسترودر	۵۱۵۶	۳۳۲۱	۱۸۸۳۹	۴۸۸	۳۷	۰/۵
	۹۲۰۸	۶۲۹۰	۳۳۶۷۵	۱۰۳۱	۳۷	۰/۷
	۲۷۴۶۹	۲۲۹۹۸	۱۰۰۵۷۴	۳۹۸۴	۳۷	۱
	۵۵۹۶۳	۵۸۳۸۷	۱۸۴۶۶۹	۱۱۱۸۶	۳۷	۲/۵
	۱۵۰۶۹۷	۱۶۲۸۹۸	۴۷۵۲۵۲	۲۶۵۲۷	۳۷	۴
	۱۹۶۷۸۳	۲۳۰۹۴۷	۶۲۷۷۴۵	۳۵۸۱۷	۳۷	۷
	۲۵۸۸۱۲	۳۲۲۱۷۶	۸۶۰۷۲۶	۶۰۹۸۱	۳۷	۱۰
	۷۰۴۰۸۸	۸۰۷۰۱۷	۲۳۰۱۴۸۰	۱۴۰۰۱۴	۳۷	جمع
موادسازی	۵۳۰۹۵	۱۴۹۹۲۴	۲۱۰۲۴۳	۵۲۱۸۱	۹	۰/۵
	۸۱۶۹۰	۲۵۶۹۲۷	۳۵۰۳۱۴	۹۷۶۵۴	۹	۰/۷
	۱۸۳۱۸۶	۴۵۶۰۴۴	۶۳۱۰۹۴	۵۵۱۱۰	۹	۱
	۲۶۹۸۷۱	۴۲۵۴۰۶	۷۱۷۲۹۳	۷۷۴۳۰	۹	۲/۵
	۶۶۰۲۶	۷۸۸۱۰۹	۸۹۳۸۴۷	۶۹۸۴۳۸	۹	۴
	۵۶۰۳۴	۸۴۵۴۱۱	۹۴۶۶۱۹	۷۶۹۷۰۵	۹	۷
	۴۶۴۷۰	۹۲۰۲۴۵	۱۰۰۴۲۶۴	۸۶۵۰۱۴	۹	۱۰
	۷۵۶۳۷۲	۳۸۴۲۰۶۶	۴۷۵۳۶۷۴	۲۶۱۵۵۳۲	۹	جمع
آسیاب	۴۸۹۴	۱۴۲۰۵	۲۵۱۰۹	۵۵۱۵	۱۵	۰/۵
	۹۴۴۸	۲۸۴۶۷	۴۹۵۱۳	۱۰۴۹۱	۱۵	۰/۷
	۳۱۴۲۲	۱۰۴۸۱۱	۱۵۲۸۱۹	۳۵۷۰۵	۱۵	۱
	۴۹۲۲۵	۱۹۸۷۰۵	۲۷۹۳۰۸	۷۹۵۱۰	۱۵	۲/۵
	۸۷۳۹۲	۳۶۳۸۹۲	۵۲۵۲۰۸	۱۵۰۴۵۳	۱۵	۴
	۱۴۴۱۰۱	۴۰۷۲۸۸	۶۲۴۲۱۹	۴۰۰۶۴	۱۵	۷
	۱۲۳۳۱۰	۵۲۸۷۷۰	۷۶۵۹۹۷	۲۳۰۵۵۸	۱۵	۱۰
	۴۴۹۷۹۲	۱۶۴۶۱۳۸	۲۴۲۲۱۷۳	۵۵۲۲۹۶	۱۵	جمع
کل سالن ها	۱۹۱۰۲۵۲	۶۲۹۵۲۲۱	۹۴۷۷۳۲۷	۳۱۸۱۸۲۹	۶۱	جمع میانگین ها

ث) و در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی بیشترین تراکم تعداد ذرات در اولین روز نمونه گیری در ساعت ۱۳:۲۰ و کمترین تراکم تعداد در ساعت ۱۱:۴۲ (۱- آ) و در دومین روز بیشترین تراکم تعداد ذرات در ساعت ۱۱:۰۶ و کمترین تراکم تعداد در ساعت ۹:۰۰ (۱- ب) و در سومین روز بیشترین تراکم تعداد در ساعت ۱۱:۲۴ و کمترین تراکم تعداد در ساعت ۹:۱۸ به دست آمد (۱- پ).

نتایج حاصل از تغییرات تراکم تعداد ذرات در بازه زمانی مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. در سالن آسیاب و خردکن بیشترین تراکم تعداد ذرات $PM_{0.5}$ ، $PM_{0.7}$ ، PM_{1} ، $PM_{2.5}$ ، PM_{4} ، PM_{7} ، PM_{10} در ساعت ۱۰:۱۲ و کمترین تراکم تعداد در ساعت ۱۲:۲۰ است (۱- ت). بیشترین تراکم تعداد ذرات در سالن موادسازی و اختلاط مواد در ساعت ۱۰:۱۲ و کمترین تراکم تعداد ذرات در ساعت ۹:۰۰ اتفاق می افتد (۱- پ).



شکل (۱) روند تغییرات تراکم تعداد ذرات در سالن اکسترودر در روزهای اول (آ)، دوم (ب) و سوم (ث)، آسیاب و خردکن (ت) و موادسازی (ث)



تکامل درصد فراوانی توزیع اندازه تعداد ذرات در سالن های اکسترودر، مواد سازی و آسیاب

نتیجه توزیع اندازه تعداد ذرات (PNSD) در شکل ۲ بر حسب درصد نشان داده شده است. درصد فراوانی ذرات معلق با قطر کوچکتر از $7 \mu m$ در سالن های آسیاب، موادسازی و اکسترودر به ترتیب برابر با $77/03$ ، $91/87$ ، $79/30$ و ذرات با قطر $10-7 \mu m$ به ترتیب برابر با $22/97$ ، $8/13$ و $20/7$ درصد است. ذرات با قطر $10-7 \mu m$ بیشترین درصد فراوانی را در سالن آسیاب و کمترین فراوانی را در سالن موادسازی دارد.

بحث و نتیجه گیری

مطالعات انجام شده در زمینه اپیدمیولوژی محیط زیستی نشانگر این است که نه تنها میزان غلظت جرمی، بلکه تراکم تعداد نیز نقش برجسته ای را در ارزیابی اثرات نامطلوب ذرات استنشاقی ایفا می کنند (Brand and et al, 2012). از این رو در مطالعه حاضر، علاوه بر غلظت جرمی، تراکم تعداد ذرات با قطر آئرودینامیکی متفاوت مورد سنجش قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین کل غلظت جرمی ذرات در سه بخش مورد بررسی برابر با $39313/93$ میکرو گرم بر متر مکعب (معادل $39/31$ میلی گرم بر متر مکعب) است. با انجام آزمون تجزیه واریانس اختلاف معنی داری در بین سه سالن مورد بررسی (به استثناء PM_{10}) مشاهده گردید. نتایج آزمون دانکن نشان داد که غلظت جرمی ذرات در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی نسبت به سایر سالن ها کمتر است. نتایج پژوهش محمدی کاجی و همکاران (۱۳۹۵) در بخش های مختلف یکی از صنایع الکتروود کشور نشان داد میانگین کل غلظت جرمی ذرات معلق در این صنعت برابر با $8/61$ میلی گرم بر متر مکعب و گستره مواجهه افراد در این صنعت برابر با $1/97-21/13$ میلی گرم بر متر مکعب است. بیشترین غلظت گرد و غبار اندازه گیری شده در بخش پودر سازی به دست آمد ($21/13$ میلی گرم بر متر مکعب)، تولید ذرات معلق ناشی از دستگاه مخلوط کن و ریختن مواد به درون بوکرهای خاص بود (محمدی کاجی و همکاران، ۱۳۹۵). بر اساس مطالعه کوهپایی (۱۳۸۷) در یک کارخانه کاشی، غلظت متوسط ذرات در دو سالن پرس به ترتیب برابر $52/262$ و $32/158$ به دست آمد (کوهپایی و همکاران، ۱۳۸۷). گل بابایی و همکاران (۱۳۹۱) گستره غلظت ذرات در بخش های مختلف صنعت سیمان در محدوده $18/89-1/77$ میلی گرم بر متر مکعب به دست آوردند (گل بابایی و همکاران، ۱۳۹۱). لوناتی و همکاران (۲۰۱۱) غلظت جرمی ذرات معلق (PM_{10}) در اندازه های مختلف $0/3-0/5$ میکرومتر و $2/5-10$ میکرومتر اندازه گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که غلظت جرمی ذرات معلق $0/3-0/5$ در هوای آزاد و کف جاده مشابه هستند در حالی که غلظت جرمی ذرات معلق $2/5-10$ میکرومتر در بزرگراه بیشتر از هوای آزاد بود (Lonati and et al, 2011). در پژوهش حاضر بیشترین میانگین غلظت جرمی در بخش مواد سازی و کمترین در بخش اکسترودر، چاپ و بسته بندی به ترتیب با مقادیر غلظت متوسط $274942/5$ میکروگرم بر متر مکعب و $2975/69$ میکروگرم بر متر مکعب به دست آمد

(معادل $2/97$ میلی گرم بر متر مکعب). علت بیشتر بودن غلظت جرمی ذرات در سالن مواد سازی می تواند به دلیل ریختن مواد اولیه با نسبت مشخص در دستگاه و مخلوط شدن در حرارت بالا، ریختن مواد مخلوط شده به درون محفظه های تغذیه دستگاه اکسترودر، الک کردن مواد اولیه توسط کارگران جهت ریختن مواد به درون بوکر، ریختن تصادفی مواد اولیه از بسته ها به کف سالن، افزایش تردد کارگران در این سالن، تخلیه نادرست گونی های مواد اولیه به درون دستگاه مخلوط کن نسبت داد. در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی ریختن مواد در قیف تغذیه کننده، سرقالب خمیر پروفیل یا پانل و برچسب زدن آن ها دلیلی بر تولید PM_{10} از نوع گرد و غبار، آئروسول و فیوم در سالن اکسترودر، چاپ و بسته بندی است. جنس ذرات انتشار یافته می تواند از نوع پلی اتیلن کلردار (CPE)، کوپلیمر آکریلات پلی-متیل آکریلات ترپلیمر متاکریلات- بوتان ان- استیرن (MBC)، آکریل- بوتان دی ان- استیرن (ABS) و کوپلیمر اتیلن وینیل استات (EVA) به عنوان اصلاح کنندگان ضربه و دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) برای ایجاد رنگ سفید در پروفیل وانعکاس نورخورشید، رنگدانه ها برای ایجاد رنگ های خاص در پروفیل، پایدار کننده های سربی به عنوان پایدار کننده های حرارتی، پارافین ها و واکس های پلی اتیلنی برای کاهش دهنده اصطکاک بین سطح فلزی اکسترودر، قالب، کالیبراتور و پلیمر باشد. بنابراین نوع فرآیند بیانگر میزان انتشار ذرات به محیط است. لی و همکاران (۲۰۰۷) غلظت جرمی فیوم های جوشکاری را در شرایط مختلف اندازه گیری بین $6/48$ تا $24/4$ میلی گرم بر متر مکعب اندازه گیری کردند و اندازه گیری های انجام شده در مطالعه آنها در یک اتاقک جوش کاری با فضای محدود صورت پذیرفت. تجمع ذرات در این اتاقک دلیلی بر بالا بودن غلظت جرمی ذرات بود. همچنین لی و همکاران مقدار تراکم تعداد کلی 2×10^6 ذره بر لیتر به دست آوردند (Lee and et al, 2007). زیمر و بیسواز (۲۰۰۱) تراکم تعداد فیوم جوشکاری GMAW در ارتفاع $4/8$ سانتی متری $10^7 \times 42/1$ و در ارتفاع $2/19$ سانتی متری از محل جوش کاری $10^6 \times 67/3$ ذره بر سانتی متر مکعب نشان دادند (Zimmer and Biswas 2001). استفن سون و همکاران (۲۰۱۶) تراکم تعداد ذرات را در جوش کاری قوس الکتریکی بر روی استیل کربن $10^5 \times 2$ ذره بر سانتی متر مکعب گزارش کردند (ساجدی فر، ۱۳۹۵). نتایج تراکم تعداد ذرات نشان داد که گستره تراکم متوسط ذرات در سه سالن مورد بررسی $14562/28-66260/3$

زمانی که محصول پانل باشد کمتر است. همچنین انتشار ذرات به قطر و طول سیلندر ماردون بستگی دارد، به طوری که هر چقدر قطر و طول سیلندر ماردون بیشتر باشد محصول بیشتری تولید می‌شود و در نتیجه PM بیشتری به محیط انتشار می‌یابد. عدم وجود پایدارکننده‌های حرارتی در اکسترودر دلیل دیگر بر انتشار ذرات است. در صورت عدم استفاده از پایدارکننده‌های حرارتی مناسب، PVC از حالت جامد به حالت نرم تغییر یافته و در نتیجه قالب‌های کج و تغییر شکل یافته و فریم‌ها با کارکرد نامطلوب ایجاد خواهد شد. در این حالت اپراتور سرقالب اکسترودر را از بقیه قسمت‌ها جدا کرده و باعث انتشار ذرات PM به صورت آئروسول به محیط می‌گردد. PVC در تماس با دمای بالا و حرارت زیاد اکسترودر دوماریچه سوزانده می‌شود و حالتی ذغالی به خود می‌گیرد و در عین سوزانده شدن ذرات به محیط انتشار می‌دهد. منشأ دیگر تولید ذرات از اکسترودر بخش زدن زوار بر روی پروفیل است. ماده اولیه بخش زوار سیل و نوع خاصی گرانول است که هنگام ورود به دستگاه زوار زن در تماس با حرارت بالا قرار می‌گیرد و باعث انتشار ذرات به محیط می‌شود. زمانی که مرحله ساخت پروفیل (یا پانل) تکمیل گردید محصول به دست آمده وارد بخش برچسب زنی و چاپ می‌شود. در این هنگام انواعی از آئروسول آلی به محیط انتشار می‌یابد. در سالن آسیاب و خردکن انتشار ذرات ناشی از خرد شدن ضایعات نامرغوب در دستگاه‌های آسیاب، سرنده و ریختن مواد به درون کیسه‌ها و در سالن موادسازی انتشار ناشی از مخلوط کن‌ها و ریختن مواد در محفظه‌های پلاستیکی است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مقادیر غلظت جرمی و تراکم عددی ذرات بسیار زیاد است بنابراین اجرای کنترل‌های مهندسی و برنامه‌های حفاظت تنفسی مناسب، ضروری می‌باشد. با توجه به شناسایی منابع انتشاری که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت انتظار می‌رود بتوان اقدامات بهتری را برای کنترل منبع انتشار ذرات انجام داد.

ذره بر مترمکعب است. بیشترین تراکم ذرات در سالن آسیاب و خردکن است. PM₁₀ در سالن آسیاب و خردکن با مقدار میانگین ۵۲۸۷۶۹/۹۳ ذره بر متر مکعب بیشترین تراکم عددی را نسبت به سایر ذرات دارا بود که مقدار آن بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده توسط استفن سون و همکاران است. کمترین تراکم ذرات در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی در روز اول مشاهده شد. هر چند اطلاعاتی در مورد غلظت جرمی ذرات در صنعت UPVC در دسترس نیست اما مقایسه آن با سایر صنایع مشابه مثل کاشی نشان داد که غلظت جرمی ذرات صنعت UPVC با صنعت کاشی مشابه است و نسبت به صنعت سیمان بالاتر می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که صنعت UPVC با ریسک متوسط در حد صنعت کاشی است. اندازه، از ویژگی‌های مهم ذرات بوده که با افزایش نسبت سطح به حجم ذره، احتمال دسترسی زیستی افزایش می‌یابد (ابوالحسن نژاد، ۱۳۹۴). Fauser و همکاران (۱۹۹۹) در طی مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که ذرات با قطر کمتر از ۱ میکرون حدود ۹۰ درصد از کل ذرات هوابرد انتشار یافته از سایش تایر را به خود اختصاص می‌دهند (Fauser and et al, 1999). محمدی کاجی (۱۳۹۳) طی مطالعات خود در صنعت الکتروود بیشترین غلظت گرد و غبار قابل استنشاق در ذراتی با قطر آئرودینامیکی بالاتر از ۱۰ میکرومتر تعیین کرد (محمدی کاجی، ۱۳۹۳). نتیجه توزیع اندازه تعداد ذرات (PNSD) نشان داد بیشترین فراوانی ذرات با قطر کوچکتر از ۷ um و ۱۰-۷ um به ترتیب در سالن موادسازی و آسیاب و کمترین آن به ترتیب در سالن آسیاب و موادسازی است. فراوانی ذرات در سالن مواد سازی نسبت به دو سالن دیگر بیشتر است. در سالن اکسترودر، چاپ و بسته‌بندی انتشار ذرات ناشی از سرقالب اکسترودر است. میزان انتشار ذرات از سرقالب اکسترودر بستگی به نوع محصول دارد. زمانی که محصول به صورت پروفیل باشد به دلیل کم بودن سطح محصول انتشار ذرات از سرقالب نسبت به

منابع

- منصوری، ن و همکاران. ۱۳۹۰. تعیین میزان انتشار ذرات معلق از صنایع فرآورده های نسوز و ارزیابی فیلترهای کیسه ای در کنترل آن، فصلنامه سلامت کار ایران، دوره ۸، شماره ۲.
- گل بابایی ف، و همکاران. ۱۳۹۱. ارزیابی مواجهه شغلی کارکنان یک کارخانه تولید سیمان با گرد و غبار قابل استنشاق سیمان و سیلیس کریستالی. بهداشت و ایمنی کار.
- محمدی کاجی، س و همکاران. ۱۳۹۵. کاربرد GIS و نقشه های هم تراز آلودگی ناشی از گرد و غبار در محیط کار با هدف ارزیابی مواجهات استنشاقی. فصلنامه علمی تخصصی طب کار.
- ساجدی فر، ج و همکاران. ۱۳۹۵. ارزیابی مقایسه ای مواجهه جوش کاران با فیوم های جوش کاری براساس تراکم جرمی و عددی. بهداشت و ایمنی کار.
- کوهپایی، ع و همکاران. ۱۳۸۷. "ارزشیابی اثرات بهداشتی ذرات معلق در هوا بر روی کارگران در یک کارخانه کاشی و سرامیک"، مجله دانشگاه علوم پزشکی قم، جلد ۲، شماره ۲.
- محمدی کاجی، س. ۱۳۹۳. ارزیابی آلودگی هوا و ارزیابی ریسک بهداشتی فرآیند تولید الکتروود جوشکاری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم پزشکی شهید صدوقی یزد.
- ابوالحسن نژاد و، عساری، م. ۱۳۹۴. مروری بر روش ها و وسایل ارزیابی مواجهه شغلی با نانو ذرات. مجله مهندسی بهداشت حرفه ای.
- Jaffe, D. H., Singer, M. et al . 2003. Air pollution and emergency department visits for asthma among Ohio Medicaid recipients, 1991–1996. *Environmental Research*, P. 21-28.
- Wichmann, H. E., Spix, C., et al . 2000. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany.
- Gomišček, B., Hauck, H., et al . 2004 . Spatial and temporal variations of PM 1, PM 2.5, PM 10 and particle number concentration during the AUPHEP—project. *Atmospheric Environment*, P. 3917-3934.
- Ruuskanen, J., Tuch, T., et al . 2001. Concentrations of ultrafine, fine and PM 2.5 particles in three European cities. *Atmospheric Environment*, P. 3729-3738.
- Tittarelli, A., Borgini, A., et al . 2008 . Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter. *Atmospheric Environment*, P. 8543-8548.
- Teter, J., Guajardo, I., et al . 2017 . Assessment of operating room airflow using air particle counts and direct observation of door openings. *American journal of infection control*, P. 477-482.
- Bhangar, S., Brooks, B., et al . 2016 . Pilot study of sources and concentrations of size-resolved airborne particles in a neonatal intensive care unit. *Building and Environment*, Vol. 106, P.10-19.
- Zhang, D., Jin, X., et al . 2017 . Experimental study of inhalable particle concentration distribution in typical university canteens. *Journal of Building Engineering*, Vol. 14, P. 81-88.

- Kim, M., Park, S., et al . 2017 . Estimation of inhaled airborne particle number concentration by subway users in Seoul, Korea. *Environmental Pollution*, Vol. 231, P. 663-670.
- Ozgen, S., Ripamonti, G., et al . 2016 . Particle number and mass exposure concentrations by commuter transport modes in Milan, Italy. *AIMS Environmental Science*, P. 168-184.
- Lonati, G., Ozgen, S., et al . 2011 . Pedestrian exposure to size-resolved particles in Milan. *Journal of the Air & Waste Management Association*, P.1273-1280.
- Ramos, M. J., Vasconcelos, A., et al. 2015. Comparison of particulate matter inhalation for users of different transport modes in Lisbon. *Transportation Research Procedia*, Vol. 10, P. 433-442.
- Lei, X., Xiu, G., et al . 2016 . Individual exposure of graduate students to PM_{2.5} and black carbon in Shanghai, China. *Environmental Science and Pollution Research*, P. 12120-12127.
- Soysal, U., Gehin, E., et al . 2017 . Aerosol mass concentration measurements: Recent advancements of real-time nano/micro systems. *Journal of Aerosol Science*.
- Wong, C. M., Tsang, H., et al . 2016 . Cancer mortality risks from long-term exposure to ambient fine particle. *Cancer Epidemiology and Prevention Biomarkers*, P. 839-845.
- Vianna, N. J., Brady, J., et al. 1981. Angiosarcoma of the liver: a signal lesion of vinyl chloride exposure. *Environmental health perspectives*, Vol. 41, P. 207.
- Zarei, S., Jamshidi, E., et al . 2010 . PVC dust removal from the air by a new dynamical scrubber. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, P. 1193-1198.
- Brand, P., Lenz, K., et al . 2012 . Number size distribution of fine and ultrafine fume particles from various welding processes. *Annals of occupational hygiene*, P. 305-313.
- Wang, Y., Hopke, P. K., et al . 2010 . Long-term characterization of indoor and outdoor ultrafine particles at a commercial building. *Environmental science & technology*, P. 5775-5780.
- Huang, C. H., & Lin, P. Y. 2014 . Influence of spatial layout on airflow field and particle distribution on the workspace of a factory. *Building and Environment*, Vol. 71, P. 212-222.
- Zimmer AT, Biswas P. 2001 .Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes *Journal of Aerosol Science.*; P.993-1008.
- Lee, M. H., McClellan, W. J., et al . 2007 . Reduction of nanoparticle exposure to welding aerosols by modification of the ventilation system in a workplace. *Journal of Nanoparticle Research*, P. 127-136.
- Fauser, P., Tjell, J.C., et al . 1999. Quantification of tire-tread particles using extractable organic zinc as tracer. *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 72, P. 969-977.