



## Evaluation of the effect of horizontal holes in the tall buildings on the distribution of fine dust

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Analytic Study

#### Authors

Samaneh Foroughian<sup>1</sup>  
Mahdi Zandieh<sup>2\*</sup>  
Hossein Medi<sup>2\*</sup>  
Fariborz Karimi<sup>3</sup>

#### How to cite this article

Foroughian S, Zandieh M, Medi H, Karimi F. Evaluation of the effect of horizontal holes in the tall buildings on the distribution of fine dust. Naqshejahan 2024; 13 (4) :73-92

<http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-72988-fa.html>

### ABSTRACT

**Aims:** Fine dust is one of the environmental challenges in dry areas, which disturb human comfort. Wind is the main factor in the movement of fine dust, and the movement pattern of wind is affected by the architecture of cities. Form indicators, including height, the effect of corners and height form, have been examined in previous articles. The presence of a hole in the form is one type of design which affects the wind load and the flow of fine dust. The purpose of this research is to compare the distribution of fine dust in a tall building with horizontal cavity, with variable number and volume of cavity.

**Methods:** Numerical study was done by CFD. K-omega-SSD turbulence model is used. In order to the software data (the size and type of particles) and software validation, the field sampling method has been used. In this regard, a geometry based on reality has been selected in Mashhad (Baran tower3)

**Findings:** The findings of the research show that as the number of holes increases in volume and their size decreases, the wind speed inside the holes decreases and on the other hand, the movement behavior of the wind and accordingly the dispersion behavior of the particles become more uniform. In these cavities, the concentration of suspended particles increases and their size becomes smaller.

**Conclusion:** The results show that the design of the form with more holes and smaller volume is more suitable to deal with the phenomenon of fine dust and to achieve comfort in indoor environments. In addition, the design of the openings at higher heights and the depth of the holes reduces the settling rate of fine dust particles in the interior spaces.

**Keywords:** Fine dust, Tall buildings, Form, Horizontal cavity, Air flow, Field sampling, CFD

### CITATION LINKS

1- MSc, School of Architecture and Urbanism Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran  
2-Associate professor, School of Architecture and Urbanism Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran  
3. Assistant professor, School of Architecture and Urbanism Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

#### \*Correspondence

Address: School of Architecture and Urbanism Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.  
Email: [medi@arc.ikiu.ac.ir](mailto:medi@arc.ikiu.ac.ir)

#### Article History

Received: 17 Nov 2023  
Accepted: 6 Feb 2024  
Published: 18 Mar 2024

[2]. Managhebi Pour F, Shahr Ayini M. Evaluation....[3]. Purdihimi SH, Bina M. Investigating the effect of the direction....[4]. Mei D, Deng Q, Wen M, Fang Z. Evaluating Dust Particle....[5]. Wang J, Zhang T, Wang S, Battaglia F. : Gaseous pollutant transmission....[6]. Tan W, Li C, Wang K, Zhu G, Liu L. Geometric....[7]. Yang J, Shi B, Zheng Y, Shi Y, Xia G. Urban Form....[8]. Mu D, Gao N, Zhu T. CFD investigation on the effects....[9]. Yousefian S, Pourjafar M, Mahdavejad M, Moshfeghi....[10]. Yousefian S, Pourjafar M, Moshfeghi M, Mahdavejad.... Khodakarami J, Nouri Sh, Mansouri R. Influence of Tall Buildings....[12]. Hee Lee B, Wan Yee S, Hwa Kang D, Souk....[13]. Haghighifard HR, Tavakol MM, Ahmadi G. Numerical....[14]. Heidarinejad G, Shaoei M. Investigation....[15]. Mohammed M, Bulaka K, Bukar AM, Moda MA, Usman....[15]. Kozlovtsseva EY, Loboyko VF, Nikolenko DA....[17]. Yousefian S, pour Jafar M, Ahmad Pour Kalhoroudi....[18]. Kwok K. Effect of building shape....[19]. Kim YM, You KP, Ko NH. Across-wind....[20]. Kim YM, You KP. Dynamic responses....[22]. Kumar D, Dalui SK. Effect of internal angles....[23]. Sanyal P, Dalui SK. Effect of corner modifications....[24]. Li QS, Chen FB, Li YG, Lee YY. Implementing....[25]. Pal S, Raj R, Anbukumar S. Comparative study of wind....[26]. Kar R, Dalui SK. Wind interference effect on....[27]. Yin H. The influence of high-rise buildings on....[28]. Kumar Meena R, Raj R. Anbukumar S, Wind Excited....[29]. John AD, Singla G, Shuki S, Dua R. Interference....[31]. Nagar S K, Raj R, Dev N. Experimental study of wind....[31]. Hnaien N, Hassan W, Kolsi L, Mesloub A, Alghaseb....[33]. Huang YD, Hou RW, Liu ZY, Song....[34]. Nosek Š, Fuka V, Kukačka L, Kluková Z, Jaňour Z....[35]. Gao Z, Bresson R, Qu Y, Milliez M, de Munck....[36]. Shen J, Gao Z, Ding W, Yu Y. An investigation....[37]. Tobón AM, Moncho-Estevé IJ, Martínez-Corral....[38]. Hadavi M, Pasdarshahri H. Quantifying impacts of wind....[39]. Parsa Mofrad N, Tavakol M. Numerical Simulation....

## ارزیابی تأثیر حفره‌های افقی در

## ساختمان‌های بلند بر پراکنش ریزگردها

سمانه فروغیان<sup>۱</sup>، مهدی زندیه<sup>۲</sup>، حسین مدی<sup>۳</sup>، فریبرز کریمی<sup>۴</sup>

۱. کارشناسی ارشد، معماری، دانشکده معماری و شهرسازی،

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

۲. دانشیار، معماری، عضو هیئت علمی گروه معماری، دانشکده

معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین،

ایران

۳. دانشیار، معماری، عضو هیئت علمی گروه معماری، دانشکده

معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین،

ایران (نویسنده مسئول)

۴. استادیار، معماری، عضو هیئت علمی گروه معماری، دانشکده

معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین،

ایران

### چکیده

**اهداف:** ریزگردها از جمله چالش‌های زیست‌محیطی، در مناطق خشک، بوده که باعث برهم‌زدن آسایش انسان می‌شوند. باد، اصلی‌ترین عامل حرکت ریزگردها است و الگوی حرکتی باد، در شهرها، از معماری شهرها و ساختمان‌ها اثر می‌پذیرد. شاخص‌های فرمی شامل ارتفاع، اثر گوشه‌ها و فرم ارتفاعی، در مقالات پیشین مورد بررسی قرار گرفته‌اند. وجود حفره در فرم، از اقدامات طراحی فرم است که بر بار باد و جریان ریزگردها اثر می‌گذارد. هدف این پژوهش بررسی مقایسه‌ای از توزیع ریزگردها در ساختمان بلند دارای حفره افقی، با متغیر تعداد و حجم حفره، می‌باشد.

**روش‌ها:** مطالعه عددی توسط دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده- است. در شبیه‌سازی از مدل آشفتگی کامگااس‌اس‌دی استفاده شده و تغییرات الگوی جریان باد و توزیع ریزگردها، ارزیابی می‌شود. به‌جهت ورود داده‌های نرم‌افزاری (اندازه، نوع و مقدار ذرات) و اعتبارسنجی نرم‌افزار، از روش نمونه‌برداری میدانی و آنالیز آزمایشگاهی استفاده شده‌است که در این راستا هندسه‌ای مبتنی بر واقعیت در شهر مشهد (برج باران ۳) انتخاب شده- است.

**یافته‌ها:** یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد هرچه تعداد حفره‌ها در حجم بیشتر و اندازه آن‌ها کوچک‌تر شوند، سرعت باد در داخل حفره‌ها کاهش یافته و از طرفی رفتار حرکتی باد و به طبق آن رفتار پراکنشی ذرات، یکنواخت‌تر می‌شوند همچنین در این حفره‌ها غلظت ذرات معلق بیشتر و اندازه آن‌ها کوچک‌تر می‌شوند.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد طراحی فرم با تعداد حفره بیشتر و حجم حفره کوچک‌تر، برای مقابله با پدیده ریزگردها و رسیدن به آسایش در محیط‌های داخلی، مناسب‌تر است. علاوه‌براین، طراحی بازشوها در ارتفاعات بالاتر و عمق حفره‌ها، نرخ فرونشست ذرات ریزگرد را در فضاها داخلی، کاهش می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** ریزگرد، ساختمان بلند، فرم، حفره افقی، جریان هوا، نمونه‌برداری میدانی، CFD

### مقدمه

ریزگردها از سه جهت، اثرات زیست محیطی و اثر آن‌ها بر سلامت انسان، اثر آن‌ها بر کیفیت زندگی و اثر بر تغییرات اقلیمی، بر زندگی انسان اثر می‌گذارند. عمده‌ی ریزگردها منشأ طبیعی دارند البته میزان انتشار غبار با منشأ انسانی به ویژه در مناطق شهری قابل توجه است. در ریزگردهای طبیعی هر چه سرعت باد بیشتر باشد توان حمل میزان بیشتری از ریزگردها را دارا خواهد بود و در صورت کاهش سرعت باد، ریزگردها فروکش کرده، جابجا نخواهند شد. سه ویژگی، نرخ فرونشست ذرات، اندازه و ترکیبات شیمیایی ریزگردها، بر میزان خطر ساز بودن ریزگردها مؤثراند. ذرات هر چه ریزتر باشند قابلیت حمل شدن تا مسافت طولانی‌تری دارند اما ذرات درشت‌تر سریع‌تر نشست کرده و کمتر حمل می‌شوند [۱]. باد، جریان هوا، تحت تأثیر اختلاف فشار بوده که دارای دو مشخصه جهت و سرعت می‌باشد. لندسبرگ، ناهمواری‌های ایجادشده تحت تأثیر ساختمان‌های در مسیر باد را مهمترین دلیل کاهش سرعت باد در نزدیکی زمین می‌داند. ریزگردهایی که وارد بافت شهری می‌شوند، به‌دلیل تنوع در تراکم ساختمانی، تنوع تراکم بافت گیاهی، تفاوت در وسعت شهر، نوع شبکه شهری و جهت معابر، ارتفاع و فرم بناها، دارای تأثیرات متفاوتی نسبت به بافت‌های بیابانی و خالی از ابنیه اطراف شهر هستند [۲].

### پیشینه

در ادامه به بخشی از پژوهش‌های این حوزه پرداخته می‌شود. از آنجایی که جریان ریزگردها بسیار متأثر از جریان باد است، به مطالعه چند پژوهش که به بررسی جریان باد در اطراف ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند، نیز اشاره خواهد شد. پوردیهیمی، به بررسی اثر جهت ساختمان بر کاهش آلودگی ناشی از ریزگردها پرداخته‌است و در نهایت سمتی از

ساختمان که بیشترین آلودگی را رسوب می‌کند و یا معلق در هوا ننگه می‌دارد، نسبت به جهت وزش باد، مشخص و معرفی می‌شود [۳].

در مقاله‌ای چهار نوع چیدمان چند بلوک ساختمانی از نظر انتقال ذرات و میزان تراکم ذرات، با هم مقایسه شده است. این چهار چیدمان شامل مدل کم ارتفاع (با ارتفاع یکسان) مدل پله‌ای (صعودی) مدل پله‌ای (نزولی) و مدل با ارتفاع زیاد می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان داد، به هنگام عبور هوا به سمت بلوک‌های ساختمانی، گردابی در پشت ساختمان ایجاد می‌گردد که در مدل ساختمان نزولی و با ارتفاع زیاد، مانع از ورود این جریان شده است و ذرات منتقل نمی‌شود. مدل ساختمان با ارتفاع زیاد، کمترین انتقال ذرات و کمترین تراکم تعلیق را در بین چهار مدل دارد و در مقابل مدل ساختمان کم ارتفاع، بیشترین انتقال ذرات و بیشترین تراکم تعلیق را دارد. بنابراین ساختمان‌های بلند، مانع انتشار ذرات و ورود ذرات به دره‌های عمیق بین ساختمان‌ها می‌شود. غلظت ذرات در حالت چیدمان نزولی کمتر از چیدمان صعودی است پس مدل نزولی می‌تواند مدل مناسب برای توسعه شهری باشد. نوسان سرعت، علت اصلی تعلیق ذرات در بین ساختمان‌ها است. نتایج نشان داده است که چیدمان صعودی باعث افزایش سرعت باد و تسریع در انتقال ذرات می‌شود اما چیدمان نزولی باعث کاهش سرعت باد می‌شود [۴].

در مطالعه‌ای دیگر، ۶ نوع پنجره در نمای ساختمان، از نظر میزان انتقال آلاینده‌ها به فضاهای داخلی و به طبقات دیگر، مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی با افزایش سطح بازشو، مقدار آلاینده‌ها کاهش می‌ابد. نسبت ورود مجدد هوای خروجی، با افزایش ارتفاع در تمام انواع پنجره‌ها، کاهش می‌ابد. همچنین مشخص می‌کند که مدل AW (لولا از بالا)، بهترین عملکرد را برای محدود کردن انتقال آلاینده‌ها به طبقات دیگر دارد [۵].

تان و همکاران، اثرات ارتفاع ساختمان، نسبت ابعاد و شکل سقف را در دره‌های خیابان مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد افزایش ارتفاع ساختمان در سمت باد، چرخش عمودی هوا را افزایش و مقدار CO<sub>2</sub> را کاهش می‌دهد و علاوه بر این افزایش نسبت ابعاد خیابان می‌تواند هوای بیشتری را به داخل دره خیابان وارد کند و به این ترتیب مقدار CO<sub>2</sub> کاهش می‌ابد [۶]. بانگ و همکاران پنج شاخص پوشش سایت، ارتفاع متوسط، نسبت مساحت، درجه محصور شدن و اختلاف ارتفاع را در یک بلوک شهری ۲۰\*۲۰ مورد بررسی قرار داده‌اند و نتایج حاکی از آن است که شکل سه بعدی فضای شهری، تأثیرات آشکاری بر جریان آلاینده‌های هوا شهری می‌گذارند و به طور خاص پوشش سایت، ارتفاع متوسط و درجه محصوریت تأثیرگذار تر هستند و از این بین ارتفاع متوسط بیشترین اثر را دارد. همین‌طور در ارتباط با شاخص اختلاف ارتفاع، رابطه خطی مستقیمی با پراکندگی آلودگی وجود ندارد و این رابطه نیاز به بررسی بیشتر دارد [۷].

در مطالعه‌ای رفتار حرکتی و انتقال آلاینده‌ها در نمای یک ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه‌گیری می‌کند که آلاینده‌ها، روی نما به سمت بالا حرکت می‌کنند اما طول انتقال آلاینده‌ها در ارتفاع، در نمای رو به آفتاب دو برابر نمای سایه‌دار است [۸]. یوسفیان و همکاران در دو مقاله به صورت مجزا، به بررسی اثر گشودگی فضایی کریدورهای شهری و بررسی جهت دره‌های شهری، در شهر تهران پرداختند. آنها چهار مدل بلوک شهری را از منظر گشودگی فضایی مدل‌سازی کرده و دریافتند، در نمونه‌ها، تهویه غالباً از طریق سقف کریدور شهری صورت می‌گیرد و با افزایش شاخص گشودگی فضایی و کاهش شاخص مدنی‌شدن در فرم‌ها، از میزان تهویه عمودی کاسته و بر میزان تهویه در راستای افقی و از طریق دهانه‌های جانبی افزوده می‌شود و با افزایش گشودگی فضایی میزان آلاینده‌ها کاهش می‌ابد. در رابطه با اثر

حیدری نژاد در پژوهشی به بررسی اثر هندسه دودکش بر نحوه پراکنش آلاینده‌ها در حضور ساختمان‌ها می‌پردازد و نتیجه‌گیری می‌کند که حضور ساختمان پایین‌دست مانع از پخش آلاینده‌ها در ارتفاع بالاتر شده و مقدار آلاینده صد درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که سرعت خروجی آلاینده‌ها نسبت به شکل هندسی، اثر بیشتری بر پخش آلاینده‌ها دارد و با افزایش سرعت، میزان این اثرگذاری کاهش می‌یابد [۱۴]. در مطالعه‌ای به بررسی اثر بازشوهای نما بر میزان نفوذ ذرات پرداخته شده‌است و نتایج نشان می‌دهد که میزان رسوب، بسته به ابعاد و موقعیت بازشوها متفاوت است و بالاترین میزان رسوب مربوط به پنجره با نسبت ورودی به خروجی ۰/۷ می‌باشد [۱۵]. در مطالعه که در سال ۲۰۱۶ منتشر شده‌است، میزان فرونشست ذرات غبار ۲.۵ تا ۱۰ میکرون در طبقات مختلف یک ساختمان بلندمرتبه، با کاربری موسسه آموزش عالی، از سپتامبر تا نوامبر اندازه‌گیری و در نهایت چنین نتیجه‌گیری شده‌است که حداکثر ذرات غبار با اندازه درشت‌تر، در طبقات ۱-۴ قرار دارد و ذرات با اندازه کوچک‌تر در طبقات بالاتر مشاهده شده‌است و چنین جمع‌بندی می‌کند که با افزایش ارتفاع ساختمان، قطر ذرات گردوغبار و مقدار آن نیز کاهش می‌یابد [۱۶].

باد جزئی جداناپذیر از جریان ریزگردها می‌باشد، در نتیجه در ادامه به ذکر چند مقاله که به ارتباط بین باد با ساختمان‌های بلند پرداخته اند اشاره می‌شود. یوسفیان و همکاران به بررسی اثر فرم مجتمع‌های بلندمرتبه بر جریان هوا پرداخته‌اند و نتایج چنین حاصل شده‌است که سرعت باد در گوشه‌های ساختمان افزایش می‌یابد که این افزایش، با افزایش ارتفاع نسبت مستقیم دارد. عبور باد از میان دو ساختمان، به صورت تنگه عمل کرده و سرعت باد را افزایش می‌دهد و با افزایش ارتفاع از سطح زمین سرعت باد افزایش می‌یابد. علاوه بر این ساختمان با عرض کمتر در جبهه مقابل باد شرایط بهتری نسبت به ساختمان با عرض بیشتر دارد. فرم پلکانی رو به

جهت‌گیری دره‌های خیابانی، سه فرم متفاوت با یکدیگر مقایسه شدند و در نهایت چنین نتیجه‌گیری شده‌است که فرم با خیابان‌های ۴۵ درجه، به دلیل دارا بودن کمترین میزان آلاینده در ارتفاع عابر پیاده، به عنوان مناسب‌ترین فرم انتخاب شده‌است که در این صورت آلاینده‌ها، هم به صورت افقی و هم به صورت عمودی پراکنده می‌شوند و به این صورت معابر مورب باید در اصول توسعه پایدار شهری مورد توجه قرار گیرند [۹-۱۰].

خداکرمی و همکاران، به بررسی بافت پیرامون میدان امام خمینی تهران، با استفاده از نرم‌افزار انویمت پرداخته‌است. ساختمان بلندمرتبه در این بافت، ساختمان‌های مختلف از ۱۵ تا ۴۵ متر نیز مدل‌سازی شده‌است و نتایج الگوی توزیع جریان باد حاصل از نرم‌افزار، با یکدیگر مقایسه شده‌است. با بررسی رابطه ارتفاع و هندسه این ساختمان، با الگوی توزیع جریان و سرعت باد اطراف آن، مشخص شد که با تغییر ارتفاع، الگوهای تلاطم هوای اطراف ساختمان تغییر یافته و این امر باعث تغییر الگوی آلودگی هوا می‌شود. با بررسی الگوی وزش باد در سطوح مختلف از سطح زمین پیرامون یک ساختمان بلند، مشاهده می‌شود هرچه ارتفاع از سطح زمین افزایش یابد، آشفستگی حاصل از برخورد باد با ساختمان کاهش یافته، اما به طور کلی سرعت باد افزایش می‌یابد به طوری که میزان حداقل و حداکثر سرعت باد افزایش می‌یابد [۱۱]. در پژوهشی میزان نفوذ ریزگردها در ارتفاعات متفاوت یک ساختمان مورد بررسی قرار گرفته‌است و نتیجه‌گیری می‌شود که طبقات پایین‌تر یک ساختمان چند طبقه، در مقایسه با طبقات بالایی، در معرض غلظت بالاتری از ذرات هستند [۱۲]. بررسی اثر قرارگیری بنا بر روی پایه نشان می‌دهد که قرارگیری بنا بر روی پایه (پیلوتی) سبب کاهش رسوب ذرات در پایین دست ساختمان می‌شود (بخصوص ذرات ریزتر کمتر رسوب می‌کنند) [۱۳].

گرد کارآمدترین مدل می باشد [۲۳]. در پژوهشی دیگر به بررسی اثر حفره‌های ایجاد شده در ارتفاع‌های متفاوت در ساختمان‌های بلند بر سرعت باد پرداختند. این آزمایشات به وسیله تونل باد انجام گرفته است و نتایج نشان داده است که شکل حفره طراحی شده در ساختمان و جهت آن عامل مؤثر بر افزایش سرعت باد می باشند. هرچه حفره کوچکتر باشد سرعت باد در آن افزایش میابد [۲۴]. در پژوهشی دیگر دو فرم با پلان مربعی و پلان شکسته از نظر اثرات تداخل باد مقایسه شده اند و در نهایت مشخص شده است که مدل شکسته حداکثر فشار کلی باد را ۳۰ درصد کاهش می دهد و مکش را نیز ۵ درصد افزایش می دهد. [۲۵]. کار و همکاران در پژوهشی تغییر فشار باد را در وجوه ساختمان بلند به شکل پلان ۸ ضلعی با پلان مربعی مقایسه کردند. علاوه بر این در این پژوهش اثر باد بر این ساختمان ها را در مواجهه با ساختمان‌های همجوار مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش فاصله بین ساختمان ها رفتار باد قابل تشخیص تر است و توزیع باد به شکل متقارن در اطراف ساختمان اعمال می شود [۲۶].

از پژوهشی که در بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ انجام گرفته‌است چنین نتیجه‌گیری می‌کنند، که با افزایش ارتفاع بنا، سایه باد افزایش میابد و کشش در پشت ساختمان‌ها به حداقل می‌رسد. سایه باد ایجاد شده در پشت بنا برابر با چهار برابر ارتفاع می‌باشد. علاوه‌براین در نزدیکی ساختمان بلند سرعت باد، افزایش میابد و ساختمان‌های بلند، با افزایش ناهمواری‌ها در نما، جریان متلاطمی از باد ایجاد می‌کنند. همچنین مطالعات نشان داد، افزایش عمق بنا تأثیر چندانی بر افزایش منطقه امن پشت بنا ندارد [۲۷].

کومار در مطالعه‌ای به اثر کنج ساختمان بر بر جریان باد پرداخته و نتیجه‌گیری می‌کند که گوشه‌های گرد به کاهش نیروی ناشی از باد کمک می‌کند. [۲۸]. بررسی اثر جریان باد بر روی سقف شیبدار و جداره نمای ساختمان با متغییر فاصله

سمت باد باعث ایجاد منطقه آرام در فضای جلوی پلکان می‌شود و بلوک‌های یکپارچه نسبت به بلوک پلکانی تأثیر بیشتری در افزایش سرعت باد دارد [۱۷].

کوکاک به بررسی شکل ساختمان بلند بر جریان باد در تونل باد پرداخت و نتیجه‌گیری کرد، اصلاح فرم یک ساختمان بلند با سطح مقطع مستطیلی بر برآیند برانگیختگی باد تأثیر دارد و ایجاد شکاف‌های افقی و گوشه‌های پخدار باعث کاهش اثر باد بر ساختمان می‌شود [۱۸]. کیم و همکاران در دو مقاله مجزا به بررسی اثر مخروطی شدن فرم ارتفاعی در مقابل باد پرداخته اند و مشخص شد، هر چه مقطع ساختمان مخروطی تر شود (رأس فرم، تیزتر) باعث کاهش تحریکات حاصل از باد بر ساختمان می‌شود. این آزمایش با استفاده از تونل باد انجام گرفته است [۱۹-۲۰].

در پژوهشی به کمک تونل باد و شبیه سازی عددی به مقایسه رفتار باد در یک ساختمان صلیبی شکل پرداخته و نتیجه نشان داد که در هر دو روش بجز در برخی از وجوه دیوارها، تفاوتی در نتایج وجود ندارد و پلان‌های نامنظم مانند صلیبی شکل، در معرض فشار متفاوتی نسبت به ساختمان با پلان چهارضلعی هستند [۲۱].

در پژوهشی، به بررسی توزیع فشار باد بر روی ساختمان با پلان صلیبی با زوایای ۹۰ درجه و پلان با فرم متقاطع با زوایای متفاوت پرداختند. این مطالعات به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام گرفته است و نتیجه‌گیری می‌کند ساختمان با پلان متقاطع و زوایای متفاوت نسبت به ساختمان صلیبی با زوایای یکسان در برابر نیروی باد کارآمدتر است [۲۲]. در پژوهشی به بررسی اثر گوشه‌ها در ساختمان‌های بلند با پلان وای شکل (۷) پرداختند و سه مدل گوشه در این حجم را مورد آنالیز قرار دادند. سه مدل گوشه عبارتند از، راست گوشه، پخدار و گرد. برای انجام این مطالعه از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل کا-اوسیلون و برای اعتبار سنجی داده‌ها از تونل باد استفاده شده است. نتایج نشان داد، گوشه

آیا شاخص حفره افقی در حجم بر پراکنش یا فرونشست ذرات ریزگردها تأثیرگذار هستند؟ در صورت مثبت بودن پاسخ، تأثیر آن به چه صورت است و کدام فرم مناسب‌ترین فرم است؟ فرض نویسندگان بر این است که، وجود حفره در فرم ساختمان بلند الگوی حرکتی باد را دچار تداخل کرده و هرچه این حفره‌ها کوچکتر باشند خاصیت حفره‌ی افزایش یافته، سرعت باد بیشتر شده و حرکت ذرات غبار با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد.

### مواد و روش‌ها

ابزار اصلی ارزیابی کالبد شهری، اندازه‌گیری میدانی، اندازه‌گیری آزمایشگاهی در مقیاس کامل و مقیاس کاهش‌یافته و روش شبیه‌سازی عددی از جمله دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد [۱۰]. در این پژوهش از تکنیک مدل‌سازی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده‌است و اعتبارسنجی مدل با روش نمونه‌برداری میدانی صورت گرفته‌است. بنابراین نوع روش مورد استفاده روش کمی می‌باشد. در حوزه مدل‌سازی فرم شهری برخی از محققین از هندسه فرضی [۳۳-۳۴]، هندسه مبتنی بر واقعیت [۳۵-۳۶] و ترکیبی از هر دو روش [۳۷-۳۸] استفاده کردند. در اینجا از مدل‌سازی ترکیبی از هر دو روش در بستر شهر مشهد استفاده شده‌است. پژوهش پیش رو در دسته تحقیقات کاربردی قرار می‌گیرد و می‌توان از نتایج آن در طراحی توسعه شهر استفاده کرد. در بخش مدل‌سازی از محیط انسیس دیزاین-مودلر برای ترسیم هندسه، محیط آی‌سی‌ای‌ام (ICEM) برای فرآیند تولید شبکه، از نرم‌افزار فلوئنت از خانواده انسیس فلوئنت برای حل میدان جریان و از نرم‌افزار تک پلات و فلوئنت برای نمایش نتایج استفاده شده‌است.

### شاخص تحقیق

در این تحقیق شاخص مورد بررسی تعداد و حجم حفره‌های افقی در ساختمان‌های بلند می‌باشد که در هر سه فرم، از طبقه

بین ساختمان‌ها مشخص می‌کند که هر چه فاصله بین ساختمان‌ها کمتر باشد اثر فشار باد بر روی جداره نما کمتر شده و بر روی سقف شیبدار بیشتر می‌شود [۲۹]. در مطالعه‌ای چهار فرم ساختمانی از نظر رفتار آیرودینامیکی با هم مقایسه شده‌اند. این فرم‌ها شامل سه فرم با مقطع مربعی (مخروطی، پله‌ای با گوشه تیز و پله‌ای با گوشه گرد) و یک فرم با مقطع مثلث (منشور) می‌باشند و چنین نتیجه‌گیری می‌شود که فرم پله‌ای با گوشه تیز نامناسب‌ترین رفتار و مدل مخروطی مناسب‌ترین رفتار را دارد [۳۰].

در مطالعه‌ای دو فرم ساختمان بلند با پلان مربعی و اچ شکل، با یکدیگر مشخص شده و مشخص شده است که ضرایب فشار متوسط در پلان اچ شکل حدود ۳۵ درصد از پلان مربعی بالاتر است و اختلاف ضریب فشار در این دو فرم ساختمانی با افزایش زاویه تابش، کاهش می‌یابد [۳۱]. در مطالعه‌ای دیگر توزیع جریان باد در اطراف ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه‌گیری می‌شود که از ارتفاع ۳۰ متری ساختمان به سمت بالا تلاطم باد در نزدیکی نما به طور قابل توجهی تا ۷۳۰ درصد افزایش می‌یابد [۳۲].

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد، بررسی اثر حفره افقی در فرم ساختمان بلند، بر رفتار حرکتی و فرونشست ریزگردها، به‌ندرت مدنظر قرار گرفته‌است، همچنین، نتایج به‌دست آمده برای شرایط اقلیمی متفاوت، نتایج مختلفی را نشان می‌دهد، علاوه‌براین اکثریت تحقیق‌های صورت گرفته، در زمینه آلاینده‌های پخش‌شده از وسایل نقلیه و آلودگی‌های محیطی می‌باشد در صورتی که این تحقیق به بررسی وضعیت ریزگردها با منشأ طبیعی می‌پردازد. ازاین‌رو این پژوهش دارای نوآوری بوده و نتایج آن قابل اتکا برای بهره‌مندی از طراحی محیط زیستی معماری به‌جهت رسیدن به کیفیت هوایی مناسب می‌باشد.

در این تحقیق تلاش می‌شود با توجه به شکاف موجود در ادبیات موضوع به سؤال زیر پاسخ دهد:

### داده‌های اقلیمی

در این پژوهش از داده‌های گلباد ترسیم شده در دانشگاه ایالت آیووا (IOWA) سال ۲۰۲۲، استفاده شده است. باتوجه به گزارش جامع پایش آلاینده‌های محیط‌زیستی مشهد، بیشترین میزان ریزگردها مربوط به ماه‌های خرداد و تیر (گلباد ماه جولای) می‌باشد که بیشترین سرعت باد نیز در این ماه ثبت شده است. باتوجه به گلباد ماه جولای ۲۰۲۲، دو جهت باد با زاویه ۳۰ و ۴۰ درجه که دارای بیشترین فراوانی و بیشترین سرعت باد هستند، مد نظر قرار گرفته است. متوسط سرعت باد برای این دو جهت ۱۲.۹۶ مایل بر ساعت معادل ۵.۸ متر بر ثانیه می‌باشد. علاوه بر این باتوجه به فراوانی بادها در گلباد جولای، زاویه وزش ۳۴.۷ درجه نسبت به شرق بعنوان زاویه متوسط جریان باد در نظر گرفته شده است.

### شرایط مرزی، شبکه‌بندی و نوع حل معادلات

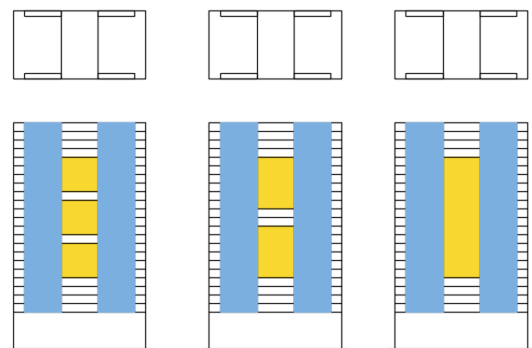
اندازه دامنه محاسباتی استفاده شده برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با در نظر گرفته شدن حداقل‌های ذکر شده در مطالعات و همچنین ابعاد ساختمان مدل (۲۸\*۵۴ متر با ارتفاع ۹۲ متر) از یک سو و همگرایی قابل قبول نتایج از سوی دیگر، تعیین گردیده است. فاصله هندسه تا مرز ورودی و مرزهای کناری ۱۵۰ متر، تا مرز خروجی ۴۲۰ متر و ارتفاع دامنه ۲۰۰ متر است.

در این تحقیق به جهت مدل‌سازی جریان از مدل کا امگا اس اس دی استفاده شده است. به دلیل جریان تراکم‌ناپذیر، نوع حل گر، فشار مبنا در نظر گرفته شده و حل جریان به صورت پایا انجام گرفته است. سیال ورودی، هوا، با سرعت ورودی ۵/۸ m/s و چگالی ۱/۲۲۵ kg/m<sup>3</sup> و ویسکوزیته ۱۰<sup>-۷</sup> می‌باشد که اثرات لایه مرزی زمین بر پروفیل سرعت در نظر گرفته شده است. برای کل دیوارها و سقف و کف دامنه حل، شرایط مرزی از نوع دیوار است و برای مدل-سازی جریان در نزدیکی دیوارها از توابع استاندارد دیوار

پنجم تا هجدهم دارای گشودگی حجمی است اما تعداد حفره های ایجاد شده در نما از یک تا سه متفاوت است. درواقع در مدل اول، یک حفره با حجم گشودگی بالاتر، با دو مدل دیگر که دارای دو و سه گشودگی اما با حجم کمتر هستند، با یکدیگر مقایسه می‌گردند. علاوه بر این رفتار حرکتی ریزگردها در تراس‌های فرم پایه، به جهت مقایسه با نتایج برداشت میدانی، برای اعتبارسنجی مدل نرم‌افزاری، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### عرصه پژوهش

عرصه مورد بررسی در این مقاله در بخش مسکونی شهر مشهد واقع شده است. برای این منظور بنایی با ارتفاع کلی ۹۲ متر دارای ۳ طبقه با کاربری عمومی و ۲۲ طبقه مسکونی (برج باران ۳)، در منطقه کوهسنگی، به منظور بررسی میزان فرونشست ذرات در طبقات مختلف آن، انتخاب شده است (هندسه مبتنی بر واقعیت). سایر مدل‌های مورد بررسی مبتنی بر هندسه فرضی با متغیر تعداد حفره های افقی در فرم ساختمان بلند، انتخاب شده‌اند (شکل ۱).



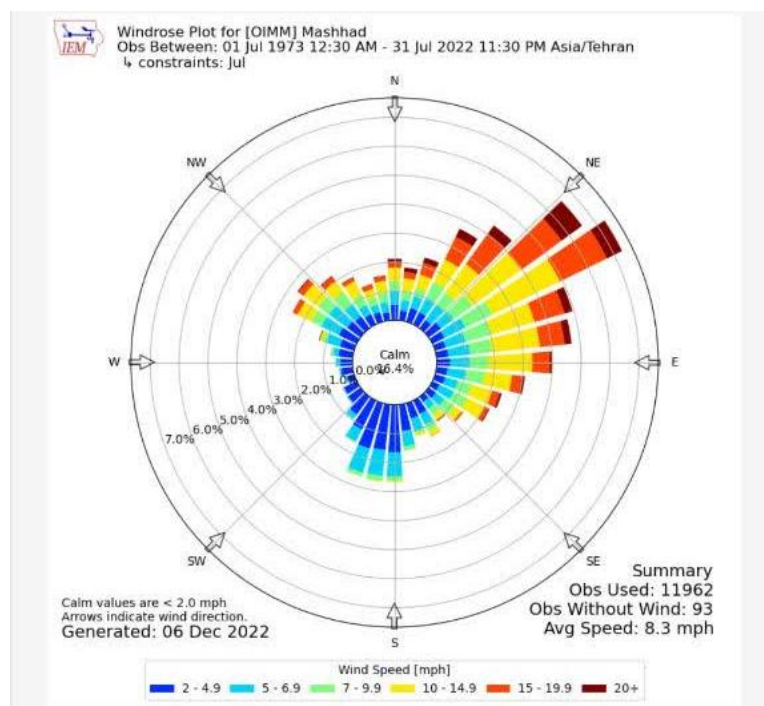
شکل ۱. هندسه فرمی شاخص مورد بررسی با متغیر تعداد و حجم حفره (نویسندگان)

### تنظیمات مدل

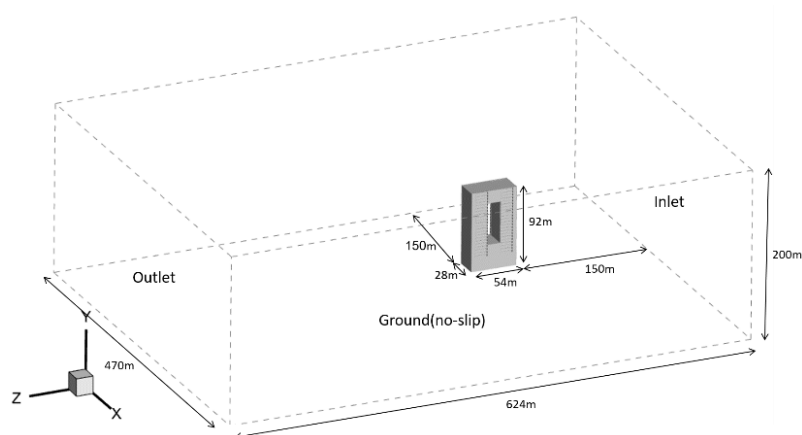
**آلاینده:** آلاینده مورد نظر در این تحقیق ذرات ریزگرد شامل، رس (کمتر از ۲ میکرون) ۷٪، سیلت (۲-۵۰ میکرون) ۶۹٪ و شن (بیشتر از ۵۰ میکرون) ۲۴٪ می‌باشد.

جدول ۱- مقدار واندازه ذرات در منطقه مورد مطالعه (نویسندگان)

| رس |          |     | سیلت (۲-۵۰ میکرون) |       |           |          |     | شن (بیشتر از ۵۰ میکرون) |
|----|----------|-----|--------------------|-------|-----------|----------|-----|-------------------------|
|    | خیلی ریز | ریز | متوسط              | درشت  | خیلی درشت | خیلی ریز | ریز |                         |
|    | ٪۳       | ٪۴  | ٪۵/۸               | ٪۱۷/۵ | ٪۳۶       | ٪۵       | ٪۱۹ |                         |



شکل ۲- گلباد جولای ۲۰۲۲ (www.mesonet.agron.iastate.edu.com)



شکل ۳- هندسه مدل شده در فرم F1 به همراه ابعاد دامنه محاسباتی (نویسندگان)

ذرات در برخورد با سطح یا منعکس شده و یا جذب می‌شود. در این تحقیق از ترکیب این دو، هنگام برخورد با دیوار استفاده شده‌است. به این صورت که دامنه حل برای کف و دیوار پشت به باد شرط جذب و برای بقیه سطوح شرط انعکاس در نظر گرفته شده‌است.

### اعتبارسنجی

در این تحقیق به جهت اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزار از شیوه نمونه‌برداری میدانی و آنالیز آزمایشگاهی استفاده شده‌است. به این منظور، ظروف نمونه‌برداری تیل‌ای، در خردادماه، که دارای بیشترین میزان ذرات ریزگرد می‌باشد، در ۵ طبقه از هندسه مبتنی بر واقعیت (برج باران ۳) شامل طبقات ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ به مدت یک ماه قرار داده شده‌اند.

در پایان ماه، ظروف تیل‌ای، جمع‌آوری شده و تیل‌ها به همراه ظرف آن، با آب مقطر شسته شده‌اند. سپس کاغذهای صافی خام، وزن شده تا وزن هر عدد کاغذ صافی مشخص گردد. پس از شستشو و جداسازی خاک از تیل‌ها و ظرف، آب مقطر همراه با ریزگردهای شسته شده از ظرف و تیل‌ها، از کاغذ صافی ۲ میکرومتری که وزن خام آن مشخص شده- است، عبور داده شده و پس از عبور کامل آب از کاغذ، ذرات ریزگرد بر روی کاغذ صافی باقی می‌ماند. در ادامه، کاغذ ای صافی به همراه ریزگردهای باقی‌مانده در روی آن، به جهت خشک شدن کاغذ و ریزگردها، در آون قرار داده می‌شوند. در نهایت پس از خشک شدن کامل آن‌ها، کاغذ به همراه ریزگردهای روی آن مجدداً وزن‌گیری می‌شوند و وزن بدست آمده در این مرحله، از وزن کاغذ صافی خام، کسر شده تا وزن دقیق ریزگرد باقی‌مانده روی کاغذها مشخص گردد.

نتایج وزن‌گیری نمونه‌ها (شکل ۷) و نتایج نرم‌افزاری، در جدول ۲ آورده شده‌است. واضح است که در روش تحقیق شبیه‌سازی، به جهت پیچیده بودن محاسبات، برخی از متغیرها ثابت در نظر گرفته می‌شوند

همراه با زبری استفاده شده‌است که ارتفاع زبری ۰.۰۰۱ متر و مقدار ثابت زبری ۰.۰۹ لحاظ شده‌است. شرایط مرزی برای دیوارهای بالا و اطراف، تقارن و برای صفحه ورودی شرط مرزی سرعت ۵.۸ متر بر ثانیه و برای صفحه خروجی فشار ثابت در نظر گرفته شد است. فرمول پروفیل عمودی ورودی سرعت باد  $u(z)$ ، انرژی جنبشی آشفته  $k(z)$  و نرخ اتلاف تلاطم  $\epsilon(z)$  به شرح زیر مشخص شده‌است.

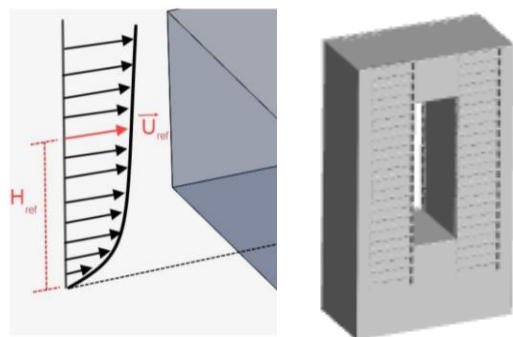
$$u(z) = \frac{u^*}{K} \cdot \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)$$

$$u^* = K \cdot \frac{u_{ref}}{\ln\left(\frac{H_{ref}+z_0}{z_0}\right)}$$

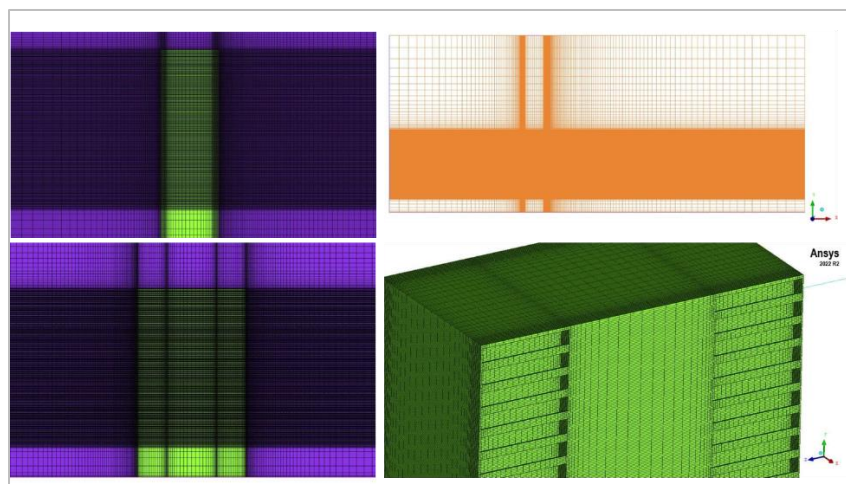
$$k(z) = \frac{u^{*2}}{\sqrt{c_\mu}}$$

$$\epsilon(z) = \frac{u^{*3}}{K(z+z_0)}$$

تمامی مرزهای دیوارهای اطراف دارای شرط عدم لغزش بوده و شامل سطح زمین و تمامی دیوارهای ساختمان می‌باشد. به جهت اتصال سرعت و فشار از الگوی سیمپل، و برای گسسته‌سازی معادلات فشار، ممتوم، انرژی جنبشی آشفته و نرخ اتلاف مخصوص از جهت باد مرتبه دوم استفاده شده- است. ضرایب زیر تخفیف برای فشار ۰/۳، برای چگالی ۱، برای ممتوم ۰/۷، برای انرژی جنبشی آشفته و نرخ اتلاف مخصوص ۰/۸ و برای ویسکوزیته آشفته از ضریب ۱ استفاده شده‌است. لازم به ذکر است که معیار مطلق همگرایی برای تمامی معادلات ۱۰<sup>-۵</sup> در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۴- پروفیل لایه مرزی زمین (UDF) (نویسندگان)



شکل ۵- شبکه مدل سازی شده (نویسندگان)



شکل ۶- ظروف نمونه برداری تپله ای در تراس ساختمان پایه (نویسندگان)



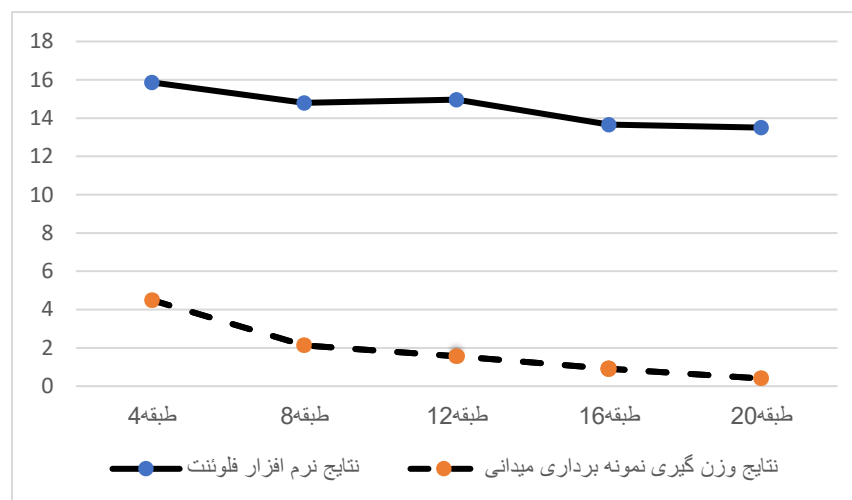
شکل ۷- وزن گیری نمونه مطالعاتی (نویسندگان)

کاهش مقدار ریزگردها با افزایش ارتفاع، در دو روش مطالعات نرم‌افزار و مطالعات میدانی، تا حد زیادی بر هم منطبق‌اند. میزان فرونشست ریزگردها با افزایش ارتفاع بنا، کاهش می‌یابد.

و یا از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. لذا نتایجی که از روش شبیه‌سازی عددی و روش میدانی استخراج می‌شوند، کاملاً بر یکدیگر منطبق نیستند اما با درصدی خطا، می‌توان ارتباطی مشخص بین نتایج آن‌ها یافت. با توجه به شکل ۸، روند کلی

جدول ۲- مقایسه جرم ذرات فرونشسته در دو روش مطالعاتی (نویسندگان)

| جرم ذرات g<br>(مطالعات میدانی) | جرم ذرات g<br>(استخراج شده از نرم‌افزار) | ارتفاع m | طبقه         |
|--------------------------------|------------------------------------------|----------|--------------|
| ۴/۴۹                           | ۱۵/۸۶                                    | ۲۵/۵     | طبقه چهارم   |
| ۲/۱۲                           | ۱۴/۸                                     | ۳۹/۵     | طبقه هشتم    |
| ۱/۵۶                           | ۱۴/۹۶                                    | ۵۳/۵     | طبقه دوازدهم |
| ۰/۹                            | ۱۳/۶۶                                    | ۶۷/۵     | طبقه شانزدهم |
| ۰/۴                            | ۱۳/۵                                     | ۸۱/۵     | طبقه بیستم   |



شکل ۸- مقایسه جرم ذرات فرونشسته مستخرج از نرم‌افزار و مطالعات میدانی (نویسندگان)

باشند، میزان افزایش سرعت باد، کمتر است. در داخل حفره‌ها رفتار مشابهی از حرکت باد اتفاق نمی‌افتد. در فرم ۱، کمترین سرعت باد، مربوط به یک سوم پایینی حفره و حداکثر سرعت باد، مربوط به یک سوم انتهایی ارتفاع حفره، می‌باشد. در فرم ۲ و ۳ رفتار مشابهی از جریان باد اتفاق می‌افتد و در هر دو فرم، حداکثر سرعت در نیمه پایینی حفره و حداقل آن، در

## یافته‌های تحقیق

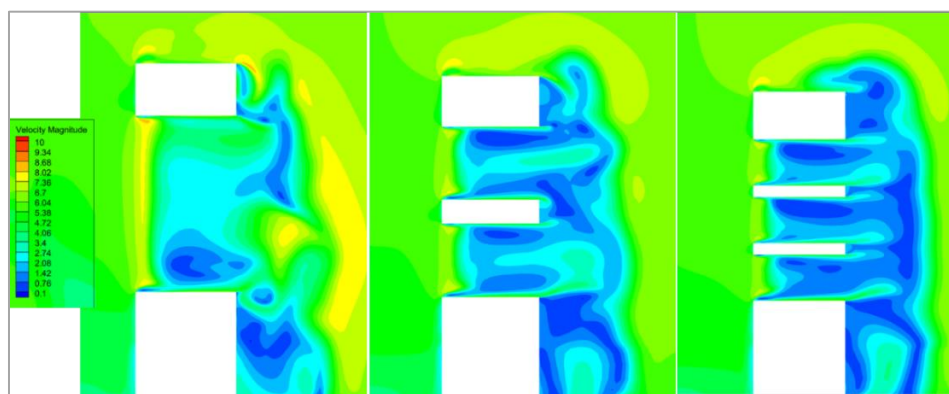
**تحلیل جریان باد در فرم‌های ساختمان بلند (حفره‌ها):**  
همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، سرعت باد در مدخل ورودی حفره‌های نما، افزایش می‌یابد و میزان این افزایش با ابعاد حفره‌ها، رابطه مستقیم داشته و هر چه حفره‌ها کوچکتر

وجود ذرات به رنگ سبز و زرد در این فرم، غالب است که نشان‌دهنده ذرات با حدود قطر ۴۰ میکرون می‌باشد. این ذرات در محدوده قطری سیلت درشت و خیلی درشت می‌باشند. فراوانی ذرات سیلت درشت و خیلی درشت، در محدوده کف حفره فرم ۱ (طبقه ۵ و ۶) و بخصوص در محدوده یک سوم بالایی حفره، اما نه نزدیک به سقف حفره (طبقات ۱۴ و ۱۵ و ۱۶)، در بالاترین مقدار قرار دارند. همچنین غلظت این ذرات در ورودی حفره بیشتر است و رفته رفته غلظت کم می‌شود تا در خروجی، به کمترین مقدار می‌رسد (شکل ۱۱). ذرات با رنگ آبی که دارای قطر ۵-۱ میکرون است و در محدوده ذرات رس و سیلت بسیار ریز قرار دارند، نیز در محدوده یک سوم بالایی حفره، بیشترین غلظت را دارند و مجدداً غلظت آن‌ها در ورودی حفره کمی بیشتر از خروجی آن است. در فرم ۲ و ۳ فراوانی ذرات با قطر ۲۰-۱ میکرون یعنی ذرات رس و سیلت خیلی ریز و ریز، نسبت به فرم ۱ بسیار بیشتر است

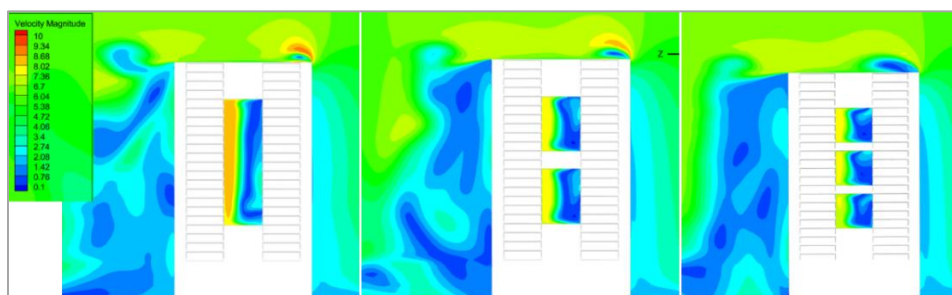
نیمه بالایی هر حفره می‌باشد. هرچه تعداد حفره‌ها کمتر است، کاهش سرعت در نیمه بالایی، کمتر اتفاق می‌افتد. بدیهی است در یک مقطع طولی از ساختمان، در مقایسه بین دو دیواره عمودی حفره، سرعت باد در نزدیکی دیواره پشت به باد، کمتر از دیواره رو به باد می‌باشد. در واقع با توجه به مقطع ارائه شده، سرعت باد در یک سوم انتهایی رو به باد به حداکثر رسیده که این سرعت حداکثری، هر چه حفره‌ها کوچک‌تر شده، کمتر می‌شود. سرعت باد در داخل حفره بیشتر از آن که تحت تأثیر ارتفاع تغییر کند، از ابعاد حفره و شکل آن اثر می‌پذیرد. (شکل ۱۰)

### تحلیل جریان ریزگردها

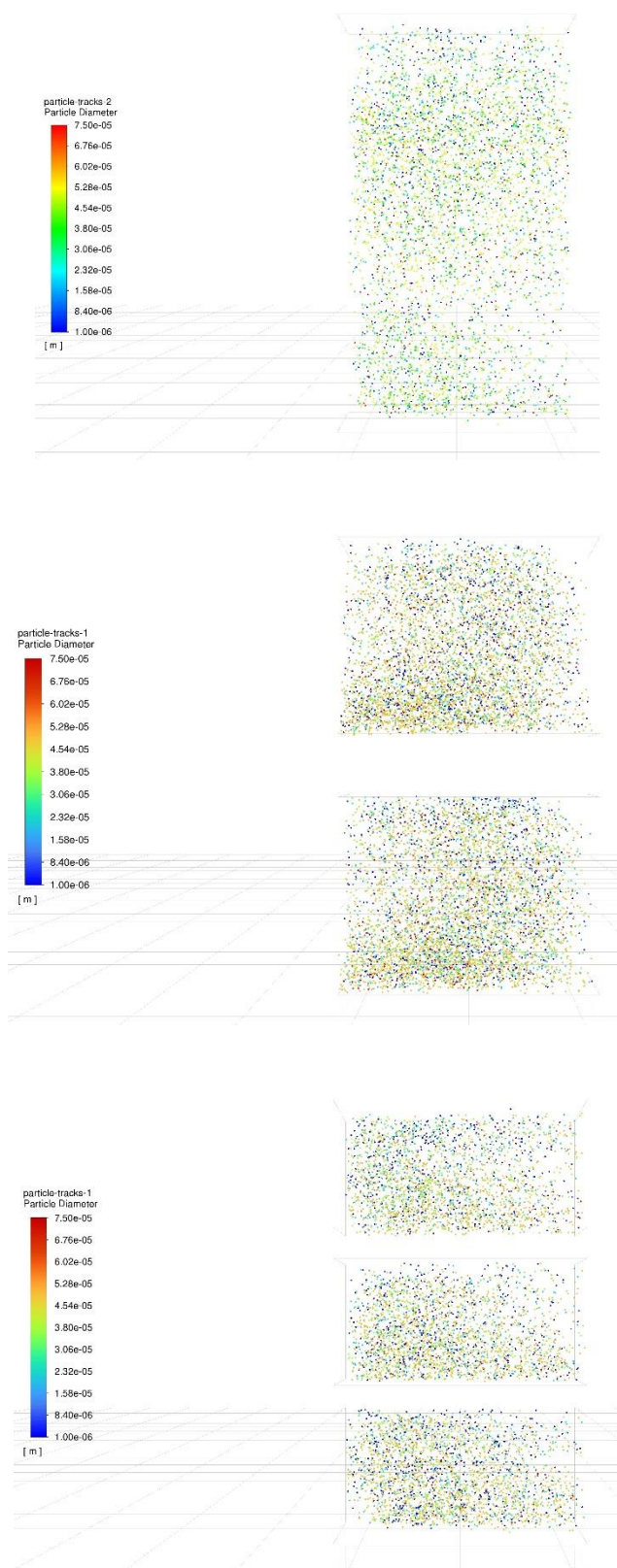
**قطر ریزگردها:** با توجه به این که با کاهش قطر ذرات، میزان بیشتری از آن‌ها در قسمت‌های پایین‌تر سیستم تنفسی، رسوب می‌کنند و خطرناک‌تر هستند [۳۹]، در مقایسه بین سه فرم، تجمع ذرات با قطر بزرگ‌تر، در فرم ۱ مشاهده می‌شود که این نشان‌دهنده حضور ذرات کم‌خطرتر در این فرم است.



شکل ۹- کانتور عمودی سرعت باد (عرضی) از وسط دهانه حفره‌ها (نویسندگان)



شکل ۱۰- کانتور عمودی سرعت باد (طولی) از وسط دهانه حفره‌ها (نویسندگان)



شکل ۱۱- کانتور قطر ذرات در داخل حفره‌های هر فرم (دید افقی) (نویسندگان)

حفره و در منطقه سایه باد ایجاد شده، نیز تعدادی از ذرات بسیار ریز که وزن آن‌ها بسیار پایین است، فرو می‌نشینند که غلظت و محدوده نشست آن‌ها در مقایسه با کف حفره، کمتر است. در کلیه فرم‌ها، بالاترین نرخ فرونشست ذرات ریزگرد، مربوط به نیمه‌ی پایینی دیوار پشت به باد و کف حفره می‌باشد. از نظر محدوده عمق داخل حفره‌ها، فرونشست ذرات در نزدیکی خروجی حفره‌ها بر روی کف، بیشتر است اما بر روی دیوار پشت به باد، نرخ فرونشست کمتر است. براساس کانتور غلظت ذرات، در شکل ۱۳، اختلاف بین نشست ذرات ریزگرد بر روی کف و دیوار پشت به باد در فرم ۱ نسبت به فرم ۲ و ۳، مشهود است. به علت سرعت بالای جریان باد در داخل حفره فرم ۱، ذرات ریزگرد توسط باد حمل شده و کمتر فرو می‌نشینند و در نتیجه غلظت ذرات بر روی جداره پشت به باد و کف حفره فرم ۱، بسیار کمتر از دو فرم دیگر است. در مقایسه بین غلظت ذرات فرونشسته در داخل حفره‌ی فرم ۱، در مناطقی که طبق کانتور قطر ذرات، ریزگردها بیشتر حضور دارند، فرونشست آن‌ها نیز بیشتر است. در نتیجه در طبقات ۵، ۶، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ و در ورودی حفره‌ها غلظت ذرات فرونشسته بالاتر و در طبقات ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۸ و در خروجی حفره‌ها، نشست ذرات کمتر اتفاق می‌افتد.

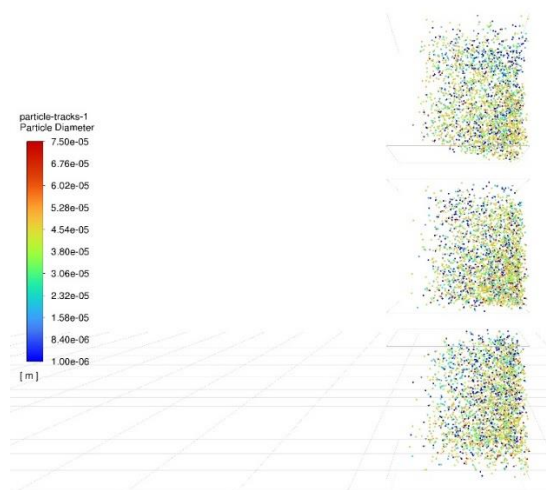
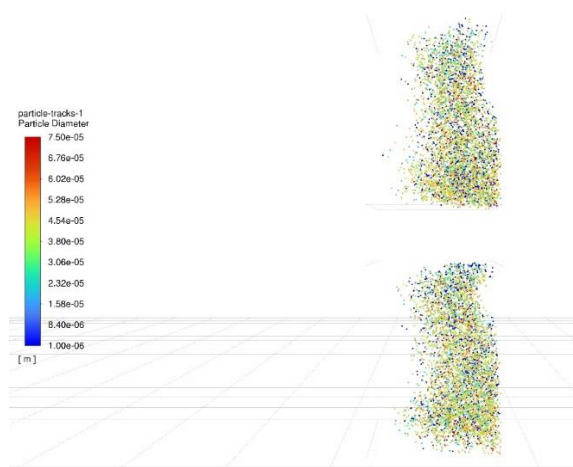
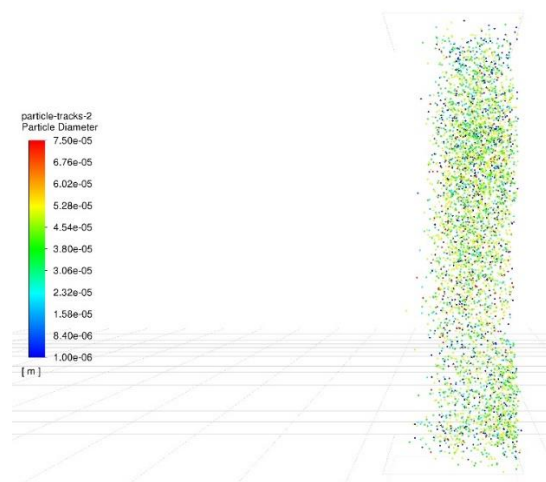
همانطور که قبلاً گفتیم، سرعت باد در فرم ۱ بالاتر و میزان فرونشست ذرات، به دلیل حمل ذرات توسط باد پایین‌تر است. علاوه بر این طبق کانتورهای سرعت باد، سرعت باد در فرم ۲ از فرم ۳ بیشتر است و مقدار فرونشست ذرات نیز، تابعی از جریان باد می‌باشد. از طرف دیگر در فرم ۳، حضور ذرات با قطرهای کوچک‌تر، طبق کانتور قطر ذرات، مورد تأیید است. ذرات ریزتر به علت وزن پایین خود، در تمام حفره حضور یکنواخت‌تری دارند و بدیهی است که نشست آن‌ها نیز در کل حفره اتفاق می‌افتد. در فرم ۲ نرخ فرونشست ذرات، در حفره پایینی نسبت به حفره بالایی، بیشتر بوده که این نیز با توجه به سرعت بالاتر باد در ارتفاعات بالاتر و همین‌طور قطر

اگرچه که حضور ذرات با قطرهای بزرگ‌تر، تا ۵۰ میکرون (سیلت خیلی درشت نیز)، نیز مشهود است که البته غلظت ذرات درشت‌تر در فرم ۳، بخصوص در حفره بالایی، کمتر از فرم ۲، می‌باشد. در فرم ۲، غلظت ذرات ریزتر، در نیمه بالایی حفره و ذرات درشت‌تر در نیمه پایینی حفره، مشهود است. رفتار حرکتی ریزگردها، به تفکیک قطر آن‌ها، در فرم ۳، یکنواخت‌تر است و ذرات با قطرهای متفاوت، از ۱-۵۰ میکرون، در تمام حفره حضور دارند که این به علت یکنواختی جریان باد در فرم ۳ می‌باشد.

در کل می‌توان جمع‌بندی کرد که ذرات ریزتر، در نیمه بالایی هر حفره و ذرات درشت‌تر، در نیمه پایینی و ورودی حفره‌ها، بیشتر یافت می‌شوند. از مقایسه غلظت ذرات در حفره‌های هر حجم می‌توان چنین تحلیل کرد که در فرم ۲ به علت حضور بیشتر ذرات درشت‌تر نسبت به فرم ۳، غلظت ذرات در حفره پایینی، از حفره بالایی بیشتر است اما در فرم ۳ به علت کوچک‌تر بودن قطر ذرات و سبک‌تر بودن آن‌ها، غلظت ذرات در حفره‌های بالایی از حفره‌های پایینی بیشتر است. از تفسیر شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که ذرات درشت‌تر، در محدوده‌ی نیمه‌ی پایینی هر حفره و در نیمه‌ی واقع شده در سایه باد داخل حفره، غلظت بالاتری دارند در صورتی که ذرات ریزتر، به صورت معلق در بخش اعظمی از حفره و بخصوص نیمه‌ی بالایی حفره، حضور پررنگ‌تری دارند. همچنین غلظت ذرات درشت‌تر در تمامی فرم‌ها، در ورودی حفره از خروجی آن بیشتر است در حالی که ذرات ریزتر در داخل حفره پراکنده هستند. هر چه ابعاد و حجم حفره کوچک‌تر می‌شود، حضور ذرات با اندازه درشت‌تر کمتر شده و غلظت ذرات ریز، بیشتر می‌شود.

#### غلظت ریزگردها بر روی جداره‌ها با شرط نشست

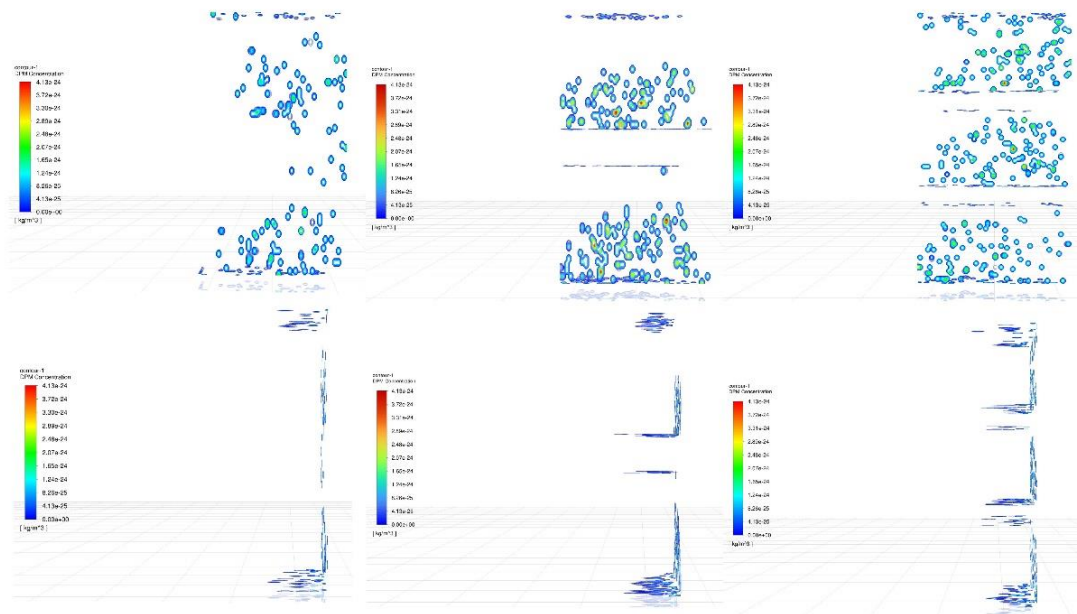
نشست ذرات در داخل حفره‌ها بر روی کف حفره و دیوار پشت به باد، در تمامی فرم‌ها دیده می‌شود. بر روی سقف



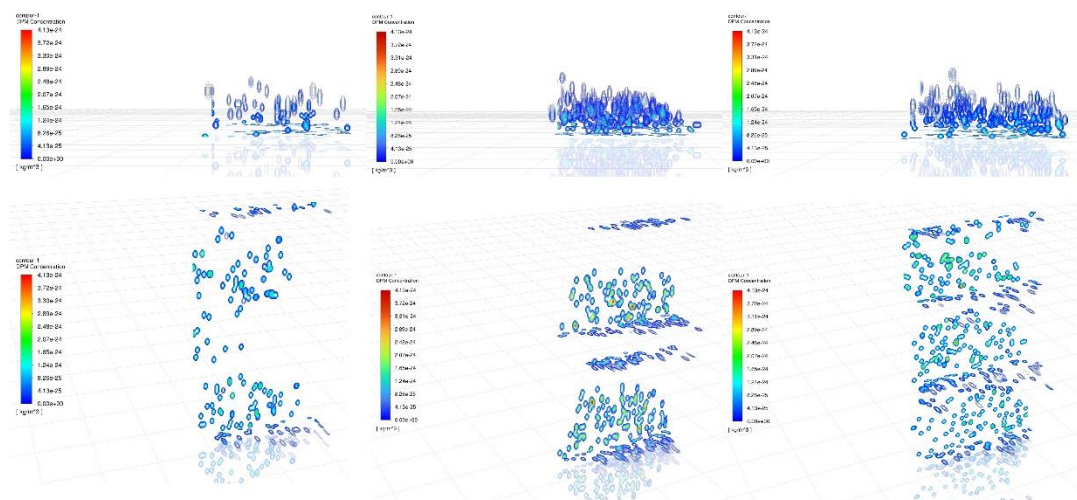
شکل ۱۲- کانتور قطر ذرات در داخل حفره‌های هر فرم (دیدی عرضی) (نویسندگان)

حفره‌ها را نداشته و ذرات ریزتری وارد می‌شوند. از طرفی ذرات ریز به واسطه وزن آن‌ها، در ارتفاعات بالاتر، بیشتر یافت می‌شوند پس حضور ذرات در حفره‌ی بالایی بیشتر بوده و بدیهی است که مقدار فرونشست ذرات نیز در داخل حفره سوم نسبت به حفره دوم، بیشتر باشد. در ادامه درصد فرونشست ذرات بر روی دو دیوار پشت به باد و کف هر حفره، در ۳ فرم به تفکیک در جدول آورده شده است که تحلیل عنوان شده در بالا را تأیید می‌کند.

کمتر ذرات، در طبقات بالاتر، قابل توجیح است. اما در فرم ۳ رفتار فرونشستی ذرات نسبت به ارتفاع، متفاوت بوده و نرخ فرونشست ذرات در حفره‌ی بالایی بیشتر از حفره‌ی میانی است اما همچنان به علت حضور ذرات سنگین در حفره‌ی پایین‌تر، بیشترین نشست، مربوط به این حفره است (شکل ۱۴). علت رفتار متفاوت در فرم ۳ این است که، به علت کوچک‌تر شدن حفره‌ها و کاهش سرعت باد در داخل حفره، در ارتفاعات بالاتر، ذرات درشت‌تر، توان حمل به داخل



شکل ۱۳- کانتور غلظت ذرات بر روی سطوح با شرط نشست در هر فرم (تصویر بالا، طولی و تصویر پایین عرضی) (نویسندگان)



شکل ۱۴- کانتور غلظت ذرات بر روی سطوح با شرط نشست در هر فرم (تصویر بالا، پلان و تصویر پایین پرسپکتیو) (نویسندگان)

جدول ۳- درصد فرونشست ذرات بر روی کف و دیوار پشت به باد در تمام فرم‌های مورد بررسی (نویسندگان)

| مجموع درصد حفره‌ها | درصد فرونشست ذرات بر روی دیوار پشت به باد | مجموع درصد حفره‌ها | درصد فرونشست ذرات بر روی کف حفره | فرم   |
|--------------------|-------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------|
| ۰/۲۸۷۸             | ۰/۲۸۷۸                                    | ۱/۶۰۳۵             | ۱/۶۰۳۵                           | فرم ۱ |
| ۰/۱۲۰۶             | ۰/۰۷۷۳                                    | ۳/۹۱۹۳             | ۲/۰۰۲۸                           | فرم ۲ |
|                    | ۰/۰۴۳۳                                    |                    | ۱/۹۱۶۵                           |       |
| ۰/۳۷۰۶             | ۰/۱۵۱۲                                    | ۷/۲۰۲۲             | ۲/۵۵۴۷                           | فرم ۳ |
|                    | ۰/۱۲۲۲                                    |                    | ۲/۲۷۴۸                           |       |
|                    | ۰/۱۲۹۰                                    |                    | ۲/۳۷۲۷                           |       |
|                    | حفره بالا                                 |                    | حفره بالا                        |       |

### نتیجه‌گیری

سرعت باد در فرم ۱ در مقایسه با دو فرم دیگر بسیار بالاتر است و میزان افزایش سرعت باد با ابعاد حفره رابطه مستقیم دارد. از تحلیل‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که اگر حجم حفره‌های افقی در فرم زیاد باشد، اکثریت ذرات با دانه بندی متفاوت، از داخل حفره عبور کرده و فرونی نشینند و طبیعی است که در صورت وجود پنجره در داخل حفره، ذرات ریزگرد به فضاهای داخلی راه یافته و این آسایش و سلامت انسان را به خطر می‌اندازد. اما در صورت طراحی حفره‌هایی کوچکتر، که سرعت باد در آن کمتر است، ذرات با اندازه ی ریزتر، که اتفاقاً خطرناک تر نیز هستند، در تمام حجم حفره حضور خواهند داشت، اما باد توان حمل این ذرات را در داخل حفره نداشته و فرو می‌نشینند به این صورت، نرخ غلظت و فرونشست ذرات بالاتر است. میزان خطر ساز بودن ریزگردها برای سلامتی و آسایش انسان، به غلظت و اندازه ریزگردها بستگی دارد. ریزگردها در محدوده ی رس، سیلت ریز و بسیار ریز، با غلظت بالا برای انسان بیماری زا هستند. این ذرات زمانی خطر ساز هستند که در هوا باقی مانده و فرونشینند. نتیجه فرم ۱ که سرعت باد در

آن زیاد است، نسبت به فرم با تعداد حفره بیشتر، از نظر مقابله با پدیده ریزگردها برای رسیدن به آسایش، مناسب نبوده. در فرم ۳ با وجود این که غلظت ذرات ریز بالاتر است اما در صورت وجود بازشو در داخل حفره، جریان باد توان حمل آنها به فضاهای داخلی را نداشته و ذرات در داخل حفره معلق باقی مانده و یا فرو می‌نشینند. در نتیجه:

- طراحی فرم‌ها با تعداد حفره بیشتر و حجم حفره کوچکتر نسبت به فرم با تعداد حفره کمتر و حجم بزرگتر حفره، از نظر تأمین آسایش انسان و بیماری زایی، مناسب تر است.
- در فرم با تعداد حفره بالاتر، طراحی بازشو‌ها در ارتفاعات بالاتر حفره، نرخ فرونشست ذرات ریزگرد را در فضاهای داخلی کاهش می‌دهد.
- طراحی بازشو‌ها در داخل حفره، بر روی دیوار پشت به باد و نیمه نزدیک به خروجی حفره، مناسب تر است.

## فهرست منابع

1. Ziayee A. Spatial and temporal distribution of geochemical characteristics, mineralogy of fine dust in Razavi Khorasan province. Ph.D. Thesis. Mashhad Ferdowsi University. 2020.
2. Managhebi Pour F, Shahr Ayini M. Evaluation of air flow in urban open space. The first national building and city energy conference. 2016.  
<https://civilica.com/doc/494259/>
3. Purdihimi SH, Bina M. Investigating the effect of the direction of the building on the reduction of pollution caused by fine dust in the building complexes under study: the buildings of Dezful city. journal of Iranian architecture Studies. 2015 Feb. 3(6): 41-63.  
[https://jias.kashanu.ac.ir/article\\_111731.html](https://jias.kashanu.ac.ir/article_111731.html)
4. Mei D, Deng Q, Wen M, Fang Z. Evaluating Dust Particle Transport Performance within Urban Street Canyons with Different Building Heights. Aerosol and Air Quality Research. 2015 Jun. 16: 1483-96.  
<https://aaqr.org/articles/aaqr-15-07-oa-0436>  
<https://aaqr.org/articles/aaqr-15-07-oa-0436>
5. Wang J, Zhang T, Wang S, Battaglia F. : Gaseous pollutant transmission through windows between vertical floors in a multistory building with natural ventilation. Energy And Buildings. 2017. 153:325-340.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.025>
6. Tan W, Li C, Wang K, Zhu G, Liu L. Geometric effect of buildings on the

**تشکر و قدردانی:** و با تقدیر و تشکر شایسته از استادان

فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر زندیه و جناب آقای دکتر مدی و جناب آقای دکتر کریمی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمودند و همواره راهنما و راه‌گشای بنده در این مسیر بودند.

**تأییدیه اخلاقی:** اینجانب سمانه فروغیان با اطلاع کامل از ابلاغ وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در خصوص «منشور و موازین اخلاق پژوهش» بدین و سیله تعهد می‌نمایم که به تمام موازین و مقررات ابلاغیه مذکور در راستای تحقیق حاضر عمل کرده و خواهم کرد.

**سهم نویسندگان:** این مقاله برگرفته از رساله دکتری سمانه فروغیان با عنوان "بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسانه ساختمان‌های بلند در تعامل با ریزگردها در شهر مشهد" می‌باشد که با راهنمایی دکتر زندیه و دکتر مدی و مشاوره دکتر کریمی و دکتر مهدوی‌نژاد در حال انجام است. نویسنده اول، پژوهشگر و نویسنده اصلی مقاله، فعالیت در تدوین محتوا و مطالعات کتابخانه‌ای و استخراج نتایج با سهم ۲۵ درصد، نویسنده دوم، استاد راهنما اول، فعالیت در کنترل و مدیریت روند مطالعات با سهم ۲۵ درصد، نویسنده سوم، استاد راهنما دوم، فعالیت در کنترل و مدیریت روند مطالعات با سهم ۲۵ درصد، نویسنده سوم، استاد مشاور، فعالیت در کنترل و مدیریت روند مطالعات با سهم ۲۵ درصد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**منابع مالی / حمایت‌ها:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

- New Technologies of Architecture and Planning. 2020. 10(3):193-203.  
<https://doi.org/20.1001.1.23224991.139.9.10.3.2.2>
12. Hee Lee B, Wan Yee S, Hwa Kang D, Souk Yeo M, Woo Kim K. Multi-zone simulation of outdoor particle penetration and transport in a multi-story building. Build Simulation. 2017. 10:525-534.  
<https://doi.org/10.1007/s12273-016-0340-1>
13. Haghighifard HR, Tavakol MM, Ahmadi G. Numerical study of fluid flow and particle dispersion and deposition around two inline buildings. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2018. 179:385-406.  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.018>
14. Heidarinejad G, Shaoei M. Investigation of the effect of mid-tunnel shaft geometry on dispersion of the pollutant in environment. Modares Mechanical Engineering. 2017. 17 (6) :13-22.  
<https://doi.org/20.1001.1.10275940.139.6.17.6.35.5>
15. Mohammed M, Bulaka K, Bukar AM, Moda MA, Usman AA, Lawan AK, Habib GA. The impacts of building opening characteristics on dust particle deposition indoors. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2023. <https://doi.org/10.1108/ijbpa-10-2022-0162>
16. Kozlovtsseva EY, Loboyko VF, Nikolenko DA. Monitoring of Fine Dust Pollution of Multistory Buildings Air Environment as an Adoption Factor of Town-planning Decisions. Procedia Eng. 2016. 150:1954-9.
- dispersion of carbon dioxide cloud in idealized urban street canyons. Process Safety and Environmental Protection. 2019 Feb. 122: 271– 80.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.12.020>
7. Yang J, Shi B, Zheng Y, Shi Y, Xia G. Urban Form and Air Pollution Disperse: Key Indexes and Mitigation Strategies. Sustainable Cities and Society. 2020 Jun. 57:101955.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101955>
8. Mu D, Gao N, Zhu T. CFD investigation on the effects of wind and thermal wall-flow on pollutant transmission in a high-rise building. Building and Environment. 2018. 137:185-197.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.051>
9. Yousefian S, Pourjafar M, Mahdaveinejad M, Moshfeghi M. Evaluation of the effect of urban corridor spatial openness on carbon monoxide pollutant distribution with the help of CFD. Journal of Environmental Studies. 2021 Nov. 47;3:239-58.  
<https://doi.org/10.22059/JES.2021.327715.1008206>
10. Yousefian S, Pourjafar M, Moshfeghi M, Mahdaveinejad M. Assessing the effects of urban canyon's direction on air flow pattern and CO dispersion using CFD (A case study of Tehran). Italian Journal of Planning Practice. 2021. 11;1:P101-121.  
<http://www.ijpp.it/index.php/it/article/view/97/88>
11. Khodakarami J, Nouri Sh, Mansouri R. Influence of Tall Buildings on the Distribution of Particulate Matter and Air Pollution in the Environment around Them. Naqshejahan- Basic studies and

118.  
<https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101843>
23. Sanyal P, Dalui SK. Effect of corner modifications on Y' plan shaped tall building under wind load. *Wind Struct An Int J*. 2020. 30(3):245–60.  
<https://doi.org/10.12989/was.2020.30.3.245>
24. Li QS, Chen FB, Li YG, Lee YY. Implementing wind turbines in a tall building for power generation: A study of wind loads and wind speed amplifications. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 2013. 116:70–82.  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.03.004>
25. Pal S, Raj R, Anbukumar S. Comparative study of wind induced mutual interference effects on square and fish-plan shape tall buildings. *Department of Civil Engineering*. 2021. 46(2): 86-112.  
<https://doi.org/10.1007/s12046-021-01592-6S>
26. Kar R, Dalui SK. Wind interference effect on an octagonal plan shaped tall building due to square plan shaped tall buildings. *Int J Adv Struct Eng*. 2016. 8(1):73–86.  
<https://doi.org/10.1007/s40091-016-0115-z>
27. Yin H. The influence of high-rise buildings on the environment. *Fine Arts College, Menia University, Egypt*. 2010.  
[https://www.academia.edu/10999592/The\\_influence\\_of\\_high\\_rise\\_buildings\\_on\\_the\\_environment](https://www.academia.edu/10999592/The_influence_of_high_rise_buildings_on_the_environment)
28. Kumar Meena R, Raj R. Anbukumar S, Wind Excited Action around Tall Building Having Different Corner Configurations. *Advances in Civil Engineering*. 2022.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.197>
17. Yousefiyan S, pour Jafar M, Ahmad Pour Kalhoroudi N. Evaluation of the impact of the form of high-rise complexes on climatic comfort with an emphasis on air flow. *Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*. 2017. 7(2):1–10.  
<http://journals.modares.ac.ir/article-2-1220-fa.html>
18. Kwok K. Effect of building shape on wind-induced response of tall building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998 Aug. 28: 381-90. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90134-1)  
[https://doi.org/10.1016/0167-6105\(88\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0167-6105(88)90134-1)
19. Kim YM, You KP, Ko NH. Across-wind responses of an aeroelastic tapered tall building. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 2008. 96(8–9):1307–19.  
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.038>
20. Kim YM, You KP. Dynamic responses of a tapered tall building to wind loads. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 2002. 90(12–15):1771–82.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00286-6](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00286-6)
21. Chakraborty S, Dalui S. Wind load on irregular plan shaped tall building - A case study. [Wind and Structures An International Journal](#). 2014 Apr. 19. 59-73.  
<https://doi.org/10.12989/was.2014.19.1.059>
22. Kumar D, Dalui SK. Effect of internal angles between limbs of cross plan shaped tall building under wind load. *Wind Struct An Int J*. 2017. 24(2):95–

- 04.036
36. Gao Z, Bresson R, Qu Y, Milliez M, de Munck C, Carissimo B. High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse. *Urban Clim*. 2018. 23:114–30.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.002>
37. Shen J, Gao Z, Ding W, Yu Y. An investigation on the effect of street morphology to ambient air quality using six real-world cases. *Atmos Environ*. 2017. 164:85–101.  
  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.047>
38. Tobón AM, Moncho-Esteve IJ, Martínez-Corral J, Palau-Salvador G. Dispersion of CO using computational fluid dynamics in a real urban canyon in the city center of Valencia (Spain). *Atmosphere (Basel)*. 2020. 11(7).  
<http://dx.doi.org/10.3390/atmos11070693>
39. Hadavi M, Pasdarshahri H. Quantifying impacts of wind speed and urban neighborhood layout on the infiltration rate of residential buildings. *Sustain Cities Soc*. 2020 Feb. 1;53.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101887>
40. Parsa Mofrad N, Tavakol M. Numerical Simulation of Particle Dispersion around Respiratory System of a Standing and Sleeping Mannequin inside a Room. *Modares Mechanical Engineering*. 2019 Apr. 19 (4): 877-85  
<https://doi.org/20.1001.1.10275940.1398.19.4.17.7>
29. <https://doi.org/10.1155/2022/1529416>
30. John AD, Singla G, Shuki S, Dua R. Interference Effect on Wind Loads on Gable Roof Building. *Procedia Engineering*. 2011. 14:1776-1783.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.223>
31. Mani Sandeep Kumar N V, Dahana Raju V, Ravindra Kumar P. Aerodynamic Studies of non – Circular High – rise buildings. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015. 12(5):14-21.  
<http://dx.doi.org/10.9790/1684-12511421>
32. Nagar S K, Raj R, Dev N. Experimental study of wind-induced pressures on tall buildings of different shapes. *Wind and Structures*. 2020. 31(5): 441-453.  
<https://doi.org/10.12989/was.2020.31.5.441>
33. Hnaïen N, Hassan W, Kolsi L, Mesloub A, Alghaseb M, Elkhayat KH, Hassan Abdelhafez MH. CFD Analysis of Wind Distribution around Buildings in Low-Density Urban Community. *Mathematics*. 2022. 10(7),1118.  
<https://doi.org/10.3390/math10071118>
34. Huang YD, Hou RW, Liu ZY, Song Y, Cui PY, Kim CN. Effects of wind direction on the airflow and pollutant dispersion inside a long street canyon. *Aerosol Air Qual Res*. 2019. 19(5).  
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.0344>
35. Nosek Š, Fuka V, Kukačka L, Kluková Z, Jaňour Z. Street-canyon pollution with respect to urban-array complexity: The role of lateral and mean pollution fluxes. *Build Environ*. 2018 Apr. 138:221–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.034>