



Influence of Tall Buildings on the Distribution of Particulate Matter and Air Pollution in the Environment around Them

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khodakarami J.^{*1} PhD,

Nouri Sh.¹ MSc,

Mansouri R.¹ PhD

How to cite this article

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 New Technologies of Architecture and Planning. 2020;10(3):193-203.

¹Architecture Department, Engineering Faculty, Ilam University, Ilam, Iran

*Correspondence

Address: Architecture Department, Engineering Faculty, Ilam University, Ilam, Iran

Phone: -

Fax: -

j.khodakarami@ilam.ac.ir

Article History

Received: March 17, 2020

Accepted: March 22, 2020

ePublished: October 21, 2020

ABSTRACT

Aims The impact of high-rise urban buildings on environmental conditions, including wind movement in urban valleys, is an issue that needs attention. Because wind is one of the important variables affecting the conditions of pedestrian thermal comfort as well as the scattering of urban outdoor pollution. The purpose of this study was to find the positive effects of such buildings on reducing environmental pollution.

Methods In this study, texture around Imam Khomeini Square in Tehran was examined using Envi-met software. The tallest building in this context is a telecommunication building with 50 meters high. Therefore, in addition to the actual height of the building and examining the wind speed pattern at different altitudes of 50 meters, assuming the building has different heights (15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 meters), was also simulated and the results of the wind flow distribution pattern of the different models was compared with each other.

Results By examining the relationship between elevation and geometry of this building with the pattern of current distribution and wind speed around it, it was found that by changing the height, the patterns of air turbulence around the building change and this changes the pattern of air pollution.

Conclusion This study shows the significant effect of building height on the wind pattern around the texture and the higher air layers and the air pollution distribution of the adjacent passages.

Keywords Urban texture; Tall buildings; Wind turbulence; Air pollution; Envi-met simulation

CITATION LINKS

[1] Pedestrian level winds and outdoor human ... [2] CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments ... [3] Pedestrian level wind environment assessment around ... [4] Characteristics of ventilation coefficient and its impact on ... [5] The airborne transmission of infection between flats in ... [6] Characteristics of air pollutant dispersion ... [7] A simple model for spatially-averaged wind profiles within ... [8] Strategic revision of urban services context of local management of ... [9] The form of residential buildings on local winds: air ... [10] An ENVI-met simulation study on influence of urban vegetation ... [11] Wind tunnel studies of a pedestrian-level wind ... [12] CFD simulation of the wind environment around an ... [13] Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of ... [14] Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise ... [15] Assessing the impact of urban high-rise building on wind flow performance ... [16] Air pollution concentration around tall ... [17] Wind's role in human health in Islamic medicine approach and its ... [18] Assessment of the physical-spatial effects of tower construction in ... [19] Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different ... [20] Predicting wind-induced vibrations of high-rise buildings using unsteady ... [21] Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of ... [22] Interference effects on wind pressure distribution between two ... [23] Wind environmental conditions in passages between two long ... [24] Mitigating urban heat islands: a method to identify potential wind ... [25] Wind environment around buildings: a knowledge-based ... [26] Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of ... [27] Evaluation of pedestrian-level wind environment around a row of ... [28] Imam Khomeini Square ... [29] The role of vernacular architecture in design of green ... [30] Optimizing the effect of vegetation for ... [31] Validation of temperature-perturbation and CFD-based ... [32] A comparison of model performance between ENVI-met and ... [33] Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the ... [34] Simulating surface-plant-air interactions inside ... [35] Analysing the influence of different street vegetation on ... [36] A simulation of the Wangara atmospheric ...

تأثیر فرم هندسی ساختمان‌های بلند بر پراکنش ذرات معلق و آلودگی هوا در محیط پیرامون آنها

جمال خداکریمی* PhD

گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

شهلا نوری MSc

گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

رضا منصوری PhD

گروه معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

چکیده

اهداف: تأثیرات ساختمان‌های بلند فارغ از سیمای شهری بر شرایط محیط زیست پیرامون خود از جمله باد در دره‌های شهری مساله‌ای است که نیازمند توجه و بررسی است. چرا که باد از متغیرهای مهم تأثیرگذار بر شرایط آسایش حرارتی عابران و همچنین پراکندگی آلودگی در فضای باز شهری است. هدف از این تحقیق یافتن تأثیرات مثبت چنین ساختمان‌هایی بر کاهش آلودگی محیط اطراف آنهاست.

روش‌ها: در این پژوهش بافت پیرامون میدان امام‌خمینی در شهر تهران به‌عنوان نمونه با استفاده از نرم‌افزار انویمت مورد بررسی قرار گرفته است. ساختمان بلندمرتبه در این بافت ساختمان مخابرات با ۵۰ متر ارتفاع است. لذا علاوه بر ارتفاع واقعی ساختمان و بررسی الگوی سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف ساختمان ۵۰متری با فرض این که ساختمان دارای ارتفاع‌های مختلف (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ متر) باشد نیز شبیه‌سازی شده و نتایج الگوی توزیع جریان باد مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

یافته‌ها: 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. **نتیجه‌گیری:** این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر ارتفاع ساختمان در الگوی وزش باد بافت پیرامون آن و نیز لایه‌های هوای بالاتر و پراکنش آلودگی هوای معابر مجاور است.

کلیدواژه‌ها: بافت شهری، ساختمان بلند، تلاطم باد، آلودگی هوا، شبیه‌سازی انویمت

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

*نویسنده مسئول: j.khodakarami@ilam.ac.ir

مقدمه

باد از متغیرهای مهم اقلیمی در بافت‌های شهری است که بر آسایش حرارتی عابران^[1]، پراکندگی آلودگی و تامین سلامتی انسان تأثیرگذار است^[2-4]. به علاوه، پراکنده‌شدن آلودگی‌های محیط از طریق تهویه و باد از فاکتورهای مهم مؤثر بر کیفیت هوای داخل (IAQ) نیز است^[5]. نحوه قرارگیری عناصر شهری (خیابان، ساختمان‌ها) بر جریان باد، تهویه هوا در داخل بافت شهری و همچنین پراکندگی آلودگی هوا تأثیرگذار است^[6]. مدل‌سازی جریان باد در بافت شهری به‌علت افزایش توجه به سلامتی تحت تأثیر افزایش آلودگی شهرها بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد^[7]. باد در برخورد با ساختمان رفتار پیچیده‌ای دارد که بایستی در مرحله طراحی مورد توجه و بررسی قرار گیرد^[2]. امروزه با افزایش جمعیت، رشد عمودی شهرها و بلندمرتبه‌سازی در بافت

شهری رو به افزایش است^[8]. ساختمان بلند براساس دو تعریف شناخته می‌شود: یکی تعداد طبقات، به این صورت که هر بنایی که ارتفاع آن از ۲۳ متر بیشتر باشد، ساختمان بلند محسوب می‌شود^[9]، و دیگری با توجه به ویژگی‌ها یا مکان استقرار آن در شهر و منطقه؛ ویژگی مهم این ساختمان‌ها این است که طرح یا عملکرد ساختمان به‌وسیله نمادی از بلندی یا بلندبودن، تحت تأثیر قرار گرفته باشد. برای شهر تهران ساختمان ۱۲ طبقه و بیشتر به‌عنوان ساختمان بلند تعریف می‌شود^[10]. از تعاریف اصلی که در انگلستان برای ساختمان بلندمرتبه مطرح است می‌توان به ساختمان‌هایی که از متوسط تعداد طبقات منطقه همجوار بلندتر هستند و ساختمان‌هایی که خط آسمان منطقه را به طرز چشمگیری تغییر می‌دهند اشاره نمود^[8]. ساختمان‌های بلند از نظر تأثیری که بر سرعت و الگوی وزش باد در بافت شهری دارند نیازمند بررسی هستند^[2]. در واقع کیفیت سرعت باد در محیط تحت تأثیر ارتفاع ساختمان، هندسه بافت شهری، عرض معابر، جهت و سرعت باد قرار دارد^[11]. سرعت باد بیشترین تأثیر را بر شاخص آسایش حرارتی دمای فیزیولوژیک معادل (PET) دارد^[12]. لازم به ذکر است ساختمان‌های بلند به‌علت افزایش سرعت باد در اطراف خود می‌توانند علاوه بر این که موجب عدم آسایش حرارتی شوند شرایط خطرناکی را نیز به وجود آورند^[13, 14]. بررسی تأثیر وجود ساختمان بلندمرتبه در بافت شهری بر الگوی توزیع سرعت باد پیرامون آن مساله مورد سؤال در این پژوهش است. در این راستا میدان امام‌خمینی به‌عنوان نمونه به‌علت وجود ساختمان ۱۴ طبقه مخابرات در جبهه جنوبی آن و بافت کم‌ارتفاع پیرامون آن انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است.

صالحی و همکاران اثر بلندمرتبه‌سازی را بر الگوی جریان باد در منطقه ۲۲ تهران بررسی کردند. نتایج نشان داد به‌دلیل مکان‌یابی نادرست و غیراصولی ساختمان‌های بلند در این منطقه الگوی طبیعی وزش باد تغییر یافته و در نتیجه موجب بروز اثرات ثانویه ناشی از رکود یا تشدید جریان باد شده و کریدر ورودی هوا به شهر تهران را با مشکل جدی مواجه ساخته است^[15]. **عباسپور و بهجو** توزیع آلودگی هوا اطراف و در ارتفاع‌های مختلف یک ساختمان ۲۷ طبقه را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها در اطراف ساختمان و تحلیل نتایج نشان داد غلظت آلاینده‌ها با ارتفاع از سطح زمین رابطه داشته و تا ارتفاع معینی افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد. لزوم توجه به جهت و سرعت باد اطراف ساختمان و ایجاد جریان‌های گردابی و در نتیجه تجمع آلودگی در نقاط مختلف از نتایج این تحقیق به شمار می‌رود^[16]. **جدیدی و حیدری‌نژاد** تحقیقی با هدف بررسی جریان آشفستگی و آسایش پیاده‌رو در پردیس دانشگاه تربیت‌مدرس با استفاده از مدل DES انجام دادند. برای مدل ۳ رژیم مختلف باد شبیه‌سازی و بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده مناطق دارای آسایش و همچنین نواحی پرخطر در مقابل باد برای منطقه مورد بررسی است. به علاوه نتایج نشان‌دهنده ایجاد نواحی پرسرعت در اثر

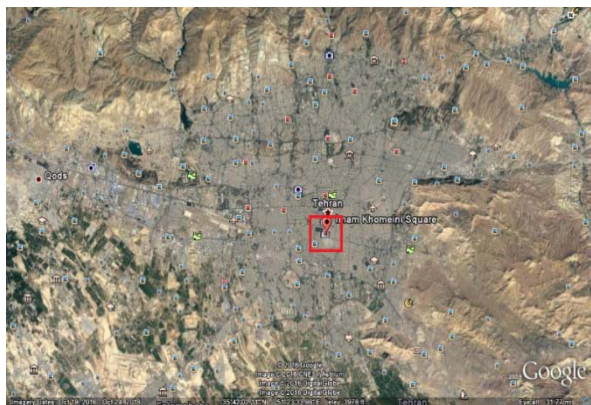
روش آزمایشگاهی وضعیت پایدار مورد بررسی قرار داد. همچنین در این پژوهش ۵ مدل مختلف شبیه‌سازی وضعیت ناپایدار نیز مقایسه و بهترین مدل معرفی شد [21]. یو و همکاران توزیع فشار باد بین دو ساختمان بلند را در ۳ وضعیت قرارگیری نسبت به یکدیگر (موازی، پشت سر هم و مورب) بررسی کرد. در این تحقیق ۶ نسبت پهنا و ۴ نسبت ارتفاع شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد فشار متوسط به‌علت محافظت مفید است، اما حداکثر فشار در نمای جانبی مجاور فضای بین دو ساختمان اتفاق می‌افتد. با افزایش نسبت پهنا و نسبت ارتفاع شدت اثر محافظت و تقویت نیز افزایش می‌یابد. در قرارگیری مورب هنگامی که نسبت ارتفاع کمتر از یک باشد فشار متوسط محلی و حداکثر در نمای جانبی به میزان ۵۳ و ۵۶٪ افزایش می‌یابد. در قرارگیری موازی کانالیزه‌شدن باد بین ساختمان‌ها مشاهده می‌شود [22]. بلوکن و همکاران مطالعات مربوط به دو روش CFD و تونل باد برای بررسی حرکت باد و میزان دقت آنها در سنجش آسایش در سطح عابران اطراف ساختمان را مورد بررسی قرار دادند [13]. همچنین بلوکن و همکاران در مطالعه‌ای دیگر جریان باد را در سطح عابران بین دو ساختمان بلند که به‌صورت عمود بر هم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند بررسی کردند. متغیرهای مورد بررسی عرض معبر، ارتفاع ساختمان و راستای وزش باد بود. نتایج نشان داد سرعت باد با کاهش عرض معابر به‌صورت خطی افزایش می‌یابد [23]. بلوکن و کارملیت وضعیت باد در سطح عابر اطراف یک نمونه ساختمان را در مرحله طراحی مورد بررسی قرار دادند. ابتدا مدل‌های ساده با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری CFD انجام شده، سپس ساختمان طراحی‌شده شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت و نقاط حساس از نظر رفتار باد مشخص شد [14]. هسیه و هانگ به‌منظور کاهش اثر جزایر گرمایی در تایوان اثر کانال‌های هوا در بافت شهری را به‌منظور تهویه و سرمایش بررسی کردند. در این تحقیق ارتباط جهت وزش باد و کانال‌های هوا در شهر تحلیل شد [24]. کیو و همکاران با استفاده از تونل باد جریان باد در سطح عابر اطراف یک ساختمان بلند دارای سکوی زیرین را در کنار ساختمانی کم‌ارتفاع بررسی کردند. در این مطالعه شرایط وزش باد تحت تأثیر ارتفاع سکوی زیر ساختمان، تغییر عرض خیابان و تغییر جهت وزش باد با استفاده از روش آزمایشگاهی تونل باد بررسی شد. نتایج آنها نشان داد افزایش ارتفاع سکو موجب افزایش سرعت باد در اطراف ساختمان می‌شود [11]. /ستاتوپولوس و همکاران در ۵ وضعیت مختلف حرکت باد در اثر برخورد با ساختمان را مورد بررسی قرار دادند: ساختمان مستطیلی با ابعاد مختلف، ساختمان مستطیلی با فضای خالی در زیر آن، دو ساختمان در مقابل یکدیگر در مسیر باد، دو ساختمان در چپ و راست یکدیگر و یک نمونه قرارگیری هفت ساختمان با ابعاد مختلف با هندسه مشخص در کنار یکدیگر. چهار نسبت مختلف برای مستطیل و هشت اندازه برای عرض خیابان بررسی شد. نتایج نشان داد بیشترین سرعت باد ۱/۲ متر بر ثانیه در $L/S=0.4$ (L فاصله ساختمان‌ها، S ضریب تأثیر

قرارگیری ساختمان کم‌ارتفاع در کنار یک ساختمان بلند است [17]. ساختمان‌های بلند از نظر تأثیر بر سیما و منظر شهری نیز در مطالعات مختلفی بررسی شده‌اند [8, 9, 18].

فدل و کارادلیس با استفاده از شبیه‌سازی مدل محاسبات جریان دینامیک (CFD)، منطقه‌ای دانشگاهی در انگلستان را از نظر آسایش عابران براساس سرعت باد بررسی کردند. در این تحقیق جهات و سرعت‌های مختلف باد شبیه‌سازی و تأثیر آن در برخورد با مجموعه ساختمان‌ها و در نتیجه الگوی سرعت باد منطقه بررسی شد. نتایج آنها نشان داد الگوی تغییرات سرعت و حرکت باد بستگی به جهت وزش باد دارد. به علاوه سرعت باد در معابر واگرا بسیار بیشتر از معابر همگرا است [2]. /وزمن و همکاران با استفاده از اندازه‌گیری و روش تونل باد و همچنین شبیه‌سازی عددی به بررسی و پیش‌بینی جریان باد در اثر برخورد با ساختمانی کم‌ارتفاع دارای بام شیبدار پرداختند. در این پژوهش الگوی تلاطم جریان باد در اثر برخورد با ساختمان با تغییر زاویه شیب بام بررسی و تحلیل شد. جریان باد در برخورد با شیب ۱۵ درجه بام از لبه بام دوشاخه شده و منطقه گردابی در جداره رو باد اتفاق می‌افتد [19]. /یو و نیو مدل‌های مختلف شبیه‌سازی باد پیرامون ساختمان را با استفاده از نرم‌افزار CFD با تغییر پارامترهای ورودی به نرم‌افزار بررسی کردند و نتایج مدل‌های مختلف شبیه‌سازی‌شده را با نتایج حاصل از تونل باد مقایسه نموده و بهترین مدل را از لحاظ زمان شبیه‌سازی و دقت محاسبات مشخص کردند [12]. ژانگ و همکاران پراکندگی آلودگی را پیرامون یک ساختمان بلند در هنگ‌کنگ با استفاده از تونل باد و مدل‌سازی کامپیوتری بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول محاسبات عددی در مقایسه با نتایج تونل باد بود. در این مطالعه غلظت آلودگی تحت تأثیر وزش باد اطراف ساختمان بررسی شد. نتایج نشان داد چنانچه انتشار آلودگی در جهت رو به باد باشد پس از برخورد با ساختمان به سمت پایین حرکت کرده و پس از رسیدن به زمین منتشر می‌شود، اما در سمت پشت به باد آلاینده‌ها رو به بالا حرکت می‌کنند. این رفتار نشان‌دهنده تأثیر نحوه برخورد باد با ساختمان در پراکندگی آلاینده‌ها است [6]. اهمیت تأثیر سرعت باد بر آسایش حرارتی محیط خارج در تحقیق /ستاتوپولوس مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه نتایج حاصل از روش آزمایشگاهی تونل باد و شبیه‌سازی کامپیوتری در تحقیقات مختلف مقایسه شد. از نتایج آن بیان اهمیت توجه به پارامترهایی چون دما و رطوبت نسبی، در کنار سرعت باد برای محاسبه شاخص آسایش فضای خارج است [1]. ژانگ و همکاران با هدف پیش‌بینی تأثیر جریان باد بر ساختمان بلند، مدلی را با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری از طریق نرم‌افزار CFD بررسی کرده و نتایج نرم‌افزار را با نتایج تونل باد مقایسه نمودند و در نهایت مدلی پایدار با حداکثر دقت برای پیش‌بینی رفتار باد در برخورد با ساختمان بلند ارائه کردند [20]. تومپاگا جریان باد اطراف ساختمان بلند را با مقایسه دو روش شبیه‌سازی کامپیوتری وضعیت ناپایدار طریق نرم‌افزار CFD و

شرایط ساختمان مخابرات با ارتفاع‌های ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ متر شبیه‌سازی شد. مقاطع افقی برای هر مدل در ارتفاع ۳ متری بررسی و با یکدیگر مقایسه می‌شود.

میدان توپخانه در محدوده منطقه ۱۲ شهرداری تهران جای گرفته است. خیابان فردوسی در شمال غربی، خیابان لاله‌زار و خیابان اکباتان در شمال شرقی، خیابان امیرکبیر و خیابان ناصرخسرو در جنوب شرقی، خیابان باب‌همایون (الماسیه) در جنوب غربی و خیابان امام‌خمینی (خیابان سپه) در غرب، به میدان متصل می‌شوند. با وجودی که میدان در آغاز به گونه یکپارچه طراحی و ساخته شد، اما پس از احداث، دستخوش دگرگونی‌های بسیاری شد. ساختمان‌های بسیاری در پیرامون آن ساخته و سپس ویران شدند. در آغاز دوره رضاشاه در جنوب این میدان نخست ساختمان تلگرافخانه ساخته شد. این بنا نیز بعدها تخریب شد و وزارت پست و تلگراف و تلفن ساختمان ۱۴ طبقه‌ای را به جای آن ساخت که امروزه بزرگ‌ترین ساختمان اطراف میدان است [28] (شکل‌های ۳-۱).



شکل ۱) تصویر هوایی از شهر تهران به همراه موقعیت مورد مطالعاتی



شکل ۲) تصویر هوایی میدان امام‌خمینی به عنوان مورد مطالعاتی

ساختمان، اگر L/S بزرگ‌تر از یک باشد جریان باد اطراف دو ساختمان فصل مشترک ندارند، اگر L/S کمتر از ۰/۱ باشد جریان باد توسط ساختمان‌ها مسدود می‌شود (اتفاق می‌افتد) [25]. جانسن و همکاران آسایش تحت تاثیر جریان باد اطراف ساختمان را برای یک مدل پیچیده (دانشگاه صنعتی آیندا هوون، هلند) بررسی کردند. از اهداف این مطالعه مقایسه معیارهای مختلف و تاکید بر لزوم استانداردسازی بررسی آسایش تحت تاثیر باد بود [26]. تو و لیم وزش باد اطراف ساختمان در سطح عابر را با استفاده از تونل باد بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد چگونه وزش باد در سطح پیاده‌رو تحت تاثیر نحوه قرارگیری ساختمان در کنار ساختمان‌های مشابه است [27].

وجود یک ساختمان که نسبت به بافت پیرامون خود ارتفاع بیشتری دارد سبب تغییراتی در الگوی وزش باد در بافت شهری خواهد شد. در اثر برخورد باد با هر ساختمان بلند چند مساله رخ می‌دهد: ۱) تغییر سرعت باد در نواحی مختلف مانند ایجاد مناطق سکون و در پناه باد به علت کاهش سرعت باد به طوری که ساختمان به صورت بادشکن عمل می‌کند؛ همچنین افزایش سرعت باد و ایجاد مناطقی با سرعتی بیشتر از سرعت بادی که به ساختمان برخورد کرده است. ۲) مناطقی با آشفته‌گی حرکت باد و جریان‌های گردابی. به طور کلی سرعت باد در محیط زیست شهری از منظر شرایط آسایش و پراکندگی آلودگی و جابه‌جایی هوا مهم است. کاهش یا افزایش بیش از حد سرعت باد منجر به عدم آسایش و همچنین کاهش یا عدم وزش باد منجر به سکون ذرات آلاینده‌ها در بافت شهری و در نتیجه منجر به شکل‌گیری جزایر گرمایی می‌شود. بر این اساس به نظر می‌رسد یک ساختمان بلند با تاثیری که بر الگوی سرعت و حرکت باد دارد می‌تواند در بافت پیرامون خود تاثیر مثبت یا منفی داشته باشد. بر اثر رفتار پیچیده باد در برخورد با ساختمان بررسی این مساله نیازمند استفاده از ابزار ویژه و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی است.

روش‌ها

در این پژوهش میدان امام‌خمینی (توپخانه) شهر تهران با استفاده از نرم‌افزار انویمت (Envi-met) به منظور بررسی تاثیر ساختمان بلندمرتبه (۵۰ متر ارتفاع ساختمان بلند، بافت با ارتفاع تقریبی ۱۵ متر) در الگوی جریان باد منطقه در گرم‌ترین روز سال شبیه‌سازی شد. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی بافت شهری و سنجش تاثیر باد، هندسه و دره‌های شهری را دارد. از جمله خروجی‌های این نرم‌افزار مقطع‌های عمودی و افقی از بافت شهری با متغیرهای مختلف از جمله سرعت باد است. در مرحله اول الگوی توزیع سرعت باد پیرامون این ساختمان در مقطع‌های افقی با ارتفاع‌های مختلف از نظر بررسی سرعت باد در لایه‌های عمودی مختلف ارزیابی شد. در مرحله بعد به منظور بررسی تاثیر ارتفاع این ساختمان در الگوی توزیع سرعت باد بافت پیرامون خود، در همان

سرعت باد به‌علت نیروی کششی گیاهان و عناصر دیگر را تعریف می‌کنند [34].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

آشفته‌گی هنگام برخورد جریان در نزدیکی دیوارهای ساختمان و گیاهان قطع می‌شود، اتفاق می‌افتد [34] و با استفاده از مدل E-ε تعریف می‌شود [35]. برای شبیه‌سازی این فرآیند یک جریان گردابی (آشفته‌گی بسته) ۱/۵ که براساس کار یا Ma و Re [36] معادله اضافی برای تلاطم محلی (E) و نرخ اتلاف آن (ε) به مدل اضافه می‌شوند، مورد نیاز است [34]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + QE - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\varepsilon}{E} Th - c_2 \frac{\varepsilon^2}{E} + Q_\varepsilon$$

شرایط Pr و Th، تولید و اتلاف انرژی تلاطم به‌علت برش باد و لایه‌بندی‌های حرارتی را تعریف می‌کند. Q_ε و Q_E شرایط منبع محلی برای تولید تلاطم و اتلاف در پوشش گیاهی است. تولید مکانیکی Pr با استفاده از تغییر شکل کننده سه‌بعدی از میدان باد محلی پارامتر بندی می‌شود:

$$Pr = K_m \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \text{ with } i, j = 1, 2, 3$$

برای محاسبه شناوری از معادله زیر تبعیت می‌نماید:

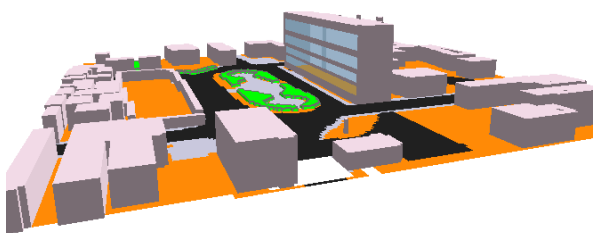
$$Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} Kh \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

الته $Th > 0$ تحت حالت پایدار، نادیده گرفته شده است.

مشخصات مدل: سطحی به ابعاد ۳۳۶×۳۳۶ متر با مرکزیت میدان امام‌خیمینی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). برای شبیه‌سازی این بافت تعداد گریدهای مدل ۳۰×۱۶۸×۱۶۸ است. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار در جدول ۱ بیان شده اند (جدول ۱؛ شکل‌های ۴-۷).

جدول ۱) شرایط شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار Envi-met 4

تاریخ شبیه‌سازی	۱۳۹۵/۰۴/۲۵ (۲۰۱۷/۰۷/۱۵)
دوره زمانی شبیه‌سازی	۱۲ ساعت
فاصله گریدها	۲ متری افقی، ۲ متری عمودی (از ارتفاع ۱۰ متری به‌صورت تلسکوپی با درصد ۱۰)
سرعت باد	۴ متر بر ثانیه
جهت باد (شمال=۰ و ۹۰=E)	۱۳۵
رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری	۴۵٪
دمای هوا	۳۱ درجه سانتی‌گراد



شکل ۴) مدل سه‌بعدی ساخته‌شده برای ارتفاع واقعی ساختمان



شکل ۳) میدان امام‌خیمینی [29]

نرم‌افزار انویمت توسط مایکل بروس از سال ۱۹۹۵ در دانشگاه ماینس آلمان توسعه و گسترش یافت. این نرم‌افزار شبیه‌ساز سه‌بعدی خرده‌اقلیم دارای قابلیت مدل‌سازی ساختمان، گیاه، سطوح زمین، شرایط اقلیمی، فرم ساختمان‌ها و جهت‌گیری است. این نرم‌افزار از هر دو محاسبات دینامیک سیالات مانند جریان هوا و آشفته‌گی و فرآیندهای ترمودینامیکی در حال وقوع روی سطح زمین، روی دیوارها، بام‌ها و گیاهان استفاده می‌کند [30]. مدل‌سازی انویمت براساس مدل سه‌بعدی محاسبات جریان دینامیک (CFD) است [31]. برای هر سلول شبکه مدل و هر گام زمانی مدل CFD معادلات غیرهیدروستاتیک ناویر-استوکس را حل می‌کند [32].

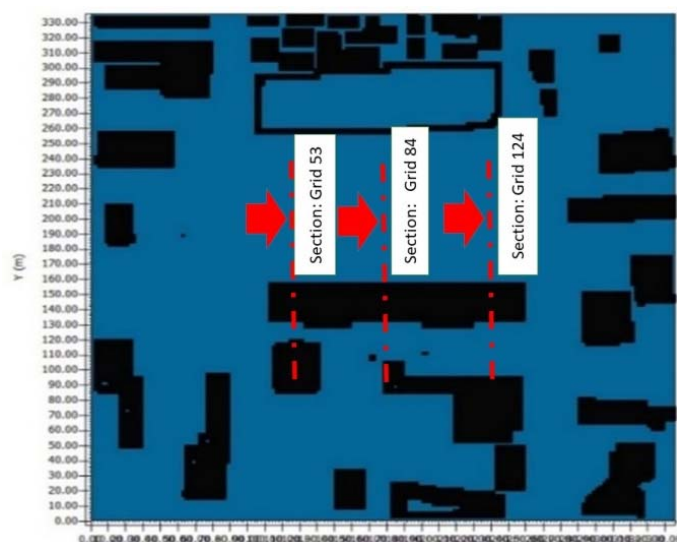
مفهوم اساسی و پایه برای تعریف جریان آشفته‌گی در مدل سه‌بعدی براساس معادلات غیرهیدروستاتیک تراکم‌ناپذیر ناویر-استوکس بیان می‌شود (معادلات 1a، 1b و 1c) [33, 34].

$$(1a) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + F(v - v_g) - S$$

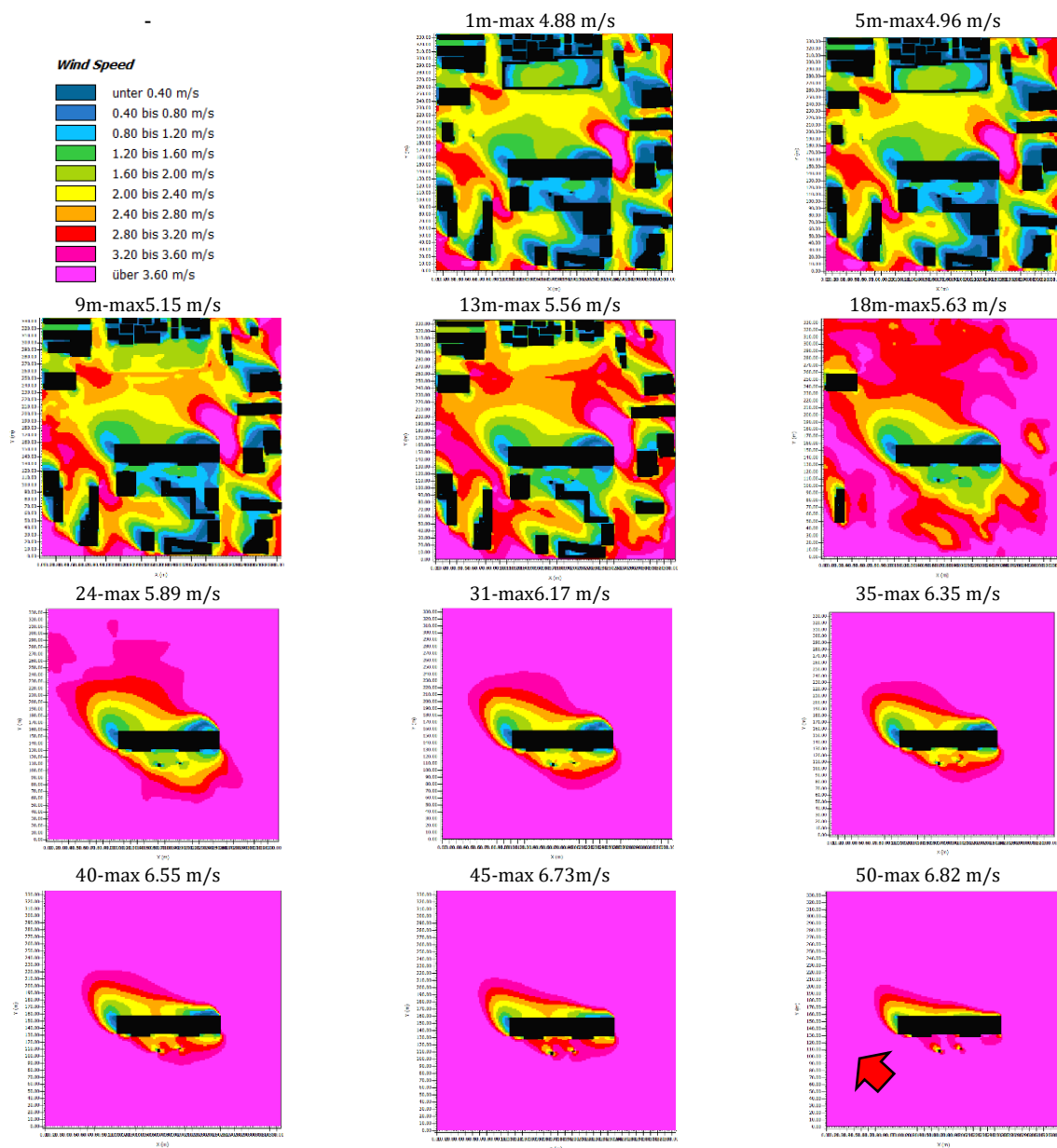
$$(1b) \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + F(u - u_g) - S_v$$

$$(1c) \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = - \frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w$$

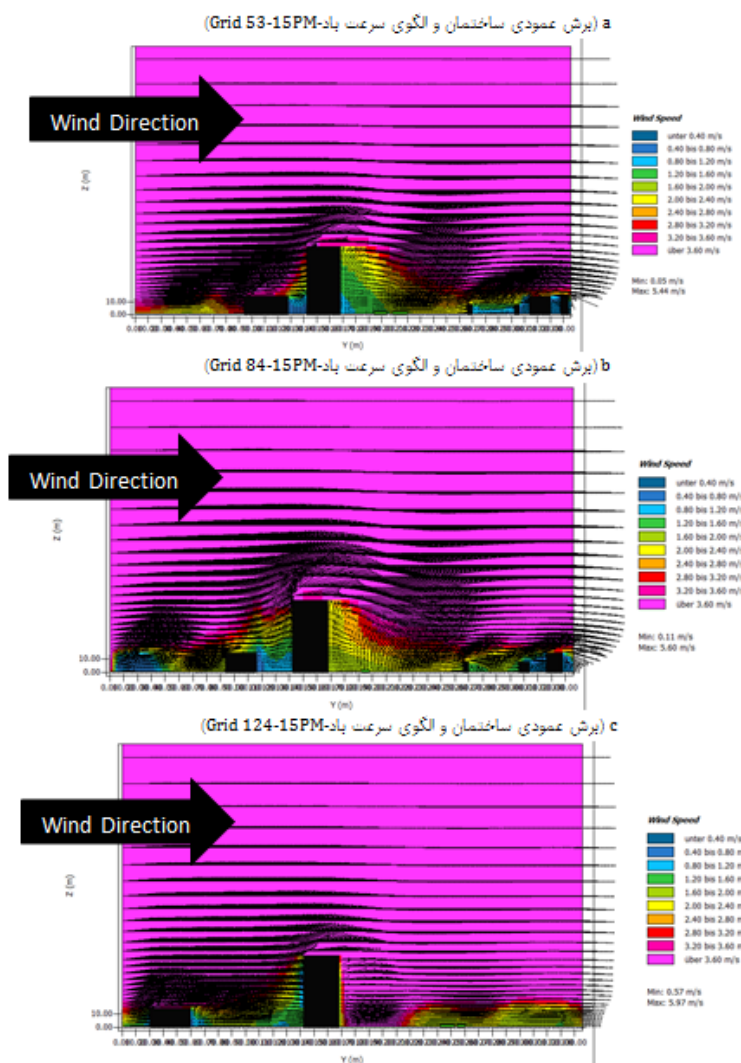
در اینجا $F = (10^4 \text{ sec}^{-1})$ پارامتر کوریولیس است، p' آشفته‌گی فشار محلی و θ پتانسیل دمایی در سطح Z است. دمای مرجع θ_{ref} باید در شرایط مقیاس متوسط (کوچک‌تر از شرایط سینوپتیک) بیان و به‌وسیله مدل یک‌بعدی موازی با مدل اصلی ارائه شود [34]. به‌دلیل این که جریان در انویمت تراکم‌ناپذیر است، چگالی هوای p برای سیال تغییر نمی‌کند و از معادله ناویر-استوکس تراکم‌پذیر اصلی حذف شده و معادلات به معادله (۲) کاهش می‌یابد [33]. این معادله برای هر گام زمانی به‌منظور حفظ جرم مدل اجرا می‌شود. توجه داشته باشید که برای حفظ فضا، جابه‌جایی افقی و انتشار هوا در حالت سه‌بعدی در جمع انیشتن نوشته شده است S_u, S_v و S_w . ($u_i = u, v, w; i = 1, 2, 3$)



شکل ۵) مکان گزیده‌های مربوط به برش‌های عمودی



شکل ۶) نقشه‌های الگوی سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف منطقه شبیه‌سازی شده



شکل ۷) برش‌های عمودی در گریدهای مختلف مدل

یافته‌ها

الف- بررسی نتایج شبیه‌سازی وضع موجود: ساختمان با ارتفاع واقعی و در شرایط موجود شبیه‌سازی شده است. الگوی سرعت باد پیرامون ساختمان در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع از سطح زمین همان طور که بر سرعت باد افزوده می‌شود، الگوی سرعت باد نیز تغییر می‌کند. به علت عدم وجود ساختمان‌های پیرامون ساختمان بلند در ارتفاع‌های بالاتر آشفتگی و نقاط سکون باد خصوصاً در منطقه رو به باد ساختمان کاهش یافته و تنها ساختمان مخابرات در الگوی وزش باد تاثیرگذار است، چنانچه از ارتفاع ۱۵ متری به بعد شاهد این مساله هستیم. نکته قابل توجه راستای برخورد باد با ساختمان و نیز نحوه قرارگیری ساختمان‌های نزدیک به ساختمان بلندمرتبه است. در مقاطع افقی (شکل ۶) می‌بینیم که در ارتفاع‌های نزدیک به سطح زمین (کمتر از ۱۵ متر) به علت وجود ساختمان‌های پشت ساختمان بلند نقاطی با سرعت باد بسیار پایین و در واقع مناطق دارای سکون به وجود آمده است، در حالی که در مقطع‌های ۱۵ متر به بالا این محدوده

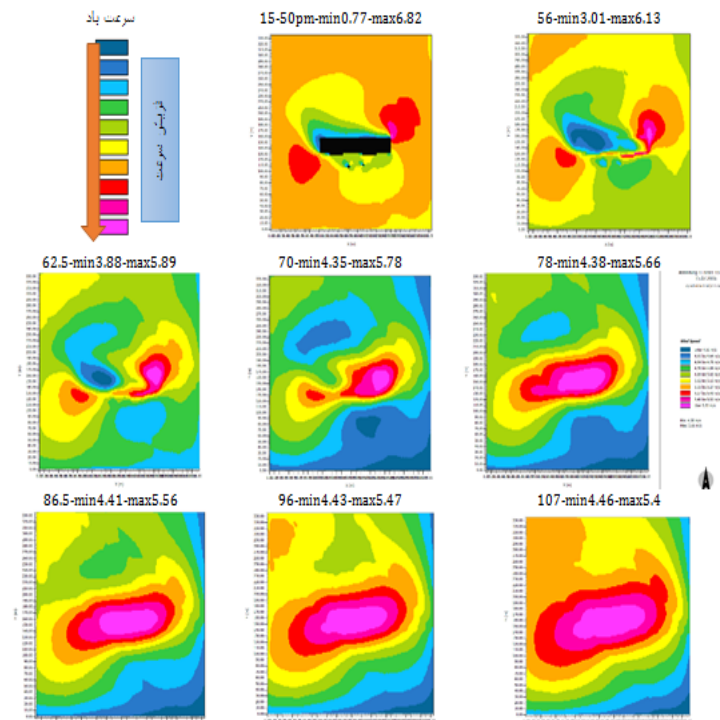
کاهش یافته است. تاثیر راستای باد نسبت به ساختمان در الگوی جریان باد با سه مقطع عمودی (شکل ۷) در گریدهای مختلف مشخص می‌شود. چنانچه می‌بینیم جریان باد در میانه ساختمان و در منطقه پشت به باد دچار آشفتگی شدیدتری نسبت به لبه‌های کناری ساختمان است. محدوده سکون در ضلع پشت به باد نیز تحت تاثیر راستای برخورد باد با ساختمان است. به علاوه در مقاطع عمودی مشاهده می‌شود دامنه عمودی تاثیر ساختمان بر الگوی وزش باد در میانه ساختمان بیشتر از لبه‌های ساختمان است. به طور کلی نتایج حاکی از اهمیت قرارگیری ساختمان‌های مجاور یک ساختمان بلند به علاوه جهت و راستای وزش باد نسبت به ساختمان است، که تاثیر چشمگیری در الگوی توزیع سرعت باد پیرامون آن خواهد داشت.

ب- الگوی وزش باد در ارتفاع بالاتر از ساختمان: بررسی الگوی وزش باد در ارتفاع بالاتر از ارتفاع ساختمان نشان‌دهنده عدم یکنواختی سرعت باد است که تحت تاثیر برخورد باد با ساختمان بلندمرتبه به وجود آمده است. نتایج نشان می‌دهد ساختمان که در مقابل باد قرار گرفته است مانند بادشکن مسیر حرکت باد را

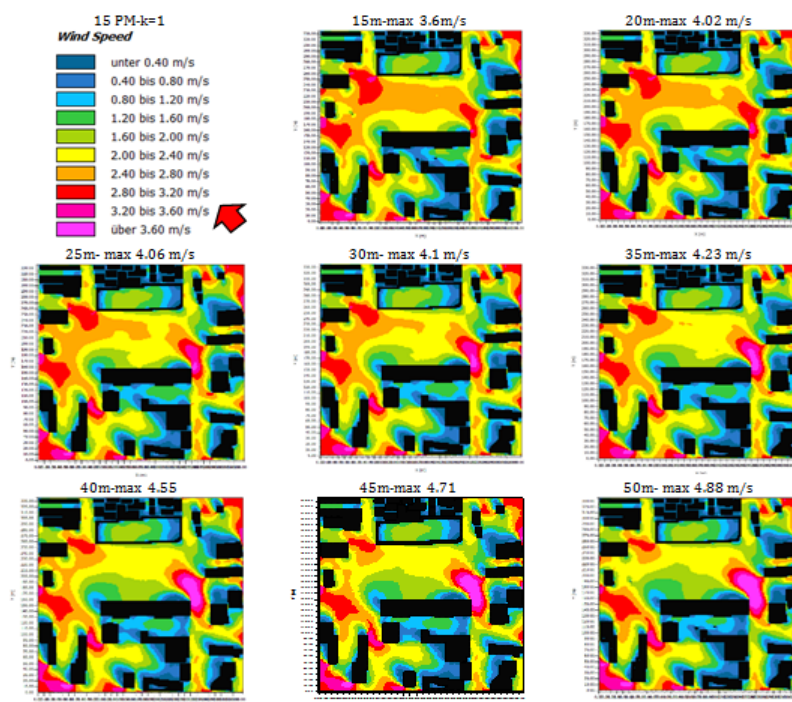
مورد بررسی ساختمان با ارتفاع‌های مختلف (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ متر) نیز شبیه‌سازی شده و برش‌های افقی در ارتفاع ۳ متری برای هر کدام از مدل‌ها در ساعت ۱۵ عصر (اوج گرما و حداکثر دمای محیط) و ارتفاع ۳ متری از سطح زمین و همچنین الگوی توزیع عمودی باد در مقاطع عمودی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

تغییر می‌دهد. طبق شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که ساختمان در ارتفاع‌های بالاتر از ارتفاع خود نیز بر وزش باد تاثیرگذار است. می‌توان چنین عنوان کرد که ساختمان بلند می‌تواند به‌عنوان ایجادکننده تلاطم در لایه‌های بالاتر از خود تاثیرگذار باشد (شکل ۸).

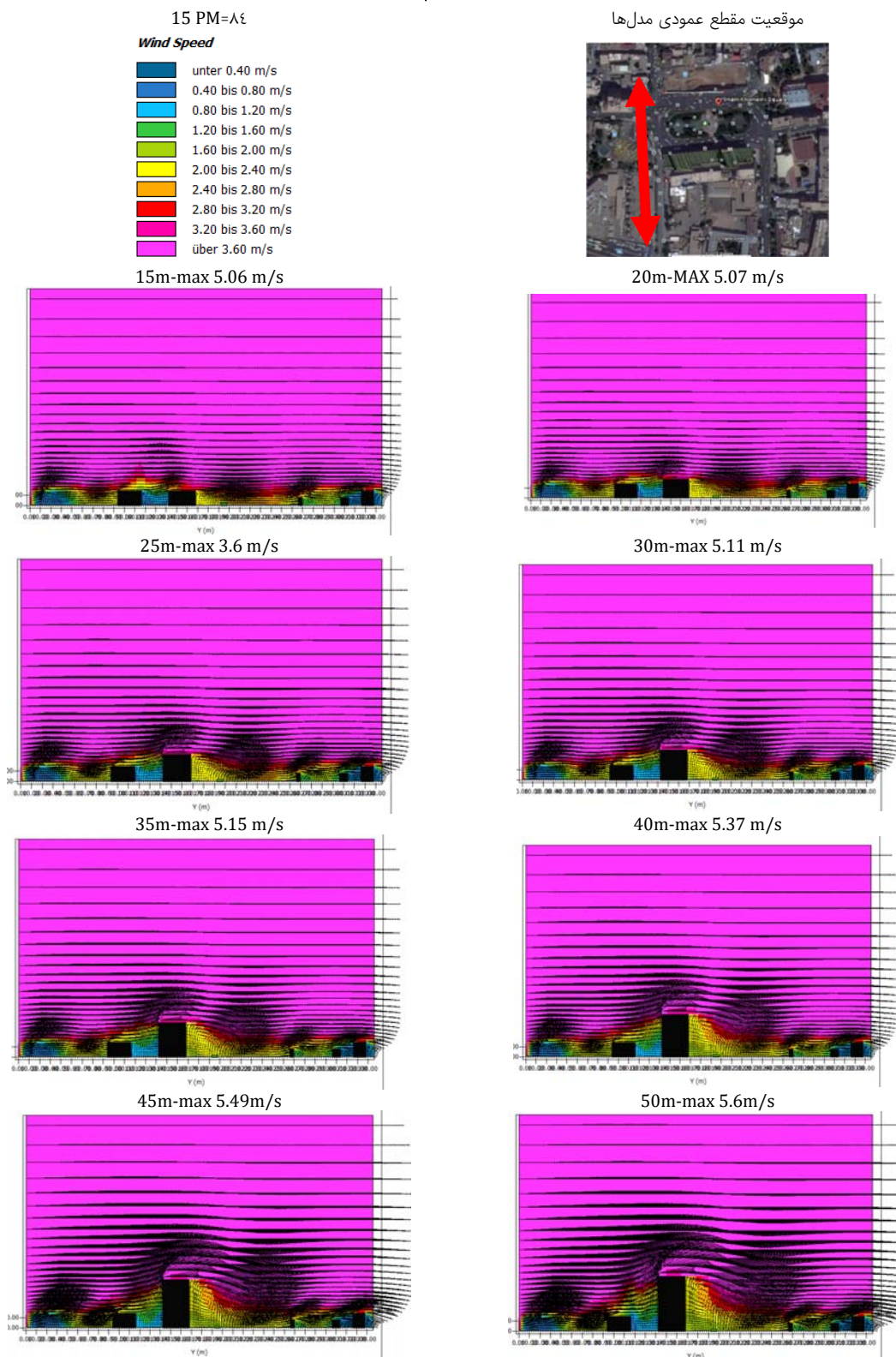
ج- بررسی ساختمان مخابرات در ارتفاع‌های مختلف: برای بررسی تاثیر ارتفاع ساختمان مخابرات بر الگوی وزش باد در بافت شهری



شکل ۸) الگوی وزش باد در ارتفاع‌های بالاتر از ساختمان



شکل ۹) مقایسه مقاطع افقی در ارتفاع ۳ متری مدل‌ها



شکل ۱۰) مقاطع افقی (گرید ۸۴) مدل‌های با ارتفاع مختلف

همان طور که نتایج نشان می‌دهد ساختمان در مقابل باد مانند بادشکن عمل می‌کند؛ هر چه ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد، تأثیر ساختمان روی سرعت و مسیر حرکت باد بیشتر است. از ارتفاع ۲۵ متر تا ۵۰ متر شاهد ایجاد حرکت باد پس از برخورد با ساختمان به شکل یک قله هستیم که هر چه ارتفاع افزایش

د- برش‌های عمودی از نمونه موردی: به منظور بررسی تأثیر ارتفاع ساختمان در لایه‌های مختلف هوا این برش‌ها دیاگرام‌های گویایی از الگوی توزیع باد در اثر برخورد با ساختمان ارایه می‌دهند. در شکل ۱۰ برای ارتفاع‌های مختلف ساختمان برش عمودی در میانه ساختمان (گرید ۸۴) برای ساعت ۱۵ عصر نشان داده شده است.

مانع از تهویه بافت مقابل ساختمان و فضای میدان شده است. چنانچه می‌بینیم در صورتی که ارتفاع این ساختمان در حدود ارتفاع متوسط بافت منطقه بود جریان هوا در بافت شکل گرفته و تهویه انجام می‌شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از زحمات همه همکاران فصلنامه بالارزش نقش جهان بابت مطالعه و بررسی مقاله ارایه‌شده سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از نظرات کارشناسی داوران گرامی که در ارتقای کیفی مقاله ارایه‌شده موثر است، پیشاپیش قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالعه حاضر تاکنون در هیچ نشریه‌ای به فارسی یا هر زبان دیگری منتشر نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: جمال خداکرمی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ شهلا نوری (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ رضا منصوری (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۰٪)

منابع مالی: کلیه منابع مالی و هزینه‌های مرتبط با این پژوهش و مقاله مستخرج از آن توسط هر دو نویسنده تقبل شده و در این زمینه موردی توسط نویسندگان گزارش نمی‌شود.

منابع

- 1- Stathopoulos T. Pedestrian level winds and outdoor human comfort. J Wind Eng Ind Aerodyn. 2006;94(11):769-80.
- 2- van Hooff T, and Blocken B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO₂ gas dispersion from a semi-enclosed stadium. Build Environ. 2013;61:1-17.
- 3- Iqbal QMZ, Chan ALS. Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation. Build Environ. 2016;101:45-63.
- 4- Lu C, Deng QH, Liu WW, Huang BL, Shi LZ. Characteristics of ventilation coefficient and its impact on urban air pollution. J Cent South Univ. 2012;19:615-22.
- 5- Mao J, Gao N. The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: a review. Build Environ. 2015;94(Part 2):516-31.
- 6- Zhang Y, Kwok KCS, Liu XP, Niu JL. Characteristics of air pollutant dispersion around a high-rise building. Environ Pollut. 2015;204:280-8.
- 7- Di Sabatino S, Solazzo E, Paradisi P, Britter R. A simple model for spatially-averaged wind profiles within and above an urban canopy. Boundary Layer Meteorol. 2008;127:131-51.
- 8- Azizi MM, Motavaseli MM. Strategic revision of urban services context of local management of Iran, emphasizing the urban waste; case study: Mashhad metropolitan. Int J Urban Rural Manag. 2012;10(30):91-112. [Persian]
- 9- Sadrolgharavi TS, Mahdavinnejad MJ. The form of residential buildings on local winds: air pollution reduction. Int J Architect Urban Dev. 2018;8(1):53-64.
- 10- Mahdavinnejad MJ, Salehnejad H, Moradi N. An ENVI-met simulation study on influence of urban vegetation

می‌یابد ارتفاع قله نیز بیشتر شده و بر لایه‌های بالاتر تاثیر می‌گذارد. به علاوه از ارتفاع ۳۵ متر جریان گردابی جلوی ساختمان در بخش پشت به باد شکل می‌گیرد.

ج- بررسی تغییرات ارتفاع ساختمان بلند: نتایج نشان‌دهنده اهمیت و تاثیر بسزای ارتفاع ساختمان در الگوی وزش باد پیرامون آن است؛ چنانچه از مقایسه شرایط ایجادشده تحت تاثیر ساختمان‌های با ارتفاع متفاوت در همان موقعیت ساختمان واقعی منجر به رفتار متفاوت باد در بافت و پیرامون ساختمان شده است. با افزایش ارتفاع بیشترین تغییرات در ضلع پشت به باد ساختمان اتفاق می‌افتد. هر چه ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد شاهد کاهش سرعت باد در جلوی ساختمان هستیم. می‌توان گفت ساختمان مانند دیواری بادشکن مانع از حرکت باد با سرعت بالا در میدان شده و ناحیه سکون در جلوی ساختمان گسترش می‌یابد. با توجه به مقطع‌های افقی در ارتفاع ۳ متری مشخص می‌شود برخورد باد با گوشه سمت راست ساختمان موجب تشدید سرعت باد در این ناحیه شده است. هر چه ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد علاوه بر افزایش محدوده تشدیدشده حداکثر سرعت باد که در اثر برخورد با ساختمان ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد. چنانچه در ارتفاع ۱۵ متر حداکثر سرعت در این ناحیه ۳/۶ متر بر ثانیه و در ارتفاع ۵۰ متری به ۴/۸۸ متر بر ثانیه می‌رسد.

بحث و نتیجه‌گیری

طبق نتایج این پژوهش چند مساله مطرح می‌شود: اهمیت بررسی رفتار باد در برخورد با ساختمان، تاثیر ساختمان‌های بلندمرتبه در بافت پیرامون خود، تاثیر جهت و راستای باد در برخورد با ساختمان در شکل‌گیری الگوی توزیع وزش باد، تاثیر قرارگیری ساختمان‌های کم‌ارتفاع در کنار ساختمان‌های بلند بر الگوی وزش باد. با بررسی الگوی وزش باد در سطوح مختلف از سطح زمین پیرامون یک ساختمان بلند مشاهده می‌شود هر چه ارتفاع از سطح زمین افزایش یابد آشفستگی حاصل از برخورد باد با ساختمان کاهش یافته، اما به‌طور کلی سرعت باد افزایش می‌یابد. به‌طوری که میزان حداقل و حداکثر سرعت باد افزایش می‌یابند. نکته قابل ذکر در برخورد باد با یک ساختمان بلند هدایت باد توسط ساختمان به‌صورت قله‌ای شکل است که در مقطع عمودی از میانه ساختمان (مقطع عمودی گرید ۸۴) مشخص است. به علاوه در مقاطع عمودی مربوط به ساختمان دارای ارتفاع نیز این مساله مشخص است که هر چه ارتفاع ساختمان افزایش می‌یابد ارتفاع این قله نیز افزایش پیدا می‌کند. با توجه به مقاطع افقی مربوط به ارتفاع‌های بالاتر از ساختمان می‌توان چنین نتیجه گرفت که یک ساختمان بلند بر تلاطم لایه مرزی بالای بافت شهری می‌تواند تاثیرگذار باشد. به علاوه نتایج نشان می‌دهد ساختمان مخابرات در میدان امام‌خمینی به‌صورت یک دیوار در مقابل وزش بادهای جنوب غرب تا جنوب شرق که عموماً در فصل گرم سال می‌وزند

2008;21(4):280-7.

24- Hsieh CM, Huang HC. Mitigating urban heat islands: a method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. *Comput Environ Urban Syst*. 2016;57:130-43.

25- Stathopoulos T, Wu H, Bédard C. Wind environment around buildings: a knowledge-based approach. *J Wind Eng Ind Aerodynam*. 1992;44(1-3):2377-88.

26- Janssen WD, Blocken B, van Hooff T. Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. *Build Environ*. 2013;59:547-62.

27- To AP, Lam KM. Evaluation of pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor. *Wind Eng Ind Aerodynam*. 1995;54-55:527-41.

28- Wikipedia. Imam Khomeini Square (Tehran) [Internet]. Tehran: Wikipedia; 2009 [cited 219 May 27]. Available from: <https://bit.ly/2CyGqbD>. [Persian]

29- Mahdavinnejad MJ, Ghaedi A, Ghasempourabadi M, Ghaedi H. The role of vernacular architecture in design of green sidewalk (case study: Iran, Shushtar). *Appl Mech Mater*. 2013; 260-261:65-8.

30- Rosheidat A, Bryan H. Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment. In: *Proceedings of Fourth National Conference of IBPSA-USA*; 2010 11-13 Aug; New York, New York City.

31- Maggiotto G, Buccolieri R, Santo MA, Leo LS, Di Sabatino S. Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: The Lecce (IT) case study. *Environ Model Software*. 2014;60:69-83.

32- Paas B, Schneider C. A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmospher Environ*. 2016;145:392-404.

33- Taleghani M, Kleerekoper L, Tenpierik M, van den Dobbelsteen A. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Build Environ*. 2015;83:65-78.

34- Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ Model Software*. 1998;13(3-4):373-84.

35- Wania A, Bruse M, Blond N, Weber C. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *J Environ Manag*. 2012;94(1):91-101.

36- Yamada T, Mellor G. A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data. *J Atmospher Sci*. 1975;32(12):2309-29.

congestion on pollution dispersion. *Asian J Water Environ. Pollut*. 2018;15(2):187-94.

11- Kuo CY, Tzeng CT, Ho MC, Lai CM. Wind tunnel studies of a pedestrian-level wind environment in a street canyon between a high-rise building with a podium and low-level attached houses. *Energies*. 2015;8(10):10942-57.

12- Liu J, Niu J. CFD simulation of the wind environment around an isolated high-rise building: an evaluation of SRANS, LES and DES models. *Build Environ*. 2016;96:91-106.

13- Blocken B, Stathopoulos T, van Beeck JPAJ. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Build Environ*. 2016;100:50-81.

14- Blocken B, Carmeliet J. Pedestrian wind conditions at outdoor platforms in a high-rise apartment building: generic sub-configuration validation, wind comfort assessment and uncertainty issues. *Wind Struct*. 2008;11(1):51-70.

15- Salehi E, Yavari AR, Vakili F, Parivar P. Assessing the impact of urban high-rise building on wind flow performance, case study: Tehran, District 22. *J Urban Ecol Res*. 2016;7(1):67-80. [Persian]

16- Abbaspour M, Behjo A. Air pollution concentration around tall building. *J Environ Stud*. 2000;26(25):1-10.

17- Hamzehnezhad M, Rabani M, Torabi T. Wind's role in human health in Islamic medicine approach and its impact on locating and structure of Iranian traditional cities. *Naqsh-e-Jahan*. 2015;5(1):43-57. [Persian]

18- Azizi MM. Assessment of the physical-spatial effects of tower construction in Tehran's Farmanieh-Kameraniyah Neighborhoods. *Honar-ha-ye Ziba*. 1999;(4-5):33-46. [Persian]

19- Ozmen Y, Baydar E, van Beeck JPAJ. Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles. *Build Environ*. 2016;95:63-74.

20- Zhang Y, Habashi WG, Khurram RA. Predicting wind-induced vibrations of high-rise buildings using unsteady CFD and modal analysis. *J Wind Eng Ind Aerodynam*. 2015;136:165-79.

21- Tominaga Y. Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics. *Wind Eng Ind Aerodynam*. 2015;142:93-103.

22- Yu XF, Xie ZN, Zhu JB, Gu M. Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings. *Wind Eng Ind Aerodynam*. 2015;142:188-97.

23- Blocken B, Stathopoulos T, Carmeliet J. Wind environmental conditions in passages between two long narrow perpendicular buildings. *Aerospace Eng*.