



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

مقاله پژوهشی



نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی در تهران

زهرا خدارحمی، محسن حیدری*، غلامرضا موسوی، سکینه شکوئیان

گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

اطلاعات مقاله:	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵	زمینه و هدف: تاکنون تعداد ذرات گرد و غباری که ممکن است روزانه در ساختمان‌های مسکونی ترسیب یابد مورد توجه قرار نگرفته است، درحالی‌که این نوع آلودگی ممکن است بر سلامت انسان اثر سوء داشته باشد و همچنین در توصیف کیفیت هوای داخل کاربرد داشته باشد. اهداف این مطالعه برآورد نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی در تهران و تحلیل تغییرات در نرخ ترسیب در شرایط مختلف بودند.
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵	روش بررسی: در این مطالعه مقطعی ۴۲ نمونه ترسیمی گرد و غبار از ساختمان‌های مسکونی تهران در دو دوره در فصول بهار (گرم) و پاییز (سرد) جمع‌آوری شدند. برای نمونه برداری، ظروف پتری دیش در داخل ساختمان‌های مسکونی (پذیرایی، اتاق خواب یا آشپزخانه) به مدت ۴۵ روز قرار داده شد. ذرات ترسیب شده بر روی سطوح پتری دیش‌ها مستقیماً و بدون هیچگونه تداخل با استفاده از یک استریومیکروسکوپ شمارش شدند. داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم افزارهای Origin، Excel و SPSS آنالیز شدند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱	یافته‌ها: میانگین نرخ ترسیب ذرات در کل دوره نمونه برداری برابر $9/23 \times 10^6 \pm 1/34 \times 10^6$ PN/m ² /day بود. میانگین نرخ ترسیب در فصل گرم $(1/1 \times 10^7$ PN/m ² /day) بطور قابل توجهی بیشتر از فصل سرد $(7/46 \times 10^6$ PN/m ² /day) بود ($p < 0/001$).
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳	نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که روزانه تعداد قابل توجهی از ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی ترسیب می‌یابد. نرخ عددی بالای ترسیب همراه با تغییرات آن در شرایط مختلف بیانگر ضرورت توجه بیشتر به این شاخص آلودگی ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی است.

واژگان کلیدی: ذرات گرد و غبار، ساختمان‌های مسکونی، نرخ عددی ترسیب، فصول سرد و گرم

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
Moheidari@modares.ac.ir

Please cite this article as: Khodarahmi Z, Heidari M, Moussavi Gh, Shekoochian S. Number deposition rate of dust particles in residential buildings in Tehran. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(3):535-52.

مقدمه

امروزه بسیاری از جوامع با آلودگی هوا به ذرات مواجه هستند و این نوع آلودگی مهمترین عامل خطر محیطی محسوب می‌شود (۱). با توجه به این شرایط ضرورت دارد به جنبه‌های مختلف این نوع آلودگی توجه شود. اگر ذرات هوابرد (Airborne particles) را بصورت ذراتی با اندازه $500 - 0.01 \mu m$ تعریف کنیم، بخشی از این ذرات با اندازه بزرگتر از $1 \mu m$ به عنوان ذرات گرد و غبار (Dust) شناخته می‌شوند (۲). مواجهه با ذرات گرد و غبار ممکن است در هر دو محیط داخل و بیرون رخ دهد، اما مواجهه در محیط داخل ممکن است اهمیت بیشتری داشته باشد، چون عموم مردم حدود ۷۰ تا ۹۰ درصد از اوقات خود را در فضاهای داخلی ساختمان‌ها سپری می‌کنند (۳، ۴). بخشی از ذرات گرد و غبار در هوای داخل در زمان حضور در هوا استنشاق می‌شوند و در نهایت بر روی سلامت انسان تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، هر ذره‌ای با توجه به ویژگی‌های خود و محیط اطراف بعد از مدت زمان معینی از حالت معلق بودن در هوای داخل خارج می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که بخش عمده‌ای از ذرات هوابرد بعد از مدت معینی معلق بودن در هوای داخل بر روی سطوح داخل ترسیب می‌یابند و بخشی دیگر از طریق سیستم تهویه از محیط داخل خارج می‌شوند (۵، ۶). لذا ممکن است روزانه تعداد قابل توجهی از ذرات گرد و غبار بر روی سطوح مختلف در محیط داخل ترسیب یابند.

ترسیب ذرات در محیط داخل از چند نقطه نظر اهمیت دارد. ذرات موجود در محیط داخل مخلوطی از انواع مواد معدنی، آلی و نمک‌ها هستند و ممکن است حتی به عوامل میکروبی نیز آلوده باشند. علاوه بر این، بخشی از ذرات گرد و غبار محیط داخل دارای ماهیت سنتتیک (مانند میکروپلاستیک‌ها) هستند (۷-۱۱). لذا بخشی از ذرات ممکن است بطور بالقوه سمی و خطرناک باشند و ترسیب آنها بر روی ماتریکس‌هایی مانند آب آشامیدنی، مواد غذایی و سطوح در دسترس بویژه برای کودکان ممکن است اثرات سوء بهداشتی در پی داشته باشد (۱۲-۱۴).

بنابراین، علاوه بر خطر مواجهه با ذرات گرد و غبار در زمان معلق بودن در هوای داخل، آنها بعد از ترسیب نیز ممکن است خطراتی در پی داشته باشند (۱۴، ۱۵). علاوه بر نگرانی‌ها در مورد اثرات ذرات ترسیب یافته بر سلامت انسان، ترسیب آنها در محیط داخل از نقطه نظر تشدید خوردگی فلزات بویژه در وسایل الکترونیکی نیز اهمیت دارد (۱۶، ۱۷).

مطالعات نشان داده‌اند که نرخ جرمی ترسیب ذرات در محیط داخل کمتر از محیط بیرون است (۱۸-۲۱). با توجه به نرخ جرمی بالای ترسیب ذرات در محیط بیرون و اثرات ذرات ترسیب یافته بر محیط‌هایی مانند دریاچه‌ها و زمین‌های کشاورزی، تاکنون مطالعات در این زمینه عمدتاً متمرکز بر محیط بیرون بوده‌اند (۲۲-۲۵). شاید یکی از علل نرخ بالای ترسیب جرمی ذرات در محیط بیرون در مقایسه با محیط داخل وجود ذرات درشت در هوای آزاد در اثر فرسایش بادی باشد (۲۶). اما باید در نظر داشت که ذرات درشت موجود در هوای آزاد غلظت جرمی و عددی ذرات را به یک نسبت افزایش نمی‌دهند. در هوای آزاد بطور تقریبی ۸۰ درصد جرم کل ذرات مربوط به ذرات با اندازه بزرگتر از $5 \mu m$ است، درحالی‌که سهم این ذرات در تعداد کل ذرات هوابرد کمتر از ۰/۲ درصد است. لذا ممکن است ذراتی که بخش عمده جرم ذرات ترسیب شونده در محیط بیرون را تشکیل می‌دهند سهم کمی در تعداد کل ذرات ترسیب شده داشته باشند (۲). علی‌رغم غلظت جرمی بالای ذرات هوابرد در محیط بیرون، مطالعات نشان داده‌اند که غلظت عددی ذرات در هوای داخل کمتر از هوای آزاد نیست. Hussein (۲۰۱۷) گزارش کرده است که متوسط غلظت عددی ذرات با اندازه $10 - 1 \mu m$ در هوای داخل منازل مسکونی ($2/45 \times 10^6 \text{ PN/m}^3$) بیش از محیط بیرون است (۲۷). بنابراین، با توجه به کم بودن نرخ جرمی ترسیب ذرات در محیط داخل ممکن است نرخ عددی ترسیب ذرات در این محیط به دلیل غلظت جرمی بالای ذرات هوابرد قابل توجه و بااهمیت باشد.

نرخ عددی ترسیب ذرات در محیط داخل نیز از چند جنبه

به ذرات سنتتیک (تصویری از سطح آلودگی به ذرات سنتتیک نیز بدست آورد. در واقع، در اینجا نرخ عددی ترسیب کل ذرات می‌تواند به عنوان یک نشانگر (proxy) از نرخ عددی ترسیب انواع ذرات بویژه ذرات سنتتیک عمل کند. بنابراین، نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در محیط داخل ممکن است شاخص مهمی از آلودگی محیط داخل به ذرات گرد و غبار باشد اما به ندرت مورد توجه قرار گرفته است.

انتشار و ترسیب ذرات در محیط داخل ممکن است تحت تاثیر عوامل متعددی از جمله دمای محیط، رطوبت، نرخ تهویه و سرعت جریان هوا قرار گیرد (۳۳). بسیاری از این عوامل و دیگر عوامل مانند سبک زندگی ساکنین ممکن است با تغییر فصل به خصوص بین دو فصل گرم و سرد تغییر یابند. یکی از تفاوت‌های مهم بین فصول گرم و سرد استفاده از سیستم‌های سرمایشی در فصول گرم می‌باشد. این سیستم‌ها سرعت جریان هوا در محیط داخل را افزایش می‌دهند و لذا در اثر افزایش جریان همرفتی ممکن است غلظت ذرات گرد و غبار در هوای داخل و بویژه نرخ ترسیب آنها افزایش یابد (۱۸، ۳۴). بخوبی ثابت شده است که افزایش سرعت جریان هوا در محیط داخل باعث افزایش نرخ معلق شدن مجدد ذرات و ترسیب مجدد آنها می‌شود (۳۵). بطور کلی، با بررسی چگونگی تاثیر تغییرات فصلی بر سطح ذرات معلق در محیط داخل می‌توان اثر ترکیبی عوامل مختلف منتسب به تغییر فصل را تحت شرایط واقعی زندگی ساکنین ارزیابی کرد.

با توجه به اهمیت و کاربردهای بالقوه نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در محیط داخل، لازم است بررسی شود که آیا تعداد قابل توجهی از ذرات در محیط داخل ترسیب می‌یابد یا نرخ عددی نیز مانند نرخ جرمی آنها کم و ناچیز است. علاوه بر این، لازم است تغییرپذیری این نرخ در شرایط مختلف بررسی شود. تاکنون ترسیب ذرات گرد و غبار در محیط داخل کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Cui و همکاران (۲۰۲۲) و Abad-López و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه بر روی نرخ عددی ترسیب میکروپلاستیک‌ها، نرخ ترسیب ذرات گرد و غبار

می‌تواند مهم باشد. نرخ عددی ترسیب ممکن است با متوسط‌های ماهانه و فصلی غلظت عددی ذرات گرد و غبار در هوای داخل متناسب باشد. در صورت وجود این همبستگی، روش فروریزش (Fallout) مورد استفاده برای برآورد تعداد ذرات ترسیب یافته در محیط داخل نقشی مانند برگ درختان در پایش غیرفعال آلاینده‌های هوای آزاد یا دیگر روش‌های غیرفعال برای نمونه برداری آب و هوا خواهد داشت (۲۸). در این رویکرد ممکن است هدف مطالعه بررسی اثر آلاینده بر محیط پذیرنده (برگ درخت و جاذب) نباشد، بلکه هدف این است که بر اساس میزان آلاینده تجمع یافته در محیط پذیرنده، بتوان بصورت کمی، نیمه کمی یا کیفی سطح آلودگی را در محیط اطراف برآورد کرد (۲۸-۳۱). در صورتیکه در مطالعات آینده همبستگی قابل توجهی بین نرخ عددی ترسیب ذرات و غلظت آنها در هوای داخل تایید شود، می‌توان با استفاده از روش فروریزش (به عنوان یک روش نمونه برداری غیرفعال) برآوردی نیمه-کمی یا کیفی در مورد سطح آلودگی هوای داخل به ذرات گرد و غبار در بازه‌های زمانی طولانی تر (ماهانه یا فصلی) داشت. همچنین اثر عوامل موثر بر سطح این نوع آلودگی (از جمله کارایی سیستم‌های تصفیه هوا) و تغییرات آن در مکان‌ها و زمان‌های مختلف را ردیابی کرد. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که بخشی از ذرات ترسیمی در محیط داخل ماهیت سنتتیک (مانند میکروپلاستیک‌ها) دارند (۳). این نوع ذرات در کوتاه مدت غیرقابل تجزیه و غیر قابل انحلال هستند و تقریباً به همان صورتیکه ترسیب می‌یابند وارد بدن ساکنین و سیستم گوارش می‌شوند و حتی برخی از میکروپلاستیک‌های ترسیب یافته ممکن است مجدد معلق شده و وارد سیستم تنفسی شوند. لذا در مطالعات اخیر توجه ویژه‌ای به نرخ عددی ترسیب آنها در محیط داخل شده است (۷، ۳۲). با توجه به اهمیت نرخ عددی ترسیب میکروپلاستیک‌ها، در صورتیکه در مطالعات آینده نسبت تقریبی "تعداد ذرات سنتتیک به کل ذرات ترسیمی" در محیط داخل مشخص شود می‌توان با ردیابی ترسیب کل ذرات (با روشی سریعتر و ساده تر نسبت

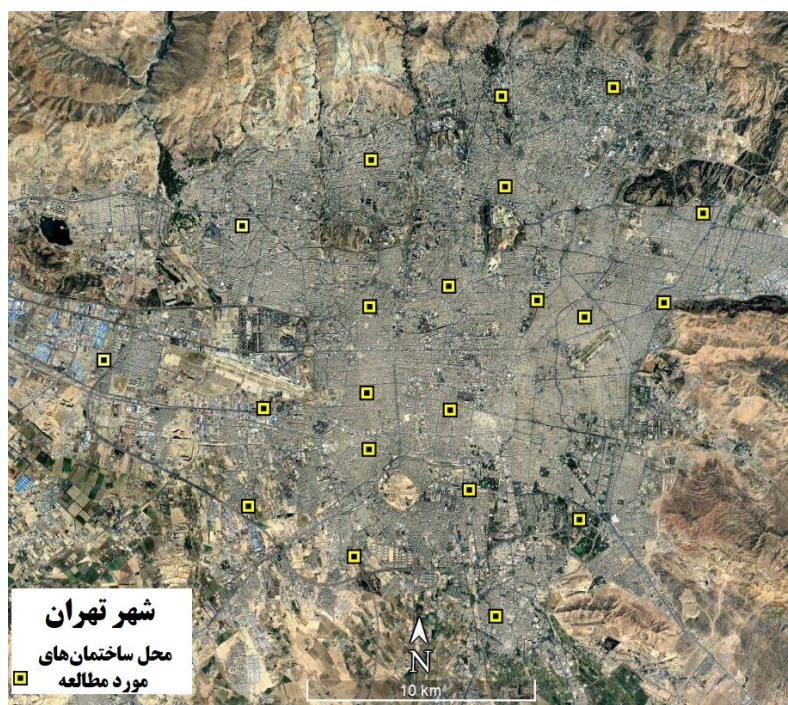
را نیز گزارش کرده اند. با این حال، در این مطالعات نمونه‌های ذرات بعد از انجام عملیات هضم نمونه و فیلتراسیون شمارش شدند (۷، ۳۶). این شرایط باعث از دست رفتن بخش زیادی از ذرات می‌شود و لذا داده‌های بدست آمده ممکن است بسیار کمتر از مقادیر واقعی باشد. با بررسی متون علمی معتبر مشخص شد که مطالعه‌ای برای برآورد نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار بر اساس شمارش مستقیم ذرات در ساختمان‌های مسکونی و با حداقل تداخل در نمونه ذرات ترسیب یافته انجام نگرفته است. لذا، این مطالعه با دو هدف اصلی تعیین نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی شهر تهران و تعیین میزان تغییرپذیری نرخ ترسیب در شرایط مختلف انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه متمرکز بر ساختمان‌های مسکونی شهر تهران بود. تهران به عنوان پایتخت ایران جمعیتی بالغ بر ۹ میلیون نفر (با تراکم ۲۰۵ نفر در هر هکتار) دارد. نمونه برداری در دو دوره

۴۵ روزه انجام گرفت؛ دوره نمونه برداری گرم (روشن بودن سیستم‌های سرمایشی) و دوره نمونه برداری سرد (خاموش بودن سیستم‌های سرمایشی). در دوره نمونه برداری اول (اواخر بهار ۱۴۰۲) متوسط دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی به ترتیب برابر $24/2^{\circ}\text{C}$ ، $4/98\text{ m/s}$ و $27/3\%$ درصد بود. این مقادیر در دوره نمونه‌برداری دوم (پاییز ۱۴۰۲) به ترتیب برابر $20/2^{\circ}\text{C}$ ، $3/75\text{ m/s}$ و $36/0\%$ درصد بود (mesonet.agron.iastate.edu). با توجه به اینکه در این مطالعه لازم بود ظروف پتری دیش در دوره‌های بلند مدت در ساختمان‌های مسکونی قرار گیرند، لذا تعداد ساختمان‌های تحت مطالعه، تحت تاثیر تعداد خانواده‌هایی بود که موافق همکاری در این مطالعه بودند. بعد از مراجعه به ساختمان‌های متعدد، در ابتدای مطالعه ساکنین ۳۰ ساختمان موافق انجام نمونه برداری بودند. در نهایت، امکان جمع آوری نمونه‌های مورد تایید از ۲۱ ساختمان مسکونی در هر دو فصل فراهم شد. موقعیت جغرافیایی این ساختمان‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- محل ساختمان‌های مورد مطالعه در شهر تهران

۴۲ نمونه اصلی (۲۱ نمونه در فصل گرم و ۲۱ نمونه در فصل سرد) جمع آوری شد.

برای شمارش تعداد ذرات ترسیب یافته بر روی سطح پتری دیش‌ها از استریومیکروسکوپ با بزرگنمایی ۹۰ برابر (Olympus SZX12) استفاده شد. با توجه به میدان دید حدود 1 mm^2 این استریومیکروسکوپ و تراکم بسیار بالای ذرات بر روی سطح پتری دیش، از ۲۰ نقطه بر روی سطح هر پتری دیش تصویربرداری شد. تصاویر سپس با استفاده از نرم‌افزار ImageJ آنالیز و تعداد ذرات بر روی هر تصویر شمارش شد. نرخ ترسیب ذرات با استفاده از فرمول ۱ محاسبه شد:

$$D = \frac{PN}{A_p \times T} \quad (1)$$

در اینجا D نرخ عددی ترسیب ($\text{PN}/\text{m}^2/\text{day}$)، PN تعداد ذرات گرد و غبار ترسیب یافته بر روی سطح پتری دیش (PN)، A_p مساحت سطح پتری دیش (m^2) و T مدت زمان نمونه برداری (day) هستند.

علاوه بر نمونه برداری، اطلاعاتی مانند وجود یا عدم وجود فرش در ساختمان‌ها، تواتر استفاده از جاروبرقی، استفاده یا عدم استفاده از سیستم سرمایشی در طی دوره نمونه برداری و نوع پنجره (دوجداره و تک جداره بودن) جمع آوری شد. از خانواده خواسته شد که در طی دوره نمونه برداری هیچ تغییری در روال زندگی خود ایجاد نکنند.

– جمع آوری و سنجش ذرات گرد و غبار

از روش ترسیب برای جمع آوری ذرات گرد و غبار ترسیب یافته در طی دو دوره ۴۵ روزه در فصول گرم و سرد استفاده شد. با توجه به اینکه جریان همرفتی در داخل ساختمان‌های مسکونی نسبت به بیرون بسیار محدودتر است، لذا مطابق مطالعات متعدد بر روی ترسیب میکروپلاستیک‌ها و ذرات (۷، ۳۶)، از پتری دیش شیشه‌ای با قطر ۱۰ cm برای نمونه برداری استفاده شد. پتری دیش‌ها قبل از قرار دادن در محل نمونه برداری، در آزمایشگاه چندین بار با آب مقطر شسته و خشک شدند و سپس بلافاصله بعد از خشک شدن در ظروفی از جنس فویل ضخیم آلومینیومی با ارتفاعی حدود ۵ cm (بیش از ارتفاع دیواره پتری دیش) قرار داده شدند. در نهایت روی هر ظرف با استفاده از فویل پوشیده شد و ظرف حاوی پتری دیش به محل نمونه برداری منتقل شد. در داخل ساختمان‌ها، صرفاً فویل روی ظروف برداشته شد و پتری دیش همراه با ظرف در محل قرار داده شد. بنابراین، پتری دیش‌ها در داخل ظرفی با ارتفاع دیواره ۵ cm در محل‌های با حداقل جریان همرفتی (دور از پنجره و جریان هوای سیستم سرمایشی) در فاصله تقریبی ۱/۲ m از سطح زمین در داخل ساختمان‌های مسکونی قرار داده شدند. ظروف نمونه برداری در محل نشیمن ساکنین ساختمان‌های مسکونی و البته تا حد امکان دور از پنجره و جریان هوای سیستم تهویه (جهت به حداقل رساندن جریان همرفتی) قرار داده شدند. مشخصات محل‌های نمونه برداری در جدول ۱ ارائه شده است. در مجموع،

جدول ۱- مشخصات محل‌های نمونه برداری

نمونه	محل نمونه برداری	طبقه ساختمان	داشتن پنجره دو جداره	تواتر استفاده از جاروبرقی
۱	پذیرایی	۲	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۲	پذیرایی	۳	خیر	۱ بار در هفته
۳	پذیرایی	۳	بله	۱ بار در هفته
۴	پذیرایی	۲	خیر	۱ بار در هفته
۵	پذیرایی	۳	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۶	پذیرایی	۳	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر

ادامه جدول ۱- مشخصات محل‌های نمونه برداری

نمونه	محل نمونه برداری	طبقه ساختمان	داشتن پنجره دو جداره	تواتر استفاده از جاروبرقی
۷	اتاق خواب	۲	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۸	پذیرایی	۳	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۹	اتاق خواب	۴	بله	۱ بار در هفته
۱۰	پذیرایی	۲	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۱	آشپزخانه	۳	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۲	اتاق خواب	۳	خیر	۱ بار در هفته
۱۳	اتاق خواب	۱	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۴	آشپزخانه	۶	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۵	آشپزخانه	۴	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۶	پذیرایی	۵	بله	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۷	پذیرایی	۲	خیر	۱ بار در هفته
۱۸	پذیرایی	۳	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۱۹	اتاق خواب	۱	خیر	۱ بار در هفته
۲۰	پذیرایی	۲	خیر	۲ بار در هفته یا بیشتر
۲۱	پذیرایی	۴	بله	۱ بار در هفته

_کنترل کیفیت

در این مطالعه، تا حد امکان در طی کار آزمایشگاهی، تهویه طبیعی و مکانیکی به حداقل ممکن رسید. از دو گروه پتری دیش شاهد میدانی و آزمایشگاهی استفاده شد. نمونه شاهد میدانی همراه با پتری دیش‌های اصلی در محل نمونه برداری بصورت سربسته قرار داده شدند. نمونه‌های شاهد آزمایشگاهی شامل پتری دیش تمیز و عاری از ذرات بود که در طی کار آزمایشگاهی بصورت سر باز در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شد تا آلودگی بالقوه در طی کار آزمایشگاهی در نظر گرفته شود. تعداد بسیار محدود ذرات بر روی سطح نمونه‌های شاهد نیز شمارش شد و اثر آن در کل نمونه‌ها اعمال گردید.

-آنالیز آماری

آمار توصیفی نتایج حاصل از این مطالعه با استفاده از نرم افزارهای Origin و Excel انجام

گرفت و آمار تحلیلی با استفاده از نرم افزار SPSS (SPSS Inc. Chicago, IL, United States) انجام گرفت. در ابتدا به منظور انتخاب آزمون پارامتریک یا غیرپارامتریک برای آنالیز آماری، توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk) بررسی شد. با توجه به اینکه توزیع داده‌ها در تمام گروه‌های مورد مطالعه نرمال بود، لذا از آزمون‌های پارامتریک برای تحلیل آماری استفاده شد. برای بررسی میزان تفاوت در نرخ ترسیب ذرات بین دو فصل از آزمون t جفتی (Paired t -test)، برای بررسی میزان تفاوت در نرخ ترسیب بین دو تواتر استفاده از جاروبرقی و بین ساختمان‌های با پنجره متفاوت از آزمون t نمونه مستقل (Independent sample t -test) و برای بررسی میزان تفاوت در نرخ ترسیب بین محل‌های مختلف نمونه برداری در ساختمان از ANOVA استفاده شد.

از میانگین" جهت شناسایی داده پرت، نرخ ترسیب در فصل گرم برای این ساختمان در محدوده داده پرت قرار گرفت و از داده‌های این ساختمان در فصول گرم و سرد چشم پوشی شد (حذف کمتر از ۵ درصد ساختمان‌ها). لذا در اینجا داده‌های مربوط به ۲۰ ساختمان توصیف و تحلیل می‌شود. مطابق نمودار ۱، میانگین نرخ عددی ترسیب ذرات در ساختمان‌های مورد مطالعه در کل دوره نمونه برداری برابر $9/23 \times 10^6 \pm 1/34 \times 10^6$ PN/m²/day بود.

تفاوت نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار بین فصول گرم و سرد در تمام ساختمان‌ها در فصل گرم از سیستم گرمایشی و در فصل سرد از سیستم گرمایشی استفاده می‌شد. مطابق نمودار ۲، به جز در یک ساختمان که نرخ ترسیب در فصل گرم در آن بطور غیرعادی کمتر از دیگر ساختمان‌ها بود، نرخ عددی ترسیب ذرات در ۲۰ ساختمان در فصل گرم بیشتر از فصل سرد بود. با توجه به این روند، میانگین نرخ عددی ترسیب در فصل گرم $(1/10 \times 10^7 \pm 1/57 \times 10^6)$ PN/m²/day و نیز بیشتر از فصل سرد $(7/46 \times 10^6 \pm 2/19 \times 10^6)$ PN/m²/day بود. نتایج آزمون t زوجی نیز نشان داد که میانگین نرخ عددی ترسیب در فصل گرم از لحاظ آماری بطور قابل توجهی بیشتر از فصل سرد بود ($P < 0/001$) (جدول ۲).

با محاسبه نرخ‌های ترسیب، بر اساس دستورالعمل سازمان بین‌المللی استاندارد/کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیکی (ISO/IEC) ارزیابی کل داده‌ها جهت شناسایی داده پرت انجام شد. طبق این دستورالعمل داده‌های با فاصله بیش از $3Z$ از میانگین به عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند. مقدار Z بصورت زیر محاسبه شد (فرمول ۲):

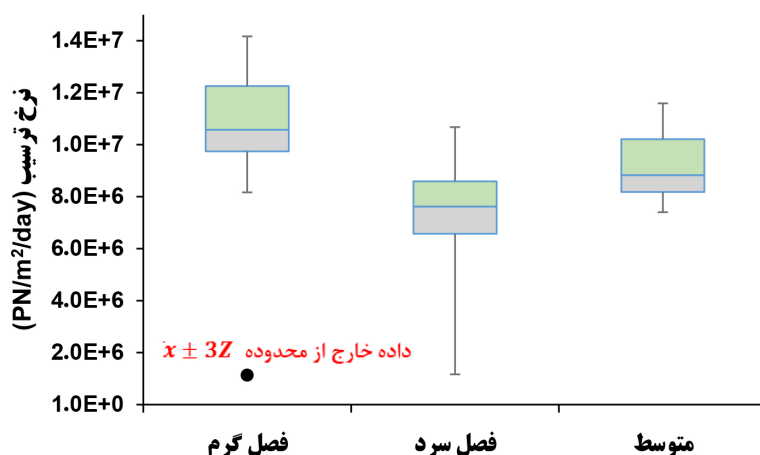
$$Z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

در اینجا x_i نرخ عددی ترسیب ذرات، $\bar{x}$ میانگین نرخ عددی ترسیب ذرات و σ انحراف معیار مقادیر نرخ عددی ترسیب ذرات هستند (۳۷).

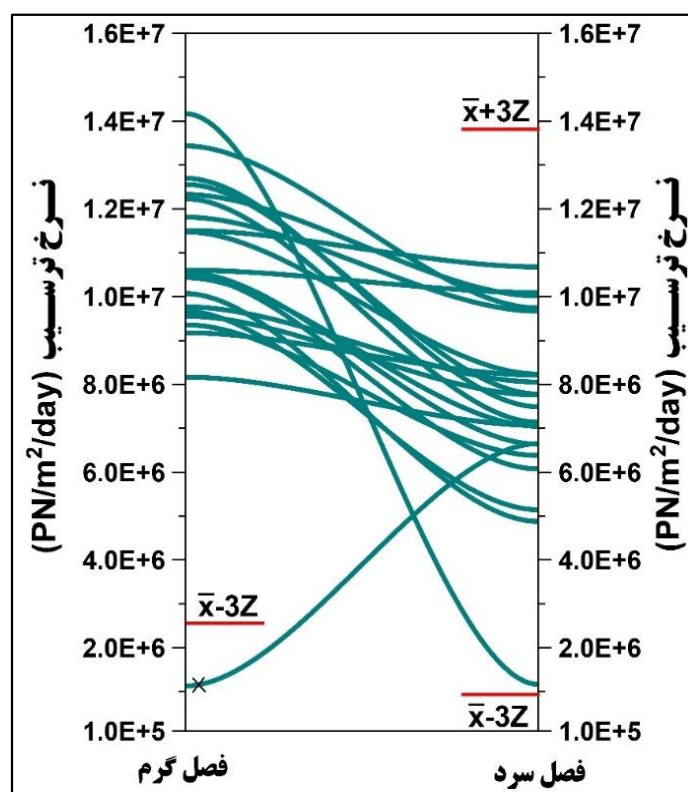
یافته‌ها

نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار

در این مطالعه نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های مسکونی در دو دوره ۴۵ روزه در فصول گرم و سرد برآورد شد. لازم به ذکر است که نرخ عددی ترسیب در یک ساختمان در فصل گرم بسیار پایین تر از دیگر ساختمان‌ها بود. با توجه به معیار "فاصله بیش از ۳ انحراف معیار فاصله



نمودار ۱- توزیع نرخ ترسیب ذرات در ساختمان‌های مسکونی



نمودار ۲- تغییرات نرخ ترسیب ذرات در دو فصل گرم و سرد

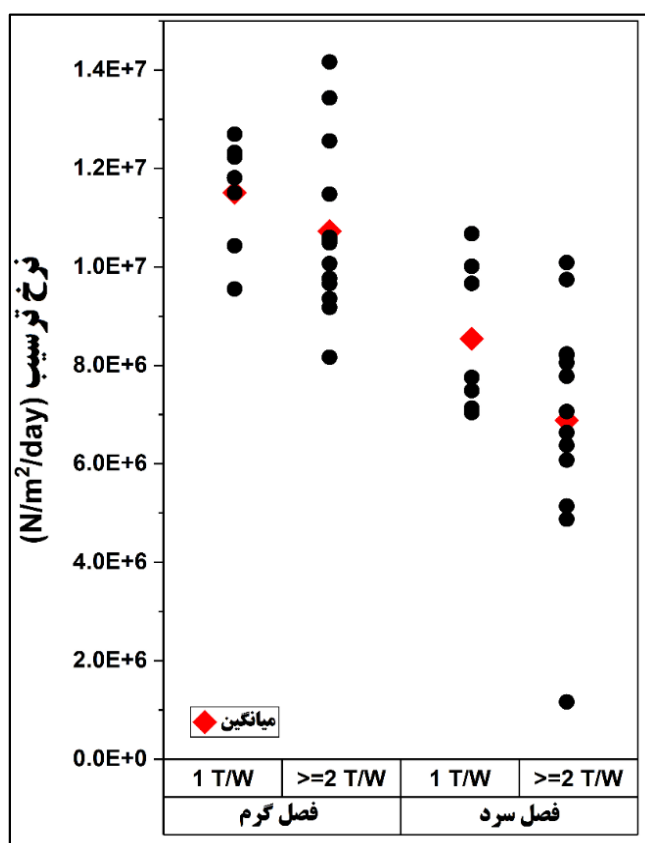
جدول ۲- آنالیز آماری تغییرات نرخ ترسیب ذرات در فصول گرم و سرد (۲۰ ساختمان)

شاخص	نرخ ترسیب (PN/m ² /day)		مقایسه میانگین*
	فصل سرد	فصل گرم	
حدافل	۱/۱۶×۱۰ ^۶	۸/۱۷×۱۰ ^۶	-
حداکثر	۱/۰۷×۱۰ ^۷	۱/۴۲×۱۰ ^۷	-
میانگین	۷/۴۶×۱۰ ^۶	۱/۱۰×۱۰ ^۷	<۰/۰۰۱
انحراف معیار	۲/۱۹×۱۰ ^۶	۱/۵۷×۱۰ ^۶	-
ضریب تغییرات (درصد)	۲۹/۴	۱۴/۳	-
میانه	۷/۶۲×۱۰ ^۶	۱/۰۶×۱۰ ^۷	-

* توزیع داده‌ها در هر دو فصل نرمال بود و لذا از آزمون t زوجی استفاده شد.

تفاوت نرخ عددی ترسیب بین ساختمان‌های با شرایط متفاوت در این مطالعه علاوه بر نمونه برداری ذرات گرد و غبار، تواتر استفاده از جارو برقی در ساختمان‌ها در هر دو دوره نمونه برداری نیز مورد توجه قرار گرفت. مطابق نمودار ۳، میانگین نرخ عددی ترسیب ذرات در فصل گرم در ساختمان‌های با تواتر ۱ بار در هفته استفاده از جاروبرقی (1.15×10^7 PN/m²/day) بیشتر از ساختمان‌های با تواتر ۲ بار در هفته یا بیشتر (1.07×10^7 PN/m²/day) بود. در فصل سرد نیز چنین روندی وجود داشت و نرخ ترسیب در ساختمان‌های با تواتر ۱ بار در هفته و در ساختمان‌های با تواتر ۲ بار در هفته یا بیشتر به ترتیب برابر 8.4×10^6 PN/m²/day و 5.4×10^6 PN/m²/day بود.

علاوه براین، در تمام ساختمان‌ها از فرش استفاده می‌شد، لذا امکان مقایسه نرخ ترسیب بر اساس این مشخصه وجود نداشت. همچنین، تفاوت در نرخ ترسیب ذرات بین ساختمان‌های با پنجره دوجداره و تک جداره (p برای فصل گرم و سرد به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۲۶) و بین محل‌های مختلف نمونه‌برداری (p برای فصل گرم و سرد به ترتیب برابر ۰/۳۶ و ۰/۷۴) معنادار نبود.



نمودار ۳- تغییرات نرخ ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های با فراوانی متفاوت استفاده از جاروبرقی (۲۰ ساختمان) (T/W: تعداد استفاده از جارو در هفته)

جدول ۳- آنالیز آماری تغییرات نرخ ترسیب ذرات گرد و غبار در ساختمان‌های با تواتر متفاوت استفاده از جاروبرقی (۲۰ ساختمان)

فصل	میانگین نرخ ترسیب (PN/m ² /day)	مقایسه میانگین*
	۱ بار در هفته استفاده از جاروبرقی	۲ بار در هفته یا بیشتر استفاده از جاروبرقی
فصل گرم	$1/15 \times 10^7$	$1/07 \times 10^7$
فصل سرد	$8/54 \times 10^6$	$6/88 \times 10^6$
		p
		۰/۳۲
		۰/۱۱

* توزیع داده‌ها برای تمام گروه‌ها نرمال بود و لذا از آزمون t نمونه مستقل استفاده شد.

بحث

نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار

این مطالعه از جمله معدود مطالعاتی است که نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار را در محیط داخل مورد بررسی قرار داد. تصویربرداری مستقیم میکروسکوپی از سطح پتری دیش‌ها امکان شمارش ذرات با اندازه حدود $1 \mu\text{m}$ و بزرگتر را فراهم کرد. البته لازمه این کار عدم ایجاد تداخل در توده ذرات تجمع یافته بر روی سطح ظروف پتری دیش در طی دوره نمونه برداری و تا زمان تصویربرداری بود. همانطور که قبلاً بیان شد، از مجموع ۲۱ ساختمان مورد مطالعه، از داده‌های یک ساختمان در هر دو فصل چشم پوشی شد زیرا داده فصل گرم آن به عنوان داده پرت شناخته شد. ممکن است علت این رخداد شرایط غیرعادی در ساختمان مورد مطالعه در فصل گرم (مانند عدم حضور ساکنین) یا حتی احتمال رخ دادن تداخل سهوی در نمونه توسط ساکنین (بدون اعلام آن به تیم تحقیق) باشد. مطابق نمودار ۱، میانگین نرخ ترسیب ذرات در ساختمان‌های مسکونی مورد مطالعه در شهر تهران برابر $1/34 \times 10^6 \pm 9/23 \times 10^6 \text{ PN/m}^2/\text{day}$ بود. این عدد بیانگر آن است که روزانه تعداد بسیار زیادی از ذرات گرد و غبار بر روی سطوح داخل ساختمان‌های مسکونی، مواد غذایی و آب آشامیدنی در معرض هوای داخل ترسیب می‌یابد. این ذرات در

زمان معلق بودن در هوای داخل (قبل از ترسیب) ممکن است استنشاق شوند و بعد از ترسیب بر روی سطوح نیز ممکن است از مسیر بلعیدن وارد بدن ساکنین شوند. نرخ عددی ترسیب ذراتی که در این مطالعه ارائه شده است بسیار بیشتر از نرخ‌های گزارش شده توسط Cui و همکاران (۲۰۲۲) برای منازل مسکونی در Yangzhou چین ($3/1 \times 10^5 \text{ PN/m}^2/\text{day}$) - $9/4 \times 10^4$ بود. این تفاوت می‌تواند بیشتر مربوط به روش اندازه گیری تعداد ذرات باشد (۷). در مطالعه حاضر ذرات با اندازه بیش از $1 \mu\text{m}$ شمارش شد اما در مطالعه Cui و همکاران (۲۰۲۲) ذرات با اندازه بزرگتر از $20 \mu\text{m}$ سنجش شد و نرخ ترسیب برای ذرات با اندازه $20-1 \mu\text{m}$ اعلام نشد (۷). مطابق Wark و همکار (۱۹۹۷) با کاهش اندازه ذرات غلظت عددی آنها بطور تصاعدی افزایش می‌یابد، بطوریکه غلظت عددی ذرات با اندازه $1-2 \mu\text{m}$ و $3-5 \mu\text{m}$ به ترتیب بیش از ۵۰۰ و ۱۶۰ برابر غلظت عددی ذرات با اندازه $30-10 \mu\text{m}$ است (۲). همچنین Kang و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که غلظت عددی ذرات با اندازه $1-2/5 \mu\text{m}$ در هوای داخل منازل مسکونی در کره جنوبی حدود $5/2 \times 10^6 \text{ PN/m}^3$ بود که تقریباً ۳۷ برابر غلظت عددی ذرات با اندازه $10-5 \mu\text{m}$ بود (۳۸). لذا عدم پوشش ذرات با اندازه $20-1 \mu\text{m}$ ممکن است تاثیر قابل توجهی بر نرخ‌های ترسیب گزارش شده در مطالعه Cui و

نزدیکتر باشد. این مقادیر با در نظر گرفتن غلظت عددی بیش از $10^7 \times 10^3 \text{ PN/m}^3$ ذرات بزرگتر از $1 \mu\text{m}$ در هوای داخل ساختمان‌های مسکونی دور از انتظار نیست (۳۸). البته باید توجه کرد که ذرات ترسیب یافته در حین ترسیب ممکن است با هم تجمع یابند یا در نقطه ترسیب ممکن است بر روی هم قرار گیرند. لذا نرخ‌های ترسیب واقعی بیش از مقادیر گزارش شده در این مطالعه هستند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روزانه میلیون‌ها ذره در هر متر مربع از ساختمان‌های مسکونی در حال ترسیب است. بخشی از این ذرات ممکن است سمی و خطرناک باشند و بر روی مواد غذایی و آب آشامیدنی و سطوح، بویژه سطوح در دسترس کودکان ترسیب یابند. در نهایت بخشی از ذرات گرد و غبار ترسیب یافته ممکن است بلعیده شوند یا بعد از ترسیب مجدداً معلق شده و وارد سیستم تنفسی شوند.

– تفاوت نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار بین فصول گرم و سرد

بر اساس داده‌های بدست آمده برای ۲۰ ساختمان، نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار در فصل گرم در تمام ساختمان‌ها بیشتر از فصل سرد بود. آزمون t زوجی در سطح معنی داری ۹۵ درصد نیز نشان داد که نرخ ترسیب در فصل گرم بطور قابل توجهی بالاتر از فصل سرد بود ($p < 0.001$) (جدول ۲). با توجه به اینکه این تفاوت از لحاظ آماری قابل توجه است، لذا حداقل یک متغیر یا برآیندی از متغیرهای مستقل مختلف باعث افزایش قابل توجه نرخ ترسیب در فصل گرم شده است. در تمام ساختمان‌های مورد مطالعه در فصل گرم وسایل سرمایشی روشن و در فصل سرد این وسایل خاموش بودند. مطالعات نشان داده‌اند که جریان همرفتی ناشی از فعالیت وسایل سرمایشی ممکن است باعث معلق شدن مجدد ذرات ترسیب یافته و به دنبال آن افزایش نرخ ترسیب شود (۳۹، ۳۴). Kanaani و همکاران نیز در یک مطالعه تجربی نشان دادند که نرخ ترسیب ذرات با افزایش نرخ تهویه در یک محیط سربسته افزایش می‌یابد (۴۰). استفاده از وسایل سرمایشی در فصل گرم علاوه

همکاران (۲۰۲۲) گذاشته باشد. علاوه براین، در مطالعه مذکور محتویات پتری دیش با استفاده از اتانول از فیلتری با قطر منافذ $500 \mu\text{m}$ عبور داده شد. در این شرایط ممکن است (الف) توزیع ذرات ترسیب یافته از بین برود و امکان شمارش برخی از ذرات از بین برود، (ب) برخی ذرات حل شوند، (ج) برخی ذرات با هم تجمع یابند، (د) برخی ذرات تجزیه شوند و (ه) برخی ذرات از منافذ فیلتر عبور کنند؛ لذا این تداخلات ممکن است باعث از دست رفتن بخش زیادی از ذرات شده و منجر به غیر واقعی شدن تعداد ذرات شمارش شده شود. از سوی دیگر، زمان نمونه برداری در مطالعه مذکور ۲۴ h بود، درحالی‌که در مطالعه حاضر زمان ۴۵ روز بود. مطابق Wark و همکار (۱۹۹۷) سرعت ته نشینی ذرات با افزایش اندازه بصورت تصاعدی افزایش می‌یابد و در شرایط استوکس سرعت ته‌نشینی ذره‌ای به قطر $1 \mu\text{m}$ و دانسیته 1 g/cm^3 حدود 0.035 cm/s و برای ذره‌ای به قطر $40 \mu\text{m}$ و همان دانسیته به 5 cm/s افزایش می‌یابد (۲). بنابراین، ذرات ریز فرصت کافی برای ته نشینی در این مدت کوتاه را ندارند و این زمان محدود ممکن است باعث عدم شمارش برخی ذرات گرد و غبار ترسیب شونده در زمان طولانی‌تر شود. در مطالعه Abad-López و همکاران (۲۰۲۴) نیز از پتری دیش برای نمونه برداری ذرات و میکروپلاستیک‌ها استفاده شد. در این مطالعه نیز محتویات آنها با استفاده از آب مقطر از فیلتر عبور داده شد و نرخ ترسیب ذرات گرد و غبار بسیار پایین‌تر از این مطالعه و در بازه $1/1 \times 10^4 - 1/9 \times 10^2 \text{ PN/m}^2/\text{day}$ گزارش شد (۳۶). همانطور که بیان شد، آبخوبی ذرات ترسیب شده نیز احتمالاً باعث حل شدن و تجمع بخش زیادی از ذرات می‌شود. با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها، در این مطالعه سعی شد که ذرات ترسیب یافته بر روی سطح پتری دیش‌ها بدون کوچکترین تداخل و بدون قرار گرفتن آنها در معرض هرگونه مایعی شمارش شوند تا حداقل افت تعداد رخ دهد. بنابراین، مقادیر ترسیب در بازه $1/16 \times 10^7 - 7/40 \times 10^6 \text{ PN/m}^2/\text{day}$ این مطالعه ممکن است نسبت به مطالعات قبل به واقعیت

بر افزایش جریان همرفتی باعث افزایش تهویه و در نتیجه افزایش نرخ تبادل ذرات گرد و غبار بین دو محیط داخلی و بیرونی می‌شود. علاوه بر این، عوامل بالقوه موثر دیگر مانند نرخ تهویه طبیعی (در اثر تغییر در مدت زمان بازگذاشتن پنجره‌ها و درب‌ها و شرایط آب و هوای بیرون)، سطح دما و رطوبت محیط داخل و سبک زندگی ساکنین نیز ممکن است بین دو فصل تغییر کند. برخی از این عوامل ممکن است باعث افزایش و برخی دیگر باعث کاهش نرخ عددی ترسیب ذرات شوند. لذا تفکیک اثرات منفرد هریک، همزمان با حفظ روال عادی زندگی ساکنین پرچالش است. لذا در این مطالعه به جای بررسی اثرات منفرد هر یک از متغیرهای منتسب به تغییر فصل، یک متغیر اصلی تحت عنوان "تغییر فصل از گرم به سرد" در نظر گرفته شد. بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که برآیندی از اثرات متغیرهای منتسب به تغییر فصل منجر به نرخ ترسیب بالاتر ذرات گرد و غبار در فصل گرم نسبت به فصل سرد شد. تغییر قابل توجه در نرخ عددی ترسیب ذرات بین دو فصل گرم و سرد بیانگر آن است که این نرخ در شرایط متفاوت محیط داخل ساختمان‌های مسکونی تغییر می‌یابد. بنابراین ممکن است این متغیر شاخص مناسبی برای ارزیابی نیمه-کمی یا کیفی سطح آلودگی محیط داخل به ذرات گرد و غبار باشد که البته تایید آن مستلزم انجام مطالعات بیشتر است.

تفاوت نرخ عددی ترسیب بین ساختمان‌های با تواتر متفاوت استفاده از جاروبرقی

در این مطالعه، هیچ تداخلی در زندگی روزمره خانواده‌ها از جمله در تواتر استفاده از جاروبرقی صورت نگرفت و خانواده‌ها در طی دوره نمونه برداری روال عادی زندگی خود را داشتند. در پایان دوره نمونه برداری مشخص شد که تمام خانواده‌ها از جاروبرقی با تواتر هفته‌ای ۱ بار یا بیشتر استفاده می‌کردند. براین اساس، ساختمان‌ها به دو گروه با تواتر "یک بار در هفته" و "۲ بار در هفته یا بیشتر" استفاده از جاروبرقی تقسیم بندی شدند (نمودار ۳). همانطور که در نمودار ۳ مشخص است و در جدول ۳ نیز ارائه شده است، نرخ ترسیب با افزایش تواتر

استفاده از جاروبرقی کمی کاهش یافت اما این تغییر از لحاظ آماری قابل توجه نبود (مقادیر p برابر ۰/۳۲ و ۰/۱۱ به ترتیب برای فصل گرم و سرد). البته باید توجه کرد که تواتر استفاده از جاروبرقی در تمام ساختمان‌ها بالا بود و این وضعیت در تعیین اثر دقیق این فعالیت مشکل ساز بود. در یک مطالعه بر روی نرخ ترسیب مبتنی بر تعداد ذرات میکروپلاستیک (بخش سنتتیک ذرات گرد و غبار) در ساختمان‌های مسکونی در سیدنی استرالیا، امکان بررسی اثر فواصل طولانی تر استفاده از جاروبرقی بر نرخ ترسیب ذرات فراهم بود. در این مطالعه، Soltani و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که نرخ ترسیب ذرات در ساختمان‌های با تواتر ۲ بار در ماه و کمتر استفاده از جاروبرقی بطور قابل توجهی بیشتر از ساختمان‌های با تواتر ۱ بار در هفته بود. آنها دلیل این اتفاق را افزایش تجمع ذرات بر روی سطح در فواصل طولانی تر استفاده از جاروبرقی و به دنبال آن معلق شدن مجدد مقادیر بیشتر ذرات در طی این فعالیت معرفی کردند (۳). از سوی دیگر، Corsi و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که غلظت ذرات معلق در هوای داخل در دوره زمانی استفاده از جاروبرقی ۳ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد (۴۱). این مطالعات دو تأثیر متضاد استفاده از جاروبرقی را نشان می‌دهند: ۱) کاهش مقدار ذرات تجمع یافته در کف ساختمان با افزایش تواتر استفاده از جاروبرقی و در نتیجه کاهش نرخ معلق شدن مجدد و ترسیب بعدی آنها و ۲) افزایش نرخ معلق شدن مجدد ذرات ترسیب یافته در کف ساختمان در حین استفاده از جاروبرقی به دلیل تلاطم مکانیکی ناشی از حرکت برس آن (۳، ۴۱). ممکن است اثر پیشنهادی در مطالعه Corsi و همکاران (اثر دوم) باعث افزایش ترسیب ذرات در دوره کوتاه مدت شود (۴۱)، اما به نظر می‌رسد در طول دوره نمونه برداری ۴۵ روزه، این تأثیرات متضاد یکدیگر را خنثی کرده باشند. بنابراین، میزان تاثیر تواتر استفاده از جاروبرقی بر نرخ ترسیب ذرات ممکن است با تغییر طول دوره نمونه برداری تغییر کند و لازم است در مطالعات آینده این تاثیر در دوره‌های زمانی مختلف بخصوص دوره‌های کوتاه مدت و البته با کنترل دیگر

مطالعه تلاش شد بدون کمترین تداخل در ذرات تجمع یافته بر روی سطح پتری دیش، نرخ عددی ترسیب ذرات گرد و غبار بدست آید، اما (همانطور که ذکر شد) برخی از ذرات ممکن بود در طی ترسیب بر روی ذرات قبلی قرار گیرند. این اتفاق اجتناب ناپذیر بود و لذا بهتر است نرخ‌های ترسیب ارائه شده در این مطالعه به عنوان حد پایین (lower bound) نرخ‌های واقعی در نظر گرفته شوند. برای این اساس، در یک رویکرد محافظه کارانه باید نرخ‌های واقعی ترسیب را بیش از مقادیر ارائه شده در این مطالعه در نظر گرفت. بطور کلی، مهمترین محدودیت این روش این است که در صورت کوتاه بودن زمان نمونه برداری، زمان کافی برای ترسیب ذرات ریز فراهم نمی‌شود و در صورت طولانی بودن زمان نمونه برداری امکان ترسیب ذرات بر روی ذرات از قبل ترسیب یافته وجود دارد. لذا پیشنهاد می‌شود با اجرای مطالعات تجربی در آینده، نرخ ترسیب در زمان‌های نمونه برداری مختلف برآورد شود و یک دوره زمانی بهینه بدست آید. همانطور که قبلاً بیان شد، یکی از محدودیت‌های این مطالعه عدم امکان تاثیر قطعی متغیرهای منفرد بر نرخ ترسیب ذرات بود و لازم است در مطالعات آتی با پوشش دادن تعداد بسیار بیشتر ساختمان‌ها این امر امکان پذیر شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه در طی دو دوره نمونه برداری ۴۵ روزه در طی فصول بهار و پاییز، نرخ عددی ترسیب ذرات در ساختمان‌های مسکونی شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ عددی ترسیب بطور میانگین برابر $1.34 \times 10^6 \text{ PN/m}^2/\text{day} \pm 9.23 \times 10^6$ بود. تحلیل آماری نشان داد که میانگین نرخ عددی ترسیب در فصل گرم $1.57 \times 10^6 \text{ PN/m}^2/\text{day} \pm 1.1 \times 10^7$ بیشتر از فصل سرد $2.19 \times 10^6 \text{ PN/m}^2/\text{day} \pm 7.46 \times 10^6$ بود ($p < 0.001$). متوسط ۴۵ روزه نرخ عددی ترسیب در ساختمان‌های با تواتر "یک بار در هفته" و "۲ بار یا بیشتر" استفاده از جاروبرقی

متغیرهای مخدوش کننده مورد بررسی قرار گیرد.

علاوه بر این، آزمون‌های آماری نشان داد که تفاوت معناداری در نرخ ترسیب ذرات بین ساختمان‌های با پنجره تک جداره و دو جداره و نیز بین محل‌های مختلف نمونه برداری در ساختمان نیز مشاهده نشد. لازم به ذکر است که مطالعات بر روی غلظت عددی ذرات در هوای محیط داخل، غلظت‌های بسیار بالاتر ذرات در محیط آشپزخانه را گزارش کرده‌اند (۴۲)، اما باید در نظر داشت که مطالعات مذکور غلظت لحظه‌ای ذرات هوابرد را پایش کرده‌اند درحالی‌که ترسیب ذرات یک فرآیند طولانی مدت است. در فاصله زمانی طولانی ترسیب ذرات، بویژه ذرات ریز که در اثر فرآیندهای احتراقی تولید می‌شوند، ممکن است آنها قبل از ترسیب بطور یکنواختی در تمام بخش‌های ساختمان پخش شوند و باعث شود که تفاوت معناداری در نرخ ترسیب ذرات در محل‌های مختلف ساختمان مسکونی مشاهده نشود. البته در یک رویکرد محافظه کارانه و به دلیل تعداد کم ساختمان مورد مطالعه (به عنوان یکی از محدودیت‌های این مطالعه) بهتر است نتایج آماری حاصل شده در این مطالعه را به عنوان مبنایی برای قضاوت در مورد تاثیر قطعی نوع پنجره یا محل نمونه برداری بر نرخ ترسیب ذرات قرار نداد. لذا با توجه به سطح بالای آلودگی محیط داخل به ذرات ترسیب شونده لازم است این نوع آلودگی بیشتر مورد توجه قرار گیرد و در مطالعات آتی با تمرکز بر تعداد بسیار بالاتر ساختمان‌ها امکان تعیین اثر متغیرهای منفرد بر سطح آلودگی فراهم شود.

این مطالعه متمرکز بر ساختمان‌های مسکونی و در شرایط واقعی زندگی ساکنین بود. در این شرایط محدودیت‌هایی مانند عدم موافقت خانواده‌ها در قرار دادن پتری دیش به مدت ۴۵ روز در طی دو دوره و از دست رفتن برخی نمونه‌ها (به دلیل رخ دادن تداخل در ذرات ترسیب یافته در پتری دیش در طی نمونه برداری یا انتقال نمونه به آزمایشگاه و عدم امکان شمارش ذرات) وجود داشت و در تعداد نهایی نمونه معتبر جمع آوری شده تاثیر داشت. اگرچه در این

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل بخشی از طرح مصوب بنیاد ملی علم ایران (Iran National Science Foundation: INSF) با کد ۴۰۳۱۸۹۸ است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران و همچنین دانشگاه تربیت مدرس جهت فراهم آوردن محیط پژوهش تشکر نمایند.

از لحاظ آماری تفاوت قابل توجهی نداشت. البته مطالعات بیشتری باید بر روی اثر استفاده از جاروبرقی در فواصل طولانی تر و همچنین اثر میانگین نرخ عددی ترسیب در دوره‌های نمونه برداری کوتاه تر انجام گیرد. بطور کلی، این مطالعه نشان داد که روزانه میلیون‌ها ذره در هر متر مربع از سطوح داخلی ساختمان‌های مسکونی در حال ترسیب است و در فصول مختلف بطور قابل توجهی متفاوت است. نرخ عددی بسیار بالای ترسیب ذرات گرد و غبار در محیط داخل و تغییرپذیری آن در شرایط مختلف بیانگر اهمیت بالای این شاخص در ارزیابی کیفیت محیط داخل و لزوم توجه بیشتر به آن در مطالعه آینده است.

References

- Fuller R, Landrigan PJ, Balakrishnan K, Bathan G, Bose O'Reilly S, Brauer M, et al. Pollution and health: a progress update. *The Lancet Planetary Health*. 2022;6(6):e535-e47.
- Wark K, Warner C, Davis W. *Air Pollution: Its Origin and Control*. 2nd ed. New York: Addison-Wesley; 1998.
- Sharifi Soltani N, Patrick Taylor M, Paton Wilson S. Quantification and exposure assessment of microplastics in Australian indoor house dust. *Environmental Pollution*. 2021;283:117064.
- Khodarahmi Z, Shekoohiyan S, Heidari M. A systematic review of the methods used for sampling and analysis of microplastics in air and settled dust of indoor and outdoor environments in Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2024;16(4):821-40 (in Persian).
- Laiman R, He C, Mazaheri M, Clifford S, Salimi F, Crilley LR, et al. Characteristics of ultrafine particle sources and deposition rates in primary school classrooms. *Atmospheric Environment*. 2014;94:28-35.
- Chang TJ, Hu TS. Transport mechanisms of airborne particulate matters in partitioned indoor environment. *Building and Environment*. 2008;43(5):886-95.
- Cui J, Chen C, Gan Q, Wang T, Li W, Zeng W, et al. Indoor microplastics and bacteria in the atmospheric fallout in urban homes. *Science of the Total Environment*. 2022;852:158233.
- Martins V, Faria T, Diapouli E, Manousakas MI, Eleftheriadis K, Viana M, et al. Relationship between indoor and outdoor size-fractionated particulate matter in urban microenvironments: Levels, chemical composition and sources. *Environmental Research*. 2020;183:109203.
- Lai AM, Carter E, Shan M, Ni K, Clark S, Ezzati M, et al. Chemical composition and source apportionment of ambient, household, and personal exposures

- to PM_{2.5} in communities using biomass stoves in rural China. *Science of the Total Environment*. 2019;646:309-19.
10. Wang X, Banks AP, He C, Drage DS, Gallen CL, Li Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and legacy and current pesticides in indoor environment in Australia—occurrence, sources and exposure risks. *Science of the Total Environment*. 2019;693:133588.
 11. Fappiano L, Caracci E, Iannone A, Murru A, Avino P, Campagna M, et al. Emission rates of particle-bound heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in PM fractions from indoor combustion sources. *Building and Environment*. 2024;265:112033.
 12. Sjostrom Y, Tao F, Ricklund N, de Wit CA, Hagström K, Hagberg J. Children's exposure to halogenated flame retardants and organophosphate esters through dermal absorption and hand-to-mouth ingestion in Swedish preschools. *Science of the Total Environment*. 2024;943:173635.
 13. Fang M, Liao Z, Ji X, Zhu X, Wang Z, Lu C, et al. Microplastic ingestion from atmospheric deposition during dining/drinking activities. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;432:128674.
 14. Butte W, Heinzow B. Pollutants in house dust as indicators of indoor contamination. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2002;175:1-46.
 15. Zuri G, Karanasiou A, Lacorte S. Microplastics: Human exposure assessment through air, water, and food. *Environment International*. 2023;179:108150.
 16. Gil H, Calderon JA, Buitrago CP, Echavarria A, Echeverria F. Indoor atmospheric corrosion of electronic materials in tropical-mountain environments. *Corrosion Science*. 2010;52(2):327-37.
 17. Corvo F, Torrens A, Betancourt N, Perez J, Gonzalez E. Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosion. *Corrosion Science*. 2007;49(2):418-35.
 18. Khodarahmi Z, Heidari M, Shekoohiyan S, Moussavi G. Settleable microplastics in residential buildings in a Middle Eastern area during warm and cool seasons; quantification, characterization, and human exposure assessment. *Environmental Research*. 2025;273:121251.
 19. Shi S, Li Y, Zhao B. Deposition velocity of fine and ultrafine particles onto manikin surfaces in indoor environment of different facial air speeds. *Building and Environment*. 2014;81:388-95.
 20. Miri A, Shirmohammadi E, Sorooshian A. Influence of meteorological factors and air pollutants on bacterial concentration across two urban areas of the Sistan region of Iran. *Urban Climate*. 2023;51:101650.
 21. Raza S, Nirmala B, Murthy M. Indoor dust fall and its composition in two public areas of a city in India. *Environment International*. 1990;16(1):53-56.
 22. Hubai K, Eck Varanka B, Tumurbaatar S, Teke G, Kovats N. Contribution of atmospheric fallout to the soil–root–leaf transfer of PAHs in higher plants. *Applied Sciences*. 2025;15(8):4407.
 23. Chen L, Huang Y, Qiu M, Li Z, Yang R, Li M, et al. Human settlement and destructive activities disrupt the positive contribution of dust to plant biomass growth over the past 2000 years. *Global and Planetary Change*. 2025;244:104640.
 24. Ziyadeh A, Karimi A, Hirmas DR, Kehl M, Lakzian A, Khademi H, et al. Spatial and temporal variations of airborne dust fallout in Khorasan Razavi Province,

- Northeastern Iran. *Geoderma*. 2018;326:42-55.
25. Neelamani S, Al Dousari A. A study on the annual fallout of the dust and the associated elements into the Kuwait Bay, Kuwait. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016;9:1-11.
 26. Lin Y, Mu G, Zhao X, Xu L, Zhang J. Atmospheric dustfall exhibits consistent sedimentary sorting with height evidenced by grain size characteristics. *Science of the Total Environment*. 2023;864:161143.
 27. Hussein T. Indoor-to-outdoor relationship of aerosol particles inside a naturally ventilated apartment – A comparison between single-parameter analysis and indoor aerosol model simulation. *Science of the Total Environment*. 2017;596-597:321-30.
 28. Wannaz E, Abril G, Rodriguez J, Pignata M. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in industrial and urban areas using passive air samplers and leaves of *Tillandsia capillaris*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2013;1(4):1028-35.
 29. Dominguez Garcia P, Almirall XO, Gomez Canela C. A POCIS-based approach for the monitoring of pharmaceuticals in wastewater treatment plants: Calibration and deployment challenges. *Environmental Pollution*. 2025;367:125641.
 30. Goncalves AD, Martins TG, Cassella RJ. Passive sampling of toluene (and benzene) in indoor air using a semipermeable membrane device. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;208:111707.
 31. Norouzi S, Khademi H, Faz Cano A, Acosta JA. Using plane tree leaves for biomonitoring of dust borne heavy metals: A case study from Isfahan, Central Iran. *Ecological Indicators*. 2015;57:64-73.
 32. Valdiviezo Gonzales L, Ortiz Ojeda P, Espinoza Morriberon D, Colombo CV, Rimondino GN, Forero Lopez AD, et al. Influence of the geographic location and house characteristics on the concentration of microplastics in indoor dust. *Science of the Total Environment*. 2024;917:170353.
 33. Ouaret R, Ionescu A, Ramalho O. Non-negative matrix factorization for the analysis of particle number concentrations: Characterization of the temporal variability of sources in indoor workplace. *Building and Environment*. 2021;203:108055.
 34. Zhang Q, Zhao Y, Du F, Cai H, Wang G, Shi H. Microplastic fallout in different indoor environments. *Environmental Science & Technology*. 2020;54(11):6530-39.
 35. Mukai C, Siegel JA, Novoselac A. Impact of airflow characteristics on particle resuspension from indoor surfaces. *Aerosol Science and Technology*. 2009;43(10):1022-32.
 36. Abad Lopez AP, Orozco Perez KK, Arana VA, Grande Tovar CD. Microplastics suspended in dust from different indoor environments in Barranquilla, Colombia: Predominant microparticles?. *Environmental Pollution*. 2024;350:124023.
 37. International Organization for Standardization (ISO). Proficiency testing by interlaboratory comparisons. Part 1: development and operation of proficiency testing schemes. Guide 43-1. Switzerland: ISO; 1997. Report No.: 1997(E).
 38. Kang K, Kim T, Kim H. Effect of indoor and outdoor sources on indoor particle concentrations in South Korean residential buildings. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;416:125852.
 39. Kazzaz M, Habchi C, Ghali K, Ghaddar N, Alotaibi S, Chakroun W. Micro-particle indoor resuspension under periodic airflows: A numerical-analytical study and experimentations. *Building and Environment*.

2017;123:299-314.

40. Kanaani H, Hargreaves M, Ristovski Z, Morawska L. Deposition rates of fungal spores in indoor environments, factors effecting them and comparison with non-biological aerosols. *Atmospheric Environment*. 2008;42(30):7141-54.
41. Corsi RL, Siegel JA, Chiang C. Particle resuspension during the use of vacuum cleaners on residential carpet. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2008;5(4):232-38.
42. Xu X, Hu K, Zhang Y, Dong J, Meng C, Ma S, et al. Experimental evaluation of the impact of ventilation on cooking-generated fine particulate matter in a Chinese apartment kitchen and adjacent room. *Environmental Pollution*. 2024;348:123821.
43. Xiang J, Hao J, Austin E, Shirai J, Seto E. Characterization of cooking-related ultrafine particles in a US residence and impacts of various intervention strategies. *Science of the Total Environment*. 2021;798:149236.



Available online: <https://ijhe.tums.ac.ir>

Original Article



Number deposition rate of dust particles in residential buildings in Tehran

Zahra Khodarahmi, Mohsen Heidari*, Gholamreza Moussavi, Sakine Shekoohiyan

Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Medical Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 27 August 2025
Revised: 16 November 2025
Accepted: 22 November 2025
Published: 14 December 2025

Keywords: Dust particles, Residential buildings, Number deposition rate, Warm and cold seasons

ABSTRACT

Background and Objective: To date, the number of dust particles that may be deposited daily in residential buildings has not yet been considered, while this type of pollution may have adverse effects on human health and can also be used to describe indoor air quality. The aims of this study were to evaluate the number deposition rate of dust particles in residential buildings in Tehran and to analyze its variability under various conditions.

Materials and Methods: In this cross-sectional study, 42 fallout samples were collected from residential buildings in Tehran during two periods in the spring (warm) and autumn (cold) seasons. For sampling, Petri dishes were placed inside residential buildings (living room, bedroom, or kitchen) for 45 days. The particles deposited on the surfaces of Petri dishes were counted directly and without any interference using a stereomicroscope. The obtained data were analyzed using Excel, Origin, and SPSS software.

Results: Average deposition rate over total sampling period was 9.23×10^6 PN/m²/day. The average deposition rate in the warm season (1.10×10^7 PN/m²/day) was significantly higher than the cold season (7.46×10^6 PN/m²/day) ($p < 0.001$).

Conclusion: This study showed that a substantial number of dust particles are deposited daily in residential buildings. The high number deposition rate, along with its variability under various conditions, indicates the necessity for increased attention to this metric of dust pollution in indoor environments.

***Corresponding Author:**

Moheidari@modares.ac.ir

Please cite this article as: Khodarahmi Z, Heidari M, Moussavi Gh, Shekoohiyan S. Number deposition rate of dust particles in residential buildings in Tehran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2025;18(3):535-52.

