

بررسی تأثیرات الگوهای استقرار تراکم (حاصل از تغییر در سطح اشغال و ارتفاع ساختمان) بر جابه‌جایی هوای حوزه‌های شهری^۱

شهرام دلفانی^۴

دانشیار مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، وزارت راه و شهرسازی

سیده حمیده موسوی^۲

محمد رضا حافظی^۳

دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

مرجان السادات نعمتی مهر^۵

استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی

دریافت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۹ تیر ۱۳۹۷

کلیدواژگان: تراکم، سطح اشغال، جابه‌جایی هوا، ایرودینامیک شهری، الگوی پراکنش آلودگی، ولنجک تهران.

چکیده

ویژگی توده‌های ساختمانی، نحوه قراردهی آن‌ها، و تراکم نقش مهمی در الگوی جریان هوای شهری، سکون هوا، و تجمع آلاینده‌ها در تراز پایینی اتمسفر دارد. در این پژوهش با هدف دستیابی به الگوی مطلوب استقرار تراکم‌های برابر، با ثابت نگه داشتن تراکم منطقه در حد چشم‌انداز، اثر افزایش ارتفاع و کاهش سطح اشغال به صورت هم‌زمان در مقیاس محلی در منطقه ولنجک تهران مقایسه شده است. روش انجام این پژوهش با توجه به ماهیت میان‌رشته‌ای آن، روشی ترکیبی است، جمع‌آوری اطلاعات به روش جمع‌آوری منابع کتابخانه‌ای، شبیه‌سازی به روش دینامیک سیالات محاسباتی، و مدل‌سازی بافت شهری مورد مطالعه بر اساس داده‌های شهرداری و برداشت از وضع موجود انجام پذیرفته است. تراکم خالص و ثابت ۲۷٪ در سه مدل ساختمانی (ساختمان‌های ۷ طبقه با سطح اشغال ۳۸٪، ساختمان‌های ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲٪، و برج‌های ۲۰ طبقه با سطح اشغال ۱۳٪) توزیع شده است. بلوک شهری مورد مطالعه با بلوک‌های مشابه احاطه شده و جریان هوا بر

فراز مدل‌های مذکور با سرعت باد مرجع $4/5 \text{ m/s}$ در چهار جهت شمالی، غربی، شمال غربی و شمال شرقی، بدون در نظر گرفتن لایه‌بندی حرارتی اتمسفر، با نرم‌افزار انسیس فلونت و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شده است. بررسی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که، در الگوی ساختمان‌های ۷ طبقه در ۳۸٪ مکان-زمان‌ها و در الگوی ساختمان‌های ۱۲ طبقه در ۴۴٪ و در الگوی برجی شکل در ۶۵٪ مکان-زمان‌ها تهویه طبیعی صورت می‌گیرد. پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع تنها با کاهش قابل توجه میزان سطح اشغال جریان هوا را بهبود می‌بخشد. این مهم نیز وابسته به عوامل متعددی، از جمله جهت‌گیری بافت شهری، ویژگی‌های هندسی بنا، و مشخصات باد آن منطقه است و به منظور به دست آوردن مدل بهینه برای هر منطقه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی و یا تجربی ضروری است.

۱. مقدمه

از چند دهه پیش تا به امروزه مطالعات متعددی در زمینه تأثیر معماری و شهرسازی بر محیط زیست شهری، انجام شده است. برخی از این مطالعات در حوزه باد بوده و نتایج آن حاکی از تأثیر مستقیم ساخت

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نگارنده اول در رشته فناوری معماری با عنوان بررسی ساختار بلوک‌های شهری از منظر تهویه و تجمع آلودگی هوا است که به راهنمایی نگارندگان دوم و سوم و مشاوره نگارنده چهارم در بهمن‌ماه ۱۳۹۶ در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه شهید بهشتی دفاع شده است.

۲. نویسنده مسئول، کارشناس ارشد فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی
se.moosavi@mail.sbu.ac.ir
3. mr-hafezi@sbu.ac.ir
4. delfani@bhrc.ac.ir
5. m_nemati@mehrsbu.ac.ir



پرسش‌های تحقیق

۱. در تراکم‌های برابر ساختمانی، آیا فرم استقرار تراکم بر رژیم جریان هوا پیرامون ساختمان تأثیر می‌گذارد؟
۲. آیا الگوی بلندمرتبه الگوی بهتری به لحاظ برقراری جریانات هوایی در حوزه‌های شهری است؟

عارضه جدید بر جریان هوای شهری است. هرچند این تغییرات در مقیاس محلی و نسبتاً کوچک رخ می‌دهد اما به دلیل فراهم کردن موجبات آسایش یا سلب آسایش ساکنین منطقه، بااهمیت و درخور توجه هستند. در حالت ایدئال، سرعت باد پیرامون ساختمان‌ها باید به حدی باشد که در عین برقراری آسایش فیزیکی عابرین، موجب رکود هوا نیز نشود. چرا که وزش باد در محیط‌های شهری عامل اصلی جابه‌جایی ذرات آلاینده محسوب می‌شود.

بیش از ۸۰٪ جمعیت شهرها در معرض هوای آلوده هستند. پیش‌بینی می‌شود جمعیت شهری کشور تا ۲۰ سال آینده از مرز ۷۴'۰۰۰'۰۰۰ نفر بگذرد. طبق آمار نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، نرخ جمعیت شهری در ایران ۷۴٪ و استان تهران، با بالاترین میزان تراکم جمعیتی، ۱۶/۶٪ از جمعیت کشور را در خود دارد که ۹۳/۹٪ این جمعیت شهرنشین هستند. آلودگی هوا در شهر تهران به یکی از مشکلات بزرگ فراروی مردم و مسئولین تبدیل شده است که بدون شک بدون برنامه‌ریزی صحیح و اتخاذ راهکارهای کارشناسانه ممکن است اثرات جبران‌ناپذیری بر سلامت شهروندان و محیط زیست شهر به جای گذارد. بررسی وضعیت موجود بیانگر آن است که تا دستیابی به هوای پاک راهی طولانی در پیش است و کیفیت هوای شهر تهران با استانداردهای جهانی و ملی فاصله زیادی دارد.

غلظت آلاینده‌ها در محیط‌های شهری با توازن میان انتشار آلاینده‌ها و قدرت اتمسفر در حرکت و پراکندگی آن‌ها تعیین می‌گردد. به طور کلی، زمانی که توانایی اتمسفر برای پراکندگی آلاینده‌ها به صورت افقی و عمودی افزایش یابد، علاوه بر کاهش غلظت آلاینده‌ها، از واکنش‌های شیمیایی، که خود مسبب تولید آلاینده‌های جدید می‌شوند، نیز کاسته می‌شود. باد، در هر دو مقیاس منطقه‌ای و محلی، در پخش و پراکندگی آلاینده‌ها در شهر تهران نقش بسزایی دارد. هرچند آلودگی هوا در مقیاس شهر عموماً در نتیجه پیدایش جو پرفشار بر منطقه در مقیاسی بسیار فراتر از ابعاد ساختمان‌ها است، ولی بهبود جریان هوا در مقیاس محلی بر جریان هوای منطقه نیز بدون تأثیر نخواهد بود. بادهای محلی، که به نوسانات روزانه دما و توپوگرافی منطقه بستگی دارند، در صورت فقدان سیستم‌های هواشناسی قوی می‌توانند در انتقال افقی ذرات آلاینده مؤثر باشند^۶. از آنجا که ساخت‌وسازها در مقیاس محلی می‌تواند موجب کاهش سرعت باد محلی شود، با رعایت و شناخت فاکتورهای مربوطه به

6. N. Antoniou, et al, "CFD and Wind-tunnel Analysis of Outdoor Ventilation in a Real Compact Heterogeneous Urban Area: Evaluation Using 'Air Delay'".
 ۷. پایگاه اطلاع‌رسانی مرکز آمار ایران
<https://www.amar.org.ir>
 ۸. مریم نادری و دیگران، گزارش کنترل کیفیت هوای تهران.



9. N. Zhang, et al, "A Microscale Model for Air Pollutant Dispersion Simulation in Urban Areas: Presentation of the Model and Performance over a Single Building". p. 184.
10. S. Reiter, "Validation Process for CFD Simulations of Wind Around Buildings".
11. Computational Fluid Dynamics (CFD) ۱۲. نک:
- M. Lateb, et al, "On the Use of Numerical Modelling for Near-field Pollutant Dispersion in Urban Environments A Review"; B. Blocken, et al, "Application of CFD in Building Performance Simulation for the Outdoor Environment: an Overview".
13. A. Hagishima, et al, "Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries", p. 315.
14. N. Isyumov, et al, "Wind in Cities: Effects on Pedestrians and the Dispersion of Ground Level Pollutants", p. 319.
۱۵. نک: حسین بحرینی و دیگران، «کاربرد مطالعات هواشناسی آلودگی هوا در طراحی شهری (نمونه خاص شهر تهران)».
16. poduim

نرم افزار انسیس فلونت، بدون در نظر گرفتن لایه بندی حرارتی اتمسفر، شبیه سازی شده است. به منظور انتخاب محدوده مورد مطالعه، شطرنجی و منظم بودن بافت شهری، تنوع در ارتفاع ساختمان های منطقه، و کاربری زمین ها مورد توجه بوده است. منطقه فوق با بافتی شطرنجی، شامل گونه های متفاوتی از ساختمان های ویلایی تا برج ۲۰ طبقه و کاربری منطقه نیز عمدتاً مسکونی است.

۲. پیشینه پژوهش

مرور مطالعات متعدد در زمینه تأثیر ساخت و ساز بر تهویه و پراکنش آلودگی هوا حاکی از تأثیر مستقیم ساختمان سازی بر جریان هوا در مقیاس خرد- اقلیم و محلی است.^{۱۳} همواره در ارزیابی سرعت باد پیرامون ساختمان ها تأکید بر داشتن فضایی برای ایمنی عابران پیاده در مقابل بادهای تند است، در حالی که کاهش سرعت باد برای فعالیت های مستمر و طولانی مدت مطلوب است و کاهش بیش از حد آن در محیط شهری سبب راکد شدن هوای منطقه خواهد شد که این خود زمینه ساز مشکلات بعدی می گردد. جریان هوا در خیابان های یک منطقه شهری برای تهویه هوای آن منطقه و تضمین عدم تجمع آلودگی های مختلف، از جمله دود حاصل از تردد وسایل نقلیه، امری ضروری است.^{۱۴} بحرینی و همکارانش در یک مطالعه تحقیقی بیان می دارند که با اصلاحاتی در شکل شهر ممکن است شرایط جوی (جهت باد و سرعت) در یک فضای شهری تغییر و نهایتاً منجر به ایجاد هوایی با کیفیت بهتر در محیط شهری گردد.^{۱۵} به عقیده یوان و همکارانش برای حداکثر نفوذ باد به فضاهای باز شهری، شکل گیری خیابان ها باید در راستای وزش باد غالب یا با حداکثر ۳۰ درجه چرخش نسبت به آن راستا باشد. میزان تهویه طبیعی به تخلخل و فضای باز بین ساختمان ها وابسته است، به طوری که در برج ها ایجاد فضای باز بین سکو^{۱۶} و ساختمان برج و همچنین سکوهای

هنگام طراحی ساختمان ها و توسعه شهرها می توان شرایط را در مقیاس خرد- اقلیم بهبود بخشید و با به حداقل رساندن تأثیرات منفی ساختمان سازی بر تهویه هوای محوطه های شهری، شرایط آسایش را در فضای باز بهتر گرداند. هرچند با مدل سازی باد، می توان وضعیت جریان در بستر شهر را پیش بینی کرد، متأسفانه این مطالعات اغلب در مدل سازی های شهری نادیده گرفته می شود.

اندازه گیری مشخصات رژیم جریان باد به دو صورت تجربی و عددی انجام می پذیرد. رایج ترین شیوه تجربی بررسی نمونه در تونل باد لایه مرزی و متداول ترین شیوه در تحلیل عددی استفاده از نرم افزارهای شبیه ساز رفتار سیالات است.^{۱۷} به دلیل پیشرفت سریع در سخت افزارهای رایانه ای، امروزه به طور فزاینده ای از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی^{۱۱} استفاده می شود و به روش قابل قبولی برای شبیه سازی رژیم جریان و پراکنش آلاینده ها تبدیل شده است. همچنین مطالعات زیادی نشان داده است که با این شیوه می توان مشخصات کیفی جریان هوا و پراکنش آلودگی را نیز مدل سازی کرد.^{۱۸}

در این پژوهش قسمتی از یک منطقه شهری، با کاربری عموماً مسکونی و کالبد شطرنجی، در منطقه ولنجک تهران با ابعاد تقریبی ۶۵۰ در ۸۰۰ متر مربع برای مطالعه در نظر گرفته شده است. تخمین زده شده که با جای گذاری زمین های بایر منطقه با ساختمان هایی مطابق با قوانین و ضوابط جاری، مساحت خالص مسکونی به ۱'۰۸۹'۲۴۶ متر مربع برسد. با توزیع مساحت ساختمانی چشم انداز، در ساختمان های ۷ طبقه با سطح اشغال ۳۸/۵٪، ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲/۵٪، و برج های ۲۰ طبقه با سطح اشغال ۱۳/۵٪ با تراکم ثابت ۲۷۰٪، میزان فراوانی هوای راکد در سه نمونه سنجیده شده است. الگوی جریان هوا با سرعت باد مبنای ۴/۵ متر بر ثانیه در تراز ۱۰ متری، از جهت شمال، غرب، شمال غرب، و شمال شرق بر نمونه های مذکور، به شیوه دینامیک محاسباتی سیالات در

پلکانی باعث هدایت هوا به تراز عابر پیاده می‌شود و تهویه را بهبود می‌بخشد.^{۱۷} نتایج پژوهش ایزوموو نیز نشان می‌دهد که بی‌نظمی در ارتفاع ساختمان‌ها سبب افزایش سرعت باد در تراز عابر پیاده و افزایش میزان تهویه در محیط‌های شهری می‌شود و بیشترین تأثیر در بافت‌هایی با ساختمان‌هایی با نسبت طول به عرض ۳/۵ مشاهده شده است. در این تحقیق که تأثیر حضور یک ساختمان بلند به ارتفاع ۲۹۷ متر و با ابعاد ۶۱×۹۹ متر مربع در ۵ بافت متنوع بررسی شده است، نتایج این‌گونه است: اضافه کردن ساختمان بلند، در همه بافت‌ها، با ارتفاع ثابت و متغیر، سبب افزایش سرعت باد در تراز عابر پیاده گردیده است؛ ولی بیشترین میزان تغییر در بستر با نسبت ارتفاع به عرض ۲/۵ و ارتفاع متغیر حاصل شده است.^{۱۸} جمع‌بندی مطالعات نشان می‌دهد که افزودن یک ساختمان بلند جریان هوا را تا چندین بلوک اطراف آن تحت تأثیر قرار می‌دهد و هرچه اختلاف ارتفاع ساختمان بیشتر و بستر کمتر باشد، تأثیرش بر رژیم هوا نیز

کم‌رنگ‌تر می‌شود. لی‌او و همکارانش نیز به پیش‌بینی نرخ جابه‌جایی هوا و آلاینده‌ها در یک محیط شهری، در حالی که نسبت ابعادی ارتفاع ساختمان‌ها به عرض خیابان متغیر است، با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش این نسبت ابعادی سبب سکون ذرات آلاینده و کاهش نرخ تبادل هوا می‌شود، به طوری که نرخ تبادل هوا در بافتی با نسبت ابعادی ۲/۰، ۵۰٪ کمتر از مدل با نسبت ابعادی از ۱/۰ و ۰/۵ است.^{۱۹} نتایج تحقیقات پناگیوتو و همکارانش نیز مبین این مطلب است که سطح اشغال ساختمانی بیشتر از ۵۵٪ از نفوذ هوا در محیط شهری جلوگیری می‌کند و همچنین سرعت هوا در محیط مصنوع ناهمگن نسبت به محیطی با هندسه مکعبی همسان می‌تواند تا بیش از دو برابر افزایش یابد.^{۲۰} (ت ۱).

در پژوهش‌های پیشین اکثراً ساختگاهی فرضی برای بلوک‌ها در نظر گرفته شده است. نوآوری این مطالعه از این

۱۷. نک:

C. Yuan, et al, "Building Porosity for Better Urban Ventilation in High-density Cities - A Computational Parametric Study".
18. Isyumov, et al, ibid.

۱۹. نک:

C. Liu, et al, "On the Prediction of Air and Pollutant Exchange Rates in Street Canyons of Different Aspect Ratios Using Large-eddy Simulation".

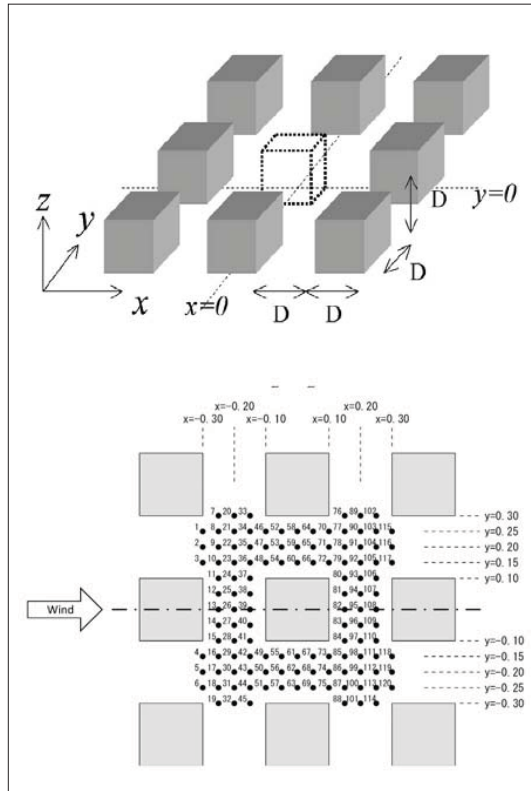
۲۰. نک:

I, Panagiotou, et al., "City Breathability as Quantified by the Exchange Velocity and its Spatial Variation in Real Inhomogeneous Urban Geometries".

پژوهش‌ها	فاکتورهای مورد بررسی	روش‌ها	نتایج
Isyumov, et al. "Wind in Cities: Effects on Pedestrians and...".	تأثیر بی‌نظمی در ارتفاع ساختمان‌ها بر جریان هوا	آزمایشگاهی	بی‌نظمی در ارتفاع ساختمان‌ها سبب افزایش سرعت باد در تراز عابر پیاده می‌شود.
بحرینی و همکاران، «کاربرد مطالعات هواشناسی آلودگی هوا در طراحی شهری».	اقلیم و شکل شهر	منابع کتابخانه‌ای، آزمایشگاهی، اطلاعات ماهواره‌ای	اصلاحات در شکل شهر شرایط جوی را بهبود می‌بخشد.
Liu, C., et al. "On the Prediction of Air and...".	بررسی نسبت ابعادی ارتفاع ساختمان‌ها به عرض خیابان	دینامیک سیالات محاسباتی	افزایش این نسبت سبب سکون هوا می‌شود.
Yuan, et al. "Building Porosity for Better Urban Ventilation in High-density Cities".	مورفولوژی ساختمان‌ها بر تهویه هوای شهری	دینامیک سیالات محاسباتی، آزمایشگاهی	کاهش سطح اشغال سبب افزایش تهویه طبیعی می‌شود. ایجاد فضای باز بین سکو و برج نیز نقش مهمی در جابه‌جایی هوا دارد. راه‌های عبور هوا در توده‌های ساختمانی تا حد امکان باید به تراز عابر پیاده نزدیک باشند.
Panagioto, et al. "City Breathability as Quantified by the Exchange Velocity and...".	بررسی تأثیر تراکم بر جریان هوا	دینامیک سیالات محاسباتی	تراکم بیش از ۵۵٪، از نفوذ هوا در محیط شهری جلوگیری می‌کند.

ت ۱. مروری بر پژوهش‌های پیشین، تدوین: نگارندگان.

حدوداً ۱'۰۲۵'۰۰۰ متر مربع و کاربری اراضی منطقه عمدتاً مسکونی است.



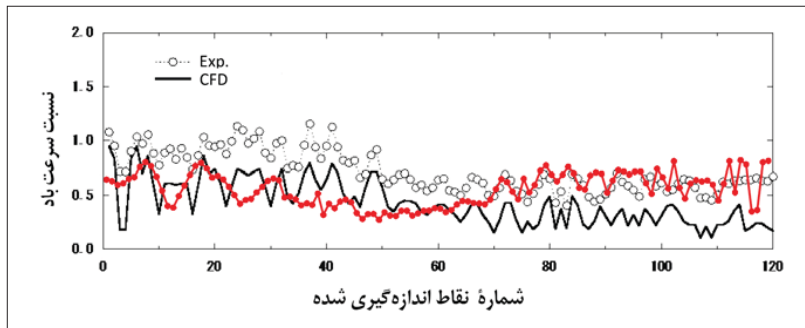
۲۱. نک: محمدحسن شجاعی فرد، مقدمه‌ای بر جریان‌های آشفتنه و مدل‌سازی آن:

- Yuan, et al, ibid; Blocken, et al, "CFD Simulation for

ت ۲ (بالا). مدل مرجع AIJ. برای مقایسه داده‌های تونل باد و پژوهشگر؛ سمت پایین: نقاط سنجش سرعت، مأخذ:

AIJ (Architectural Institute of Japan) Benchmarks for Validation of CFD Simulations Applied to Pedestrian Wind Environment around Buildings, (2016).

ت ۳ (پایین). مقایسه داده‌های حاصل از تونل باد مرجع و داده‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام‌شده توسط پژوهشگر (نمودار خط-نقطه حاصل شبیه‌سازی پژوهشگران است).



منظر است که اطلاعات هواشناسی، وضعیت بلوک‌ها، و ویژگی ساختمان‌ها بر اساس قوانین جاری و وضع موجود است.

بررسی رژیم جریان باد از طریق آزمایش‌های تجربی مانند تونل باد و مطالعات میدانی در محل و تحلیل‌های عددی امکان‌پذیر است. از میان مدل‌های توربولانسی RANS می‌توان مدل k-ε را نام برد که در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی تا کنون، نسبت به دیگر مدل‌های توربولانسی، بیشتر مورد توجه بوده است و هم‌اکنون نزد محققین مدل استاندارد و مرجع به‌شمار می‌آید^{۲۱}، مهم‌ترین قدم در هر شبیه‌سازی سیالاتی، اعتبارسنجی و مقایسه نتایج حاصل‌شده با داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی است. برای تأیید داده‌های حاصل از این پژوهش، داده‌های حاصل از آزمون تونل باد^{۲۲} بر روی یک مدل ساختمانی (ت ۲) در وضعیت کاملاً مشابه در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی و، با تنظیمات مد نظر، ویژگی‌های رفتار سیال در حالت تجربی و عددی مقایسه و بررسی شده است.

در نقاط مشخص‌شده در «ت ۲- سمت پایین» میزان سرعت در ارتفاع ۲ سانتی‌متری از سطح اندازه‌گیری شده و نسبت سرعت اندازه‌گیری‌شده به سرعت مبدأ در نقاط مد نظر در «ت ۳» به صورت نموداری نشان داده شده است.

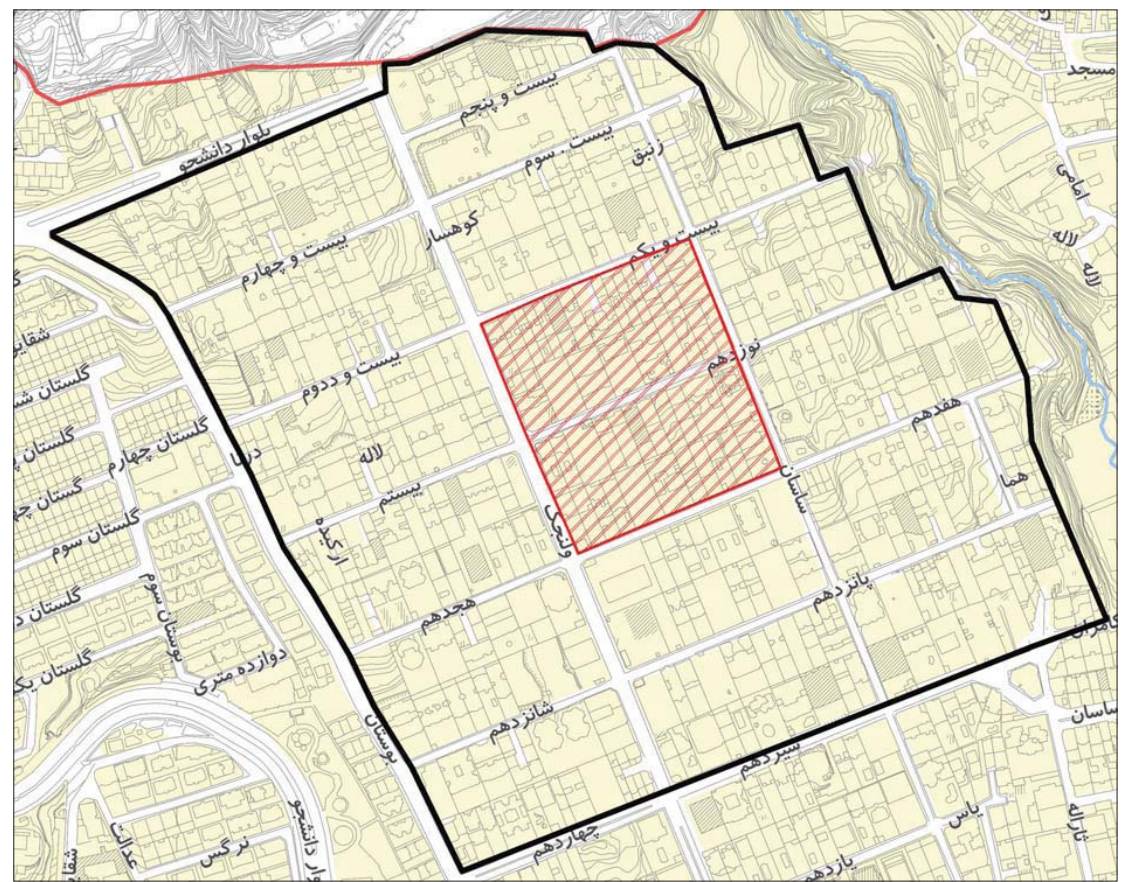
۳. مورد پژوهش ۳.۱. منطقه مورد پژوهش

محدوده مورد مطالعه در منطقه ولنجک شهر تهران واقع شده است (ت ۴). این محدوده بین خیابان‌های ولنجک و سامان در راستای شمالی-جنوبی و خیابان‌های هفدهم و بیست و یکم در راستای شرقی-غربی قرار دارد. در مطالعات جریان باد شهری باید حداقل یک بلوک شهری پیرامون محدوده هدف را مدل‌سازی کرد^{۲۳}. برای رعایت این اصل، کل محدوده مدل‌سازی‌شده دارای ۱۷ بلوک شهری با مساحت تقریبی ۴۸۳'۰۰۰ متر مربع است. زیربنای کل ساختمان‌های موجود

۲.۳. روش پژوهش

و نحوه قرارگیری ساختمان‌ها در هر پلاک نیز بر اساس وضع موجود منطقه پیش‌بینی شده است. به دلیل عریض بودن بلوک‌های منطقه، کشیدگی بلوک‌ها شمالی-جنوبی است. در نمونه شماره ۲ و ۳ نیز فاصله ساختمان‌ها بر اساس استاندارد^{۳۴} معادل بزرگ‌ترین ضلع ساختمان یا حداقل ۲۵ متر محاسبه شده است. ورودی جریان هوا از چهار جهت شمال، شمال غرب، شمال شرق، و غرب و سرعت باد مبنا ۴/۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در نظر گرفته شده است. در مطالعات

در یک بلوک شهری با تراکم‌های ساختمانی برابر می‌توان فرم‌های کالبدی متفاوتی را طراحی کرد، که در واقع از تغییر در سطح اشغال و ارتفاع توده ساختمانی حاصل می‌شود. بدین منظور، در «ت ۵» برای منطقه فوق سه الگوی ساختمانی سازی، با توجه به مساحت زیربنای خالص مسکونی و تراکم برابر، ارائه شده است، در هر سه الگو میزان تراکم ساختمانی ثابت و برابر با ۲۷۰٪، نسبت ابعادی ساختمان‌ها ثابت و ۱ به ۲/۵



→ Pedestrian Wind Comfort and Wind Safety in Urban Areas: General Decision Framework and Case Study for the Eindhoven University Campus"; W. Janssen, et al, "Use of CFD Simulations to Improve the Pedestrian Wind Comfort around a High-rise Building in a Complex Urban Area". - Yuan and NJ, "Building porosity for better urban ventilation in high-density cities - A computational parametric study"

نک: ۲۲

AIJ, *Benchmarks for Validation of CFD Simulations Applied to Pedestrian Wind Environment around Buildings.*

نک: ۲۳

COST, *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of flows in the Urban Environment.*

نک: ۲۴

Tall Building Design Guidelines.

ت ۴. محدوده مورد مطالعه.

در نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین تأثیر مثبت کاهش ارتفاع و کاهش سطح اشغال بر جریان هوا در حوزه شهری به اثبات رسیده است، ولی در این پژوهش برای پاسخ‌گویی به نیاز امروزی، تأثیر هم‌زمان کاهش سطح اشغال و افزایش ارتفاع به صورت هم‌زمان مطالعه می‌گردد.

در الگوی شماره یک، $۱'۲۴۶'۰۸۹$ متر مربع زیربنای چشم‌انداز در ساختمان‌هایی ۷ طبقه با سطح اشغال ۳۸/۵٪ و با ارتفاع ۲۱ متر توزیع گردیده است (ت ۶).

در الگوی شماره ۲، زیربنای مذکور در ساختمان‌های ۱۲ طبقه (ت ۷) و در الگوی شماره ۳ در برج‌های ۲۰ طبقه (ت ۸) تقسیم شده، بنا بر این سطح اشغال به ترتیب به ۲۲/۵٪ و ۱۳/۵٪ کاهش و ارتفاع ساختمان‌ها به تبع آن افزایش یافته است. ارتفاع ساختمان‌ها نیز به ترتیب ۴۰ و ۷۰ متر هستند.

۳.۳. تعیین دامنه و شبکه‌بندی

دامنه حل رژیم جریان نیز بر اساس ارتفاع بلندترین ساختمان طبق «ت ۹» تعیین شده است. در مدل‌سازی دامنه مورد مطالعه، کافی است که کمترین جزئیات در مدل لحاظ شود. همچنین توصیه می‌شود که موانع بیشتر از ۳٪ محدود محاسباتی را اشغال نکنند^{۲۵}.

در مدل‌سازی این پژوهش، حداقل اندازه سلول در نزدیکی منطقه مورد نظر ۰/۵ متر در نظر گرفته شده، ابعاد سلول‌ها با ضریب رشد ۱/۲ افزایش می‌یابد و نسبت ابعادی اضلاع سلول‌ها نیز ۱/۰۵ است. تعداد سلول‌ها در هر مدل حدوداً ۱۵ میلیون است.

۳.۴. معادلات حاکم بر پژوهش

نیمرخ توزیع باد، انرژی جنبشی توربولانس^{۲۶}، و اتلاف انرژی توربولانس^{۲۷}، زمانی که سرعت باد مرجع در ارتفاع ۱۰ متر برابر ۴/۵ متر بر ثانیه است، با روابط زیر محاسبه می‌شود. برای محاسبه پروفیل باد منطقه بر اساس استاندارد^{۲۸}، ضریب بدون

هواشناسی و ایرودینامیک شهری، ارتفاع ۱۰ متری ارتفاع مبنا و استاندارد است. سرعت مبنا بر اساس فراوانی وزش باد در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه، (ایستگاه هواشناسی شمیرانات) در ۱۰ سال گذشته تعیین گردیده است.



۲۵. نک:

COST, ibid; Y. Tominagaa, et al, "AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings".

۲۶. میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم، واحد آن m^2/s^2 است.

۲۷. میزانی از انرژی توربولانسی است که با شکستن گردابه‌ها به گردابه‌های کوچک‌تر تا نهایتاً تبدیل آن به گرما توسط نیروی ویسکوزیته از سیال گرفته می‌شود و واحد آن m^2/s^3 است.

ت ۵. فرم‌های ساختمانی متفاوت در تراکم‌های ساختمانی برابر، مأخذ:

UTF, Towards an Urban Renaissance.

باد در ارتفاع Z ، V_{z10} سرعت در ارتفاع ده متری (Z_{10}) و α معیاری از ناهمواری زمین است.

سرعت اصطکاکی یا سرعت برشی که در آن تأثیر نیروی برشی دیواره در مقادیر سرعت لحاظ شده است از «رابطه ۲» محاسبه می‌گردد.

$$u_* = \frac{\kappa U_z}{\ln\left(\frac{Z + Z_0}{Z_0}\right)} \quad (2)$$

انرژی جنبشی توربولانس، از طریق «رابطه ۳» و اتلاف انرژی توربولانسی با «رابطه ۴» محاسبه می‌گردد.

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_u}} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(Z + Z_0)} \quad (4)$$

در روابط فوق C_u مقداری ثابت در روش $k-\varepsilon$ و 0.09 در نظر گرفته می‌شود. u_* سرعت اصطکاکی^{۳۰} مربوط به پروفایل لگاریتمی سرعت باد و K ضریب ثابت فن کارمن (0.42)، Z_0 طول زبری سطح و U_z سرعت در ارتفاع Z است.^{۳۱}

در این پژوهش معیار سرعت خروج از حالت رکود هوا، سرعت $1/7$ متر بر ثانیه در ارتفاع 10 متری از سطح زمین، در نظر گرفته شده است. مرجع اختصاص این سرعت جدول بوفور^{۳۲} است. این جدول معیاری برای سنجش تأثیر مکانیکی سرعت هوا در تراز عابر پیاده است و تا به امروز از معتبرترین مراجع در این حوزه تلقی می‌گردد.^{۳۳} بر طبق مطالعات بوفور، باد تا سرعت یک متر بر ثانیه در تراز $1/75$ متری از سطح زمین، باد ساکن تلقی می‌شود. با استفاده از «رابطه ۱» سرعت یک متر بر ثانیه در تراز $1/75$ متری معادل سرعت $1/7 \text{ m/s}$ در تراز 10 متر است.

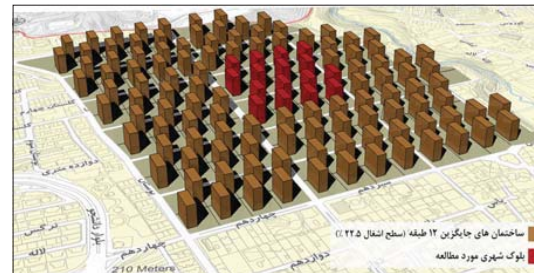
برای مقایسه اطلاعات نمونه‌های معرفی شده، شبکه نقطه‌ای با تعداد 100×100 نقطه بر روی منطقه هدف (محدوده نمایش

بعد α ، که معیاری از ناهمواری زمین است، 0.33 و میزان زبری سطح (Z_0) $m=0.7$ در نظر گرفته شده است.

از طریق «رابطه ۱»^{۳۴} سرعت باد در ارتفاع مورد نظر، محاسبه می‌گردد.

$$\frac{V_z}{V_{z10}} = \left(\frac{Z}{Z_{10}}\right)^\alpha \quad (1)$$

در این رابطه Z ارتفاع مشخص از سطح زمین و V_z سرعت



نک: ۲۸. ASCE, *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*.

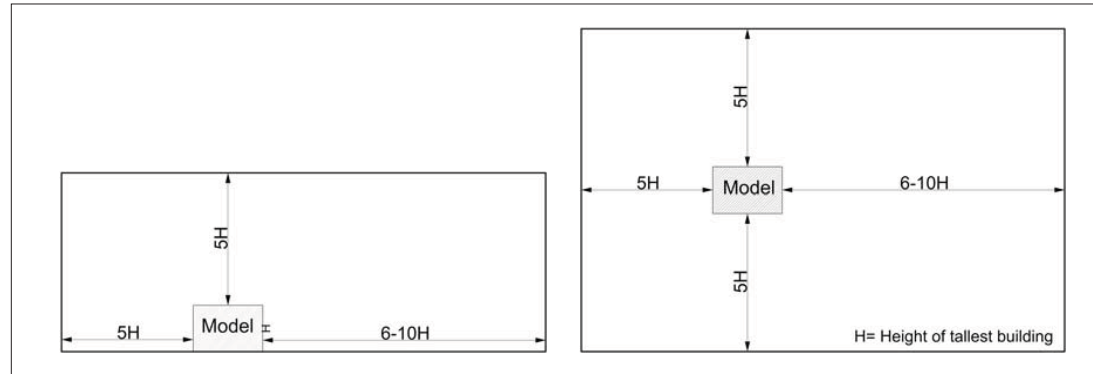
نک: ۲۹. ASCE, *ibid*; M. Tahbaz, "The Estimation of the Wind Speed in Urban Areas".
30. Friction Velocity

نک: ۳۱. Janssen, et al, *ibid*; COST, *ibid*; Tominagaa et al, *ibid*.

نک: ۳۲. Charalambos Baniotopoulos, et al, *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures*.

نک: ۳۳. M. Ratcliff, et al, "Comparison of Pedestrian Wind Acceptability Criteria"; ASCE, *Urban Aerodynamics, Wind Engineering for Urban Planners and Designers*.

ت ۶ (بالا). نمونه شماره یک: ساختمان‌های ۷ طبقه با ارتفاع ۲۱ متر و سطح اشغال $38/5\%$ ؛ به کوشش نگارندگان.
ت ۷ (میان). نمونه شماره دو: ساختمان‌های ۱۲ طبقه با ارتفاع ۴۰ متر و سطح اشغال $22/5\%$ ؛ به کوشش نگارندگان.
ت ۸ (پایین). نمونه شماره سه: ساختمان‌های ۲۰ طبقه با ارتفاع ۷۰ متر و سطح اشغال $13/5\%$ ؛ به کوشش نگارندگان.



مختلف ساختمانی با هم قابل قیاس خواهد بود. شاخص مکان-زمان به این دلیل تعریف شده است که به طور مثال اگر سرعت باد در الگوی در مقابل باد شمالی-جنوبی در ۷۰٪ نقاط به بالاتر از سرعت آستانه رکود هوا رسد، نمی‌توان این الگو را الگوی بهینه قلمداد کرد، چرا که فراوانی زمانی وزش باد از جهت شمالی-جنوبی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در این تصمیم دارد. خاطرنشان می‌گردد که این شاخص برای اولین بار در این پژوهش تعریف و استفاده شده است.

۴. نتایج

در «ت ۱۱ و ۱۲ و ۱۳» کانتور سرعت مطلق باد در ارتفاع ۱۰ متری به هنگام وزش باد از جهت شمال در سه نمونه ساختمانی نمایش داده شده است.^{۳۴} نواحی مشخص شده با رنگ تیره (محدوده سرعت تا یک متر بر ثانیه)، بیانگر نواحی دنباله یا رکود باد^{۳۵} هستند. تشکیل این گردابه‌ها در جهت پشت به باد ساختمان‌ها از سرعت باد به مقدار قابل توجهی می‌کاهد. در «ت ۱۱» تعدد توده‌های ساختمانی سبب پیدایش ناحیه‌های رکود یا دنباله زیادی شده است.

در «ت ۱۲» نسبت به نمونه پیشین، کاهش سطح اشغال سبب ایجاد محدوده رکود باد کمتری شده است، ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر قدر به مرکز مدل‌سازی و خروجی

داده‌شده میانی، با رنگ متفاوت در «ت ۶ و ۷ و ۸» در ارتفاع ۱۰ متر که شاخص بین‌المللی بررسی ویژگی‌های باد است، در نظر گرفته شده و مقدار سرعت در هر نقطه ثبت گردیده است. در شبکه نقطه مذکور، نقاط موجود در فضای باز با سرعت بیشتر از ۱/۷ m/s از نقاط با سرعت کمتر از ۱/۷ m/s متر بر ثانیه تفکیک شده و درصد فراوانی آن محاسبه گردیده است. به دلیل اینکه اهمیت وزش باد در هر جهت متفاوت است، ضریب اهمیتی مطابق «ت ۱۰» به نتایج بالا اعمال شده است. درصد فراوانی وزش باد بر اساس اطلاعات نمودار گلباد نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی (ایستگاه شمیرانات) به منطقه مورد نظر طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ به دست آمده است و بیانگر میزان اهمیت وزش باد از هر جهت در محدوده مورد مطالعه است.

با ضرب درصد فراوانی نقاط با سرعت‌های مشخص در ضریب اهمیت بیان شده به شاخصی با عنوان شاخص مکان-زمان دست خواهیم یافت که مقادیر آن در فرم‌های

جهت وزش باد	احتمال وزش باد
شمالی-جنوبی	۳۸٪
شرقی-غربی	۱۴٪
شمال غربی-جنوب شرقی	۸٪
شمال شرقی-جنوب غربی	۴۰٪

۳۴. به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله، ارائه تمام شکل و کانتورهای پژوهش امکان‌پذیر نیست و به نشان دادن نتایج حاصله در «ت ۱۶ و ۱۷» بسنده شده است.

35. Wake

ت ۹ (بالا). تعیین محدوده‌های حل رژیم جریان-پلان و نمای جانبی- H ارتفاع بلندترین ساختمان است، به کوشش: نگارندگان؛ مأخذ:

COST, ibid; Y. Tominagaa, et al, "AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around buildings."

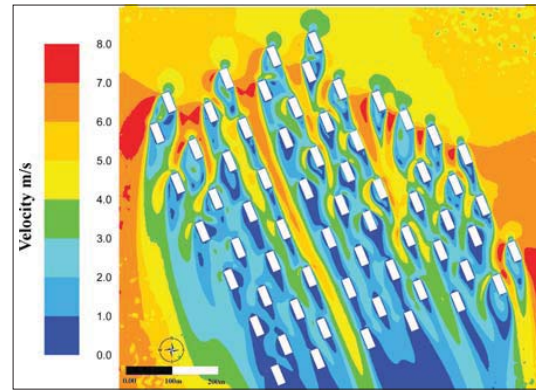
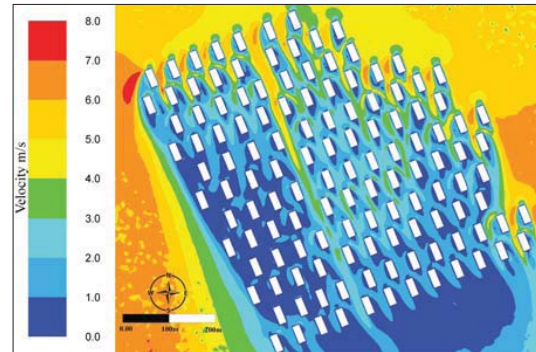
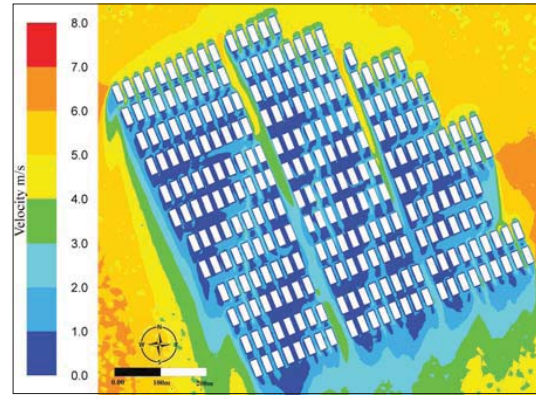
ت ۱۰ (پایین). احتمال وزش باد از هر جهت در محدوده مورد مطالعه طرح، مأخذ: نگارندگان.

جریان نزدیک‌تر می‌شویم، به دلیل اتلاف انرژی جنبشی باد ناشی از حضور ساختمان‌ها و نیروی اصطکاک، از سرعت باد کاسته می‌شود؛ البته نحوه قرارگیری ساختمان‌ها نیز بدون شک در کاهش سرعت باد مؤثر است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، در این پژوهش ساختمان‌ها بر اساس استاندارد بلندمرتبه‌سازی در شهر تورنتو^{۳۶} جاگذاری شده است.

«ت ۱۴» نمایانگر خطوط جریان سرعت باد به هنگام وزش از سمت شمال بر روی نمونه شماره ۲ است، توده‌های دورانی موسوم به گردابه‌ها که در جریان‌های متلاطم شکل می‌گیرند، سبب ایجاد ناحیه‌ای با سرعتی بسیار کمتر نسبت به نواحی دیگر پیرامون ساختمان می‌شوند که به ناحیه دنباله یا رکود باد مشهور هستند.

در «ت ۱۵» ملاحظه می‌شود که به دلیل اثر عدم لغزش^{۳۷}، جریان هوا در نزدیکی سطح زمین کمترین سرعت را دارد و با فاصله گرفتن از سطح زمین، با کاهش اثر اصطکاک، به سرعت باد افزوده می‌شود. در این مقطع نیز ناحیه‌های مشخص شده با رنگ تیره (تا سرعت یک متر بر ثانیه) بیانگر محدوده دنباله ایجاد شده در اثر توده ساختمانی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ورودی جریان، به علت بالا بودن انرژی جنبشی باد، این نواحی کمتر است و به‌مرور، به دلیل افت ناشی از حضور توده‌های ساختمانی، انرژی تلف می‌شود و نواحی دنباله یا رکود بیشتر می‌شود.

در «ت ۱۶ و ۱۷» داده‌های حاصل از بررسی هر نمونه به تفکیک جهت وزش باد ارائه شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، باد با سرعت بیشتر از $1/7 \text{ m/s}$ آستانه خروج از حالت سکون در نظر گرفته شده و درصد فراوانی این نقاط در فضای باز هر نمونه محاسبه شده است. با اعمال ضریب اهمیت در درصد فراوانی نقاط تأثیر هر نمونه بر تهویه فضای شهر با توجه به توأثر و شدت باد از هر جهت سنجیده شده است. در نهایت با جمع اعدادی که احتمال وقوع خروج هوا از حالت سکون را



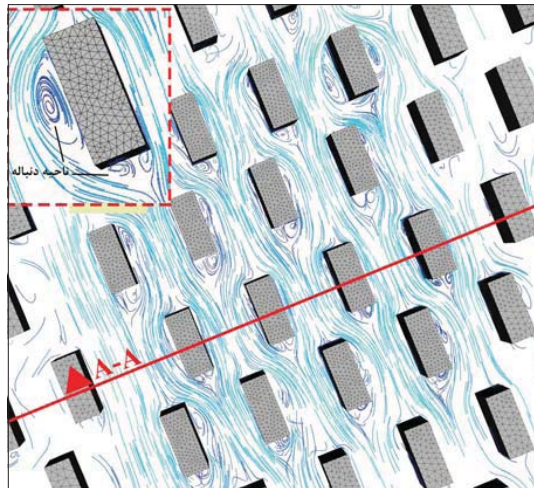
۳۶. نک:

Tall Building Design Guidelines.

۳۷. در مکانیک سیالات فرض بر آن است که ملکول‌های سیال مجاور به دیواره، به دلیل شرط «عدم لغزش»، نسبت به دیواره فاقد سرعت نسبی هستند (یا به تعبیری ملکول‌های سیال دارای سرعتی برابر سرعت دیواره هستند). با فاصله گرفتن از دیواره، رفته‌رفته اثر دیواره بر روی جریان به تدریج کمتر می‌گردد تا جایی که جریان حضور دیواره و اثرات ناشی از آن را حس نمی‌کند.

ت ۱۱ (بالا). کانتور سرعت مطلق باد در ارتفاع ۱۰ متری- ساختمان‌های ۷ طبقه با سطح اشغال ۳۸٪- جهت وزش باد: شمال، به کوشش: نگارندگان.
ت ۱۲ (میان). کانتور سرعت مطلق باد در ارتفاع ۱۰ متری- ساختمان‌های ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲/۵٪- جهت وزش باد: شمال، به کوشش: نگارندگان.
ت ۱۳ (پایین). کانتور سرعت مطلق باد در ارتفاع ۱۰ متری- ساختمان‌های ۲۰ طبقه با سطح اشغال ۱۳/۵٪- جهت وزش باد: شمال، به کوشش: نگارندگان.

شود. در نمونه شماره سه (ساختمان‌های بلندمرتبه با سطح اشغال ۱۳/۵٪)، به دلیل اینکه حجم توده ساختمانی بزرگ‌تر شده است، ناحیه‌های دنباله یا رکود هوا نیز متعاقباً بزرگ‌تر شدند، ولی به دلیل وجود فضای باز به اندازه کافی بین توده‌ها، تهویه هوا در حد قابل قبولی، ۶۵٪ زمان-مکان‌ها فراهم می‌شد و شاهد غالب شدن تأثیر کاهش سطح اشغال بر ارتفاع ساختمان در جابه‌جایی هوا بودیم. این پژوهش نشان داد که افزایش ارتفاع تنها زمانی که این افزایش محسوس و سبب کاهش قابل توجه سطح اشغال شود مؤثر است و در غیر این صورت، تغییر محسوسی بر نحوه جابه‌جایی هوا ندارد. این پژوهش همچنین نشان داد برخلاف دیدگاه عمومی که بلندمرتبه‌سازی را عامل رکود جریان هوا و تجمع آلاینده‌ها می‌داند، ساختمان‌های بلندمرتبه ساخته‌شده مطابق با استانداردهای جهانی شرایط تهویه مناسب‌تری را فراهم کرده‌اند. بررسی هم‌زمان کاهش سطح اشغال و افزایش ارتفاع برای حفظ تراکم مورد نیاز نشان می‌دهد که، در هر منطقه شهری، بر اساس شکل‌گیری توده ساختمانی، مشخصات فیزیکی بناها، و مطالعات باد، باید نقطه



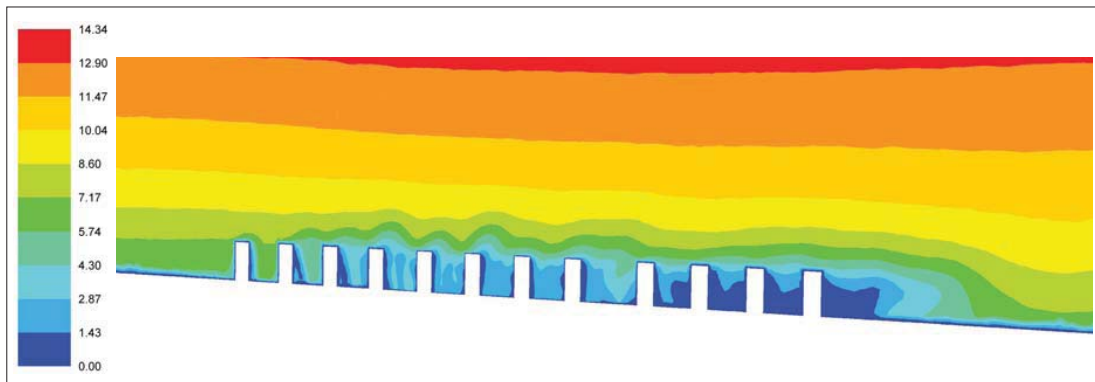
ت ۱۴. خطوط جریان سرعت باد در تراز ۱۰ متری محدوده هدف- ساختمان‌های ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲/۵٪- جهت وزش باد: شمال، به کوشش نگارندگان.

در هر جهت بیان می‌کند، می‌توان پیش‌بینی کرد در هر نمونه ساختمانی چند درصد زمان-مکان‌ها احتمال تهویه طبیعی هوا هست. اطلاعات ارائه‌شده بر اساس سنجش داده‌ها در ارتفاع مینا (۱۰ متری از سطح زمین) است.

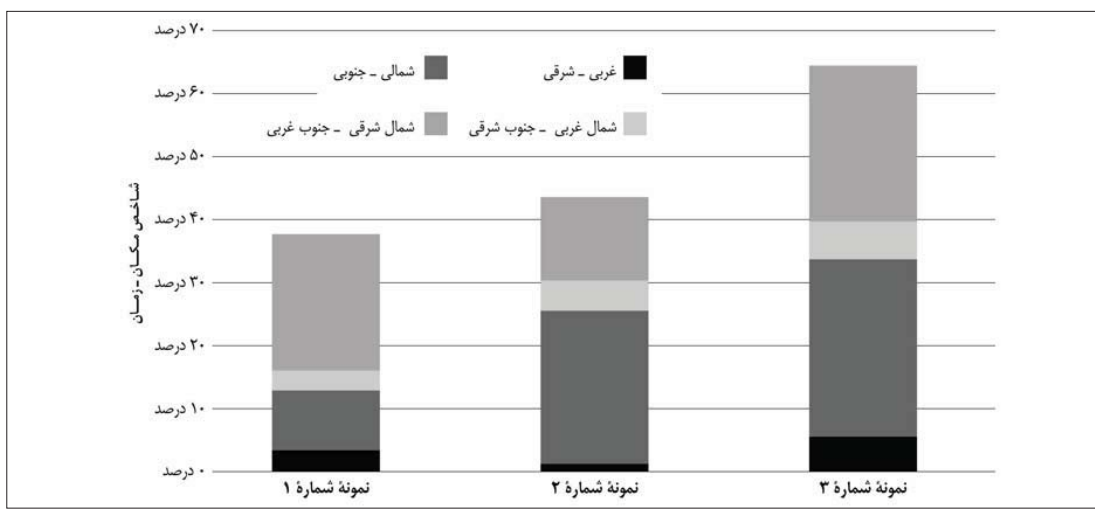
برای تفهیم هرچه روشن‌تر، نتایج شبیه‌سازی به صورتی دیگر در «ت ۱۷» نیز ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بالاترین میزان شاخص مکان-زمان، مربوط به نمونه ۳ با ۶۵٪ است، که سهم عمده آن مربوط به باد وزیده‌شده از جهت شمالی و شمال شرقی است و باد غربی کمترین نقش را در تهویه طبیعی منطقه دارد.

۵. یافته‌های پژوهش

در این پژوهش سه الگوی استقرار با تراکم ساختمانی برابر در یک منطقه مشخص، به منظور پاسخ به این پرسش که آیا فرم استقرار تراکم ساختمانی بر الگوی تهویه هوا مؤثر است، بررسی شده است. سنجش تأثیر تغییر فرم بارگذاری بر جابه‌جایی هوا در محدوده‌ای به مساحت تقریبی ۴۸۳'۰۰۰ متر مربع در منطقه ولنجک شهر تهران مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد در نمونه شماره یک (بناهای ۷ طبقه با سطح اشغال ۳۸٪) فضای خالی بین ساختمان‌ها به حدی نیست که سبب چرخش هوا شود. در واقع در فاصله خالی بین ساختمان‌ها تنها فرصت تشکیل منطقه دنباله یا رکود فراهم شده است. مطابق نتایج «ت ۱۳» در صورتی که این محدوده شهری با الگوی شماره یک توسعه می‌یافت، با اعمال ضریب اهمیت وزش باد، تنها در ۳۸٪ مکان-زمان‌ها با سرعت باد بیشتر از $1/7 \text{ m/s}$ مواجه می‌شدیم. در نمونه شماره دو (ساختمان‌های ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲/۵٪)، هرچند تغییر قابل توجهی در ارتفاع و سطح اشغال نسبت به نمونه پیشین اعمال شده، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان تهویه هوا مشاهده نشده است. در این نمونه تنها در ۴۳٪ مکان-زمان‌ها انتظار می‌رود هوا از حالت سکون خارج



رقتار بلوک شهری در تهویه هوا شاخص مکان-زمان	جهت وزش باد: شمال شرقی - جنوب غربی			جهت وزش باد: شمال غربی - جنوب شرقی			جهت وزش باد: شمالی - جنوبی			جهت وزش باد: غربی - شرقی			
	احتمال وقوع	اهمیت وزش باد در جهت فوق	درصد نقاط با سرعت < ۷/۱ m/s در ارتفاع ۱۰ متر	احتمال وقوع	اهمیت وزش باد در جهت فوق	درصد نقاط با سرعت < ۷/۱ m/s در ارتفاع ۱۰ متر	احتمال وقوع	اهمیت وزش باد در جهت فوق	درصد نقاط با سرعت < ۷/۱ m/s در ارتفاع ۱۰ متر	احتمال وقوع	اهمیت وزش باد در جهت فوق	درصد نقاط با سرعت < ۷/۱ m/s در ارتفاع ۱۰ متر	
	٪۲۸	٪۲۱/۶	٪۴۰	٪۳/۲	٪۸	٪۴۰	٪۹/۵	٪۳۸	٪۲۵	٪۳/۵	٪۱۴	٪۲۵	نمونه شماره یک ۷ طبقه، سطح اشغال ۳۸/۵٪
	٪۴۴	٪۱۳/۲	٪۴۰	٪۴/۸	٪۸	٪۶۰	٪۲۴/۳	٪۳۸	٪۶۴	٪۱/۴	٪۱۴	٪۱۰	نمونه شماره دو ۱۲ طبقه، سطح اشغال ۲۲/۵٪
	٪۶۵	٪۲۴/۸	٪۴۰	٪۶	٪۸	٪۷۶	٪۲۸	٪۳۸	٪۷۴	٪۵/۷	٪۱۴	٪۴۱	نمونه شماره سه ۲۰ طبقه، سطح اشغال ۱۳/۵٪



ت ۱۵ (بالا). کانتور سرعت مطلق بر حسب متر بر ثانیه. برش A-A - ساختمان های ۱۲ طبقه با سطح اشغال ۲۲/۵٪. جهت وزش باد: شمال شرقی، به کوشش: نگارندگان.

ت ۱۶ (میان). نتایج شبیه سازی جریان باد بر روی هر مدل به تفکیک جهت و اهمیت وزش باد، تدوین: نگارندگان.

ت ۱۷ (پایین). رقتار بلوک های شهری در تهویه هوا، به کوشش: نگارندگان.

همچنان تعمیم داده‌های حاصل از یک پژوهش به منطقه‌ای با پیکربندی شهری و شرایط جغرافیایی متفاوت، لزوماً نتایج یکسان نخواهد داشت.

عطفی که در آن تأثیر افزایش ارتفاع بر کاهش سطح اشغال پررنگ می‌شود با مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی یا تجربی جستجو شود. به دلیل نبود اطلاعات کافی در این حوزه،

منابع و مآخذ

شجاعی‌فرد، محمدحسن. *مقدمه‌ای بر جریان‌های آشفتنه و مدل‌سازی آن*، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۱.

نادری، مریم و محسن روشنی و معصومه عباسیان و سارا تربیتیان و حسین شهبازی. *گزارش کنترل کیفیت هوای تهران*، شرکت کنترل کیفیت هوا وابسته به شهرداری تهران، ۱۳۹۵.

بحرینی، حسین و مهیار عارفی و ناصر برک‌پور و حسن خوشپور. «کاربرد مطالعات هواشناسی آلودگی هوا در طراحی شهری (نمونه خاص شهر تهران)»، در *محیط‌شناسی*. ش ۱۸ (زمستان ۱۳۷۶)، ص ۱۷-۳۳.

پایگاه اطلاع‌رسانی مرکز آمار ایران <https://www.amar.org.ir>

AJ. *AJ (Architectural Institute of Japan) Benchmarks for Validation of CFD Simulations Applied to Pedestrian Wind Environment around Buildings*, 2016.

Antoniou, N. et al. "CFD and Wind-tunnel Analysis of Outdoor Ventilation in a Real Compact Heterogeneous Urban Area: Evaluation Using 'Air Delay'", in *Building and Environment*, Vol. 126 (2017), pp. 355-372

ASCE (American Society of Civil Engineer). *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*, 1999.

_____. *Urban Aerodynamics: Wind Engineering for Urban Planners and Designers*, 2011.

Baniotopoulos, Charalambos & Claudio Borri & Theodore Stathopoulos. *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures*, New York: Springer Wien, 2011.

Blocken, B., et al. "CFD Simulation for Pedestrian Wind Comfort and Wind Safety in Urban Areas: General Decision Framework and Case Study for the Eindhoven University Campus", in *Environmental Modeling & Software*, Vol. 30 (2012), pp. 15-34.

Blocken, B., et al. "Application of CFD in Building Performance Simulation for the Outdoor Environment: an Overview", in *Building Performance Simulation*, Vol. 4 (2011), pp.157-184.

COST (European Corporation in Science & Technology), *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of flows in the Urban Environment*, 2007.

Hagishima, Aya, et al, "Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries", in *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 132, Issue 2 (August 2009), pp. 315-337.

Isyumov, N., et al. "Wind in Cities: Effects on Pedestrians and the Dispersion of Ground Level Pollutants", in *Wind Climate in Cities*, 1995, pp. 319-335.

Janssen, W., et al. "Use of CFD Simulations to Improve the Pedestrian Wind Comfort around a High-rise Building in a Complex Urban Area", in 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, France, 2013.

Lateb, M., et al. "On the Use of Numerical Modelling for Near-field Pollutant Dispersion in Urban Environments A Review", in *Environmental Pollution*, Vol. 208 (2015), pp. 271-283.

Liu, C., et al. "On the Prediction of Air and Pollutant Exchange Rates in Street Canyons of Different Aspect Ratios Using Large-eddy Simulation", in *Atmospheric Environment*, Vol. 39 (2005), pp. 1567- 1574.

Meno, A.H., et al. "Aerodynamic Parameters of Regular Arrays of Rectangular Blocks with Various Geometries", in *Boundary-Layer Meteorol*, Vol. 132 (2009), pp. 315-337.

Panagiotou, I., et al. "City Breathability as Quantified by the Exchange Velocity and its Spatial Variation in Real Inhomogeneous Urban Geometries: An Example from Central

London Urban Area", in *Science of the Total Environment*, Vol. 442 (2013), pp. 466-477.

Ratcliff, M., et al. "Comparison of Pedestrian Wind Acceptability Criteria", in *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 36 (1990), pp. 791-800.

Reiter, S. "Validation Process for CFD Simulations of Wind Around Buildings", in European built environment CAE Conference, (2008).

Tahbaz, M. "The Estimation of the Wind Speed in Urban Areas", in *International Journal of Ventilation*, Vol. 8 (2014), pp. 75-84.

Tall Building Design Guidelines, Adopted by Toronto City Council, May 2013.

Tominagaa, Y., et al. "AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings", in *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96 (2008), pp.1749-1761.

UTF, *Towards an Urban Renaissance*, 1999.

Yuan, C., et al. "Building Porosity for Better Urban Ventilation in High-density Cities - A Computational Parametric Study", in *Building and Environment*, Vol. 50 (2012), pp. 176-189.

Zhang, N., et al. "A Microscale Model for Air Pollutant Dispersion Simulation in Urban Areas: Presentation of the Model and Performance over a Single Building", in *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 33 (Feb 2016), pp. 184-192.