

بررسی تاثیر تورفتگی بدنه ساختمان بر عملکرد جریان باد شهری*

پریا سعادتجو**

۱. دکتری معماری، گروه معماری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵ تاریخ اصلاحات: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۲/۲۹

چکیده

پژوهش حاضر به بررسی تاثیر شاخصه‌های فرمی یک ساختمان بلندمرتبه بر جریان باد شهری پرداخت. نمونه مورد مطالعه یک واحد همسایگی متشکل از ۹ بلوک ساختمانی میان‌مرتبه می‌باشد. ساختمان هدف، بنایی ۹ طبقه واقع در مرکز مجموعه است که تغییرات ساختاری بر روی آن اعمال شده است. در گام اول پژوهش یک ساختمان صلب و ۵ مدل با ساختارهای حجمی متفاوت، شبیه‌سازی و یکی از حالت‌های کارآمد از میان آن‌ها انتخاب گردید. در گام بعدی، با تغییر ارتفاع تورفتگی‌های بدنه، تاثیر این متغیر بر رفتار باد پیرامون بنا مورد بررسی قرار گرفت. روش تحقیق در بخش اول روش توصیفی با ابزار مطالعات کتابخانه‌ای و راهبرد پژوهش در بخش دوم، راهبرد شبه‌تجربی است. شبیه‌سازی‌های CFD و تحلیل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار Ansys Airpak 3.0.16 انجام گرفت. بررسی‌ها نشان داد تغییر ساختار هندسی می‌تواند رفتار باد پیرامون ساختمان و معابر اطراف آن را تحت تاثیر قرار دهد. در میان مناطق آئرودینامیک اطراف ساختمان‌ها، منطقه پشت به باد و گوشواره‌ها شاهد بیش‌ترین و مناطق رو به باد دارای کم‌ترین تاثیرپذیری مثبت حاصل از تغییرات هندسی بوده‌اند. نتایج نشان داد توزیع منظم تورفتگی بدنه در ارتفاع ساختمان می‌تواند با تشدید سرعت باد اطراف به تهویه معابر کمک کند. نتیجه این تغییرات در بهترین حالت، افزایش ۴۸.۳۳ درصدی متوسط و ۱۶.۸۹ درصدی ماکزیمم سرعت باد شهری در مقایسه با مدل صلب می‌باشد. بررسی تغییر ارتفاع تورفتگی‌های بدنه بر پتانسیل باد شهری ثابت کرد که ارتباط مستقیمی میان این مولفه و کارایی تهویه شهری برقرار نیست. در این میان مدل‌هایی با ارتفاع تراس ۱.۵ و ۲.۵ متر به ترتیب بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را از نظر تقویت جریان باد پیرامونی تراز عابر پیاده از خود نشان دادند.

واژگان کلیدی: فرم ساختمان، باد شهری، تورفتگی بدنه، سرعت باد.

۱. مقدمه

امروزه افزایش تراکم ساخت و ساز در شهرها، باعث ایجاد اختلال در الگوی جریان باد شهری گشته است (Chen & Norford, 2017; Yim et al., 2009). این مسئله با صلب آسایش عابرین پیاده به ویژه در کلان‌شهرهایی از جمله تهران به معضلی جدی تبدیل شده است (Du, Mak & Kwok et al., 2017). علی‌رغم اهمیت بسیار بالای تهویه شهری، طراحان به این مقوله توجه چندانی ندارند و در طراحی‌های خود به تهویه فضاهای طبیعی اکتفا می‌کنند (Rose et al., 2011). آسایش اقلیمی در فضای خارجی تحت تاثیر عواملی از قبیل رطوبت، باد، دما و پوشش گیاهی است که از میان آن‌ها دما، رطوبت و باد به عنوان عوامل محیطی متاثر از تابش و جریان هوا می‌باشند. سرعت باد شهری تحت تاثیر شاخصه‌های مرتبط با توده‌های ساختمانی و شبکه دسترسی قرار دارد. از این‌رو تغییر تراکم، فاصله، ارتفاع و فرم ساختمان‌ها و همین‌طور جهت‌گیری و عرض معابر می‌تواند الگوی جریان باد شهری را به شدت تحت تاثیر قرار دهد (Willemssen & Wisse, 2007).

تقویت جریان باد یکی از اهداف اصلی طراحان شهری در اقلیم‌های گرم به شمار می‌آید. افزایش جریان باد شهری در محیط‌های باز شهری، به تهویه هوا و کاهش ذرات آلاینده کمک می‌کند (Buccolieri et al., 2010). رکود جریان و تمرکز آلاینده‌ها در شهرهای بزرگ، مشکلی است که بیش از پیش دامن‌گیر کلان‌شهرها شده است. این پژوهش با هدف افزایش سرعت باد پیرامونی ساختمان‌های بلندمرتبه^۱ و تاثیر آن بر جریان باد شهری در تراز عابرین پیاده، نقش تغییر ساختار فرمی بنا در این زمینه را بررسی می‌نماید. در این راستا، پس از تبیین مولفه‌های تاثیرگذار بر باد شهری، به بررسی مطالعات انجام‌شده در این حیطه طی سال‌های اخیر می‌پردازیم. در ادامه، با ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، نقش تغییرات فرم ساختمان بلندمرتبه بر الگوی جریان پیرامونی مشخص می‌گردد.

۲. پیشینه پژوهش

به منظور بهره‌مندی از جریان باد و یا جلوگیری از بادهای آزاردهنده در فضاهای باز شهری، لازم است که در ابتدا تمامی شرایط فیزیکی و دینامیکی جریان باد در پیرامون ساختمان‌ها به دقت بررسی شود (Bahadori, 1994). تا کنون پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی عوامل تاثیرگذار بر رفتار باد و تقسیم‌بندی این عوامل، صورت گرفته است. آینسلی^۲ (۲۰۰۷) عوامل موثر بر رفتار باد را به سه دسته عوامل مرتبط با سایت و لندسکیپ، فرم ساختمان و طرح پوسته بنا، پلان داخلی و طرح فضاهای درونی تقسیم‌بندی کرده است (Aynsley, 2007). اوسمان^۳ (۲۰۱۱)، عوامل موثر بر رفتار باد را در سه

مقیاس ریز، میانه و کلان دسته‌بندی کرده است. در این دسته‌بندی، عوامل مرتبط با معماری تک‌بنا و اجزای ساختمان در دسته خرد، پارامترهای مرتبط با ساختار واحد همسایگی در دسته میانه و عوامل مرتبط با بافت شهری در مقیاس کلان جای گرفته است (Medhat Os-man, 2011). بر این اساس، ساختار پوسته ساختمان، جهت‌گیری بنا، تناسبات ساختمان^۴ و فرم آن از عوامل معمارانه موثر بر رفتار باد در اطراف تک‌بنا می‌باشند (Saa-datjoo et al., 2016; Saligheh & Saadatjoo, 2020).

عوامل موثر بر رفتار باد شهری را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی نمود. اولین عامل تاثیرگذار بر جریان باد شهری، طراحی معابر می‌باشد. عرض معابر، جهت‌گیری معبر نسبت به راستای باد غالب شهری و نسبت ارتفاع ساختمان‌ها به عرض معابر از فاکتورهای موثر بر الگوی جریان باد شهری می‌باشند. دومین عامل تاثیرگذار، ساختار واحدهای همسایگی شهری است. متوسط ارتفاع ساختمان‌ها در یک واحد همسایگی و الگوی هندسی توزیع واحدهای ساختمانی از مهم‌ترین عوامل طراحی است که می‌تواند جریان باد شهری را تحت‌الشعاع قرار دهد (Saadatjoo & Saligheh, 2021). در کنار مولفه‌های طراحی شهری، خصوصیات ساختاری تک‌بنا اعم از فرم هندسی ساختمان، ارتفاع، الحاقات و پیشامدگی‌های بدنه و غیره از مهم‌ترین مولفه‌هاییست که قادر است الگوی رفتار باد پیرامونی و به تبع آن جریان معابر شهری اطراف را تغییر دهد.

افزایش جریان باد شهری به واسطه پراکنش ذرات آلاینده هوا (Ai & Mak, 2013; Cui et al., 2016; Wu et al., 2017) ارتقا تهویه طبیعی شهری (Ng et al., 2011)، تامین آسایش حرارتی و آسایش باد شهری (Yuan & Ng, 2012; Du, Mak & Kwok et al., 2017; Liu et al., 2016) کیفیت و مطلوبیت فضاهای شهری را ارتقا می‌دهد. در این راستا، علاوه بر اعمال راهکارهای متعدد مرتبط با مقوله طراحی شهری اعم از تنظیم زاویه معابر، عرض معابر، مورفولوژی شهری (Hang et al., 2009)، پوشش گیاهی (Zheng et al., 2020) و غیره می‌توان با ایجاد تغییرات فرمی بر روی بناها، الگوی جریان شهری را بهبود بخشید. اگر چه میزان جستناکی باد نیز به عنوان شاخصی مهم، آسایش فضاهای باز شهری را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما تخمین و ارزیابی آن به مراتب پیچیده‌تر از اندازه‌گیری متوسط سرعت جریان می‌باشد (Isyumov & Davenport, 1975; Melbourne, 1978; Du, Mak & Kwok, et al., 2017).

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه بررسی نقش ساختار بناها بر باد شهری صورت گرفته است و راهکارهایی در راستای بهبود جریان توسط آن‌ها ارائه شده است. یکی از این راه‌کارها، اعمال تغییرات در گوشه‌های ساختمان می‌باشد. تست‌های تونل باد انجام گرفته توسط اوماتسو

(Tse et al., 2017). بررسی‌های انجام‌شده، تاثیر تناسبات بنا (نسبت طول به ارتفاع) در میزان کارایی پیلوتی و نقش مثبت آن در جریان پیرامون بنا را به اثبات رسانده است (Zhang et al., 2017). در کنار مولفه‌های مزبور، فرم مقطع ساختمان یکی از عوامل بسیار موثر بر الگوی جریان باد شهری است. حریری و همکاران با بررسی ۳ مدل ساختمانی مختلف و تغییر تراز شکست طبقات، تاثیر فرم مقطع بنا بر رفتار جریان پیرامون ساختمان و آسایش عابرین پیاده را به اثبات رساندند (Hariri et al., 2016). فرورفتگی بدنه در قالب ایجاد تراس و غیره به عنوان یک تغییر فرمی، می‌تواند رفتار باد پیرامونی و داخلی ساختمان را تغییر دهد. اگر چه تاکنون چندین پژوهش نقش ایجاد تراس و تورفتگی بدنه بر تهویه طبیعی فضاهای داخلی را مورد بررسی قرار داده‌اند (Saadatjoo et al., 2019., Saa-datjoo et al., 2018; Saadatjoo et al., 2021; Saligheh & Saadatjoo, 2020)، اما پژوهشی که نقش این تغییرات ساختاری بر جریان باد اطراف ساختمان را بررسی نماید وجود ندارد.

۳. بیان مسئله و فرآیند تحقیق

در ادامه به بیان مسئله و چگونگی فرآیند تحقیق می‌پردازیم.

۳-۱- بیان مسئله

امروزه به دلیل رشد شهرنشینی و نیاز به مسکن، سیاست بلندمرتبه‌سازی اصلی‌ترین رویکرد ساختمان‌سازی در شهرهای بزرگ مانند تهران است. این رویکرد در کنار تبعات اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی خود منجر به ایجاد تغییراتی در اقلیم شهری و افزایش تدریجی درجه حرارت شهری شده است. شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری که روند رو به رشدی را در پیش گرفته است ناشی از ویژگی‌های شهرسازی، آلودگی هوا، تمرکز گرما و حرارت، عدم تهویه مناسب شهری و وجود سطوح نفوذناپذیر در شهر است (Dhalluin & Bozonnet, 2015). می‌توان اذعان نمود که اختلال در جریان باد شهری یکی از اصلی‌ترین دلایل شکل‌گیری جزایر حرارتی در شهرهای بزرگ است (Montazeri et al., 2015).

یکی از تاثیرات بسیار مهم ساختمان‌های بلند، تغییر الگوی باد شهری به ویژه در پیرامون ساختمان‌ها می‌باشد. تاثیر این تغییرات بر روی خرداقلیم شهری بسته به شکل، اندازه، زاویه چرخش و نحوه ارتباط با بناهای مجاور به صورت مثبت یا منفی می‌باشد (Fadl & Karadelis, 2013). وجود ساختمان‌های بلند به عنوان عاملی مزاحم مانع از جریان مناسب باد در شهرهای بزرگ می‌شود. انسداد کریدورهای جریان طبیعی هوا به واسطه بلندمرتبه‌سازی، علاوه بر سلب آسایش حرارتی ساکنین در محیط‌های شهری، منجر به تمرکز ذرات آلاینده و عدم تهویه مناسب فضاهای

و همکاران بر روی چهار مدل با انواع فرم گوشه و انواع جهات باد نشان داد که فرم گوشه بنا می‌تواند تاثیرات قابل ملاحظه‌ای بر جریان باد پیرامون ساختمان داشته باشد (Uematsu & Isyumov, 1999). فرم سقف ساختمان یکی دیگر از مولفه‌های تاثیرگذار بر روی جریان باد اطراف و داخل بنا می‌باشد (Aliabadi et al., 2017; NajafK-hosravi et al., 2016). در سال ۲۰۱۹ در شهر لندن، محدوده‌ای با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر انتخاب و ۲۰ حالت مختلف با ارتفاعات و تناسبات نمای متفاوت (۸ جهت باد مختلف برای هر حالت) با نرم‌افزارهای گروه CFD شبیه‌سازی شد. نتایج پژوهش تاثیرات چشمگیر تناسبات نما بر باد پیرامون ساختمان را به اثبات رساند (Tsichrit-zis & Nikolopoulou, 2019). هاگیشیما و همکاران ثابت کردند که ارتباط مستقیمی میان ارتفاع ساختمان و رفتارهای آئرودینامیک باد وجود دارد (Hagishima et al., 2009). تنوع و اختلاف ارتفاع در مجموعه‌ای از بلوک‌های ساختمانی، می‌تواند پتانسیل تهویه طبیعی در تراز عابر پیاده را افزایش دهد (Ikegaya et al., 2017). تامورا و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از تست‌های تونل باد به بررسی تاثیر ارتفاع، عرض و تناسبات یک ساختمان مربعی شکل بر باد پیرامون ساختمان پرداختند (Xu et al., 2017). دوو و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر ارتفاعات و اندازه‌های تخلخل بر شرایط آسایش باد پیرامونی یک تک‌بنا و مجموعه‌ای از ساختمان‌ها را بررسی کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزایش ارتفاع، تعبیه وید در طبقه همکف و ایجاد وید با ابعاد بزرگ، تاثیرات مثبتی در افزایش جریان باد پیرامون ساختمان دارد (Du et al., 2018). یوان و همکاران با شبیه‌سازی ۹ مورفولوژی متخلخل ساختمانی و مقایسه آن‌ها با مدل صلب به این نتیجه رسیدند که تعبیه فضاهای متخلخل در ترازهای تحتانی کمک قابل ملاحظه‌ای به افزایش جریان توربولانسی در تراز عابر پیاده می‌نماید (Yuan & Ng, 2012). این در حالی است که تعبیه سکو در طبقه همکف باعث افت جریان باد پیرامون ساختمان می‌گردد (Tsang et al., 2012). پژوهشگران با انجام شبیه‌سازی‌های CFD و تست‌های تونل باد ثابت کردند که ایجاد پیلوتی (فضای خالی) در طبقه همکف می‌تواند به ارتقا آسایش پیرامون ساختمان و افزایش سرعت جریان باد به میزان ۱۱ درصد کمک کند (Du et al., 2018; Du, Mak & Liu, et al., 2017). چو و نورفورد ثابت کردند که ساختمان‌های دارای پیلوتی این قابلیت را دارند که جریان معابر کم‌عرض شهری را تا چندین برابر افزایش دهند (Chew & Norford, 2019). تست‌های تونل باد انجام‌گرفته بر روی ۹ مدل مختلف در دانشگاه هنگ‌کنگ نشان داد که ارتفاع و ابعاد هسته مرکزی، یکی از فاکتورهای بسیار موثر در تعیین رفتار جریان پیرامونی ساختمان‌هایی است که طبقه همکف آن‌ها به شکل پیلوتی طراحی شده است

انتخاب‌شده، تنظیمات نرم‌افزاری، شبکه‌بندی و غیره را به اثبات رساند.

پس از اعتبارسنجی خروجی‌های نرم‌افزار، شبیه‌سازی مدل‌های مذکور در چند مرحله انجام گرفت. در گام نخست، پس از استخراج متوسط و ماکزیمم سرعت باد شهر تهران در طی پنج دهه گذشته، داده‌ها بر مبنای بافت و ارتفاع حوزه مورد مطالعه متناسب‌سازی گردید. در ادامه، ابعاد دامنه محاسباتی بر اساس استانداردها تعیین، مدل‌های موردنظر شبیه‌سازی و مهم‌ترین سنجه‌های باد شهری در دامنه مورد نظر اندازه‌گیری شد. بررسی تطبیقی خروجی‌های عددی و کانتورهای گرافیکی منتج به استخراج و ارائه مدل بهینه از نظر ارتقا جریان باد شهری شد.

۴. شبیه‌سازی

در این بخش پس از معرفی روند اعتبارسنجی به مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تست‌های تونل باد می‌پردازیم. پس از بررسی تطبیقی و تأیید صحت و اعتبار نتایج، مدل‌های پژوهش معرفی می‌گردند. در ادامه شرایط شبیه‌سازی اعم از شرایط مرزی، نوع و تعداد مش‌ها، پروفیل سرعت باد، مدل توربولانسی و غیره توضیح داده می‌شود.

۴-۱- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در این پژوهش با استناد به تست‌های تونل باد انجام‌شده در موسسه تحقیقاتی AIJ^۵ ژاپن صورت گرفت. این مدل متشکل از ۹ بلوک ساختمانی هم‌ارتفاع (۰.۲ متر) صلب با سه جهت باد ۲۷۰، ۲۴۷.۵ و ۲۲۵ می‌باشد که در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، از نتایج تست‌های تونل باد با جهت باد ۲۷۰ درجه استفاده شده است (Tominaga et al., 2008) (شکل ۱).

شهری می‌گردد. از آن جایی که آسایش و سلامتی در شهر وابسته به آسایش‌حرارتی و بادهای محیطی به ویژه در سطح پیاده‌رو و میزان پراکنش آلودگی می‌باشد (Moo-nen et al., 2012)، ساخت‌وسازهای انبوه و تبعات ناشی از آن به تدریج منجر به کاهش حضورپذیری فضاهای شهری و کاهش سطح رضایت شهروندان از محیط‌های شهری می‌گردد. از آن جایی که پتانسیل تهویه شهری تحت تاثیر مستقیم مولفه‌های طراحی قرار دارد، ضرورت انجام شبیه‌سازی‌ها به منظور بررسی نقش فاکتورهای طراحی بر جریان باد شهری و ارائه راه‌کارهای کمک‌طراحی در این زمینه اثبات می‌شود.

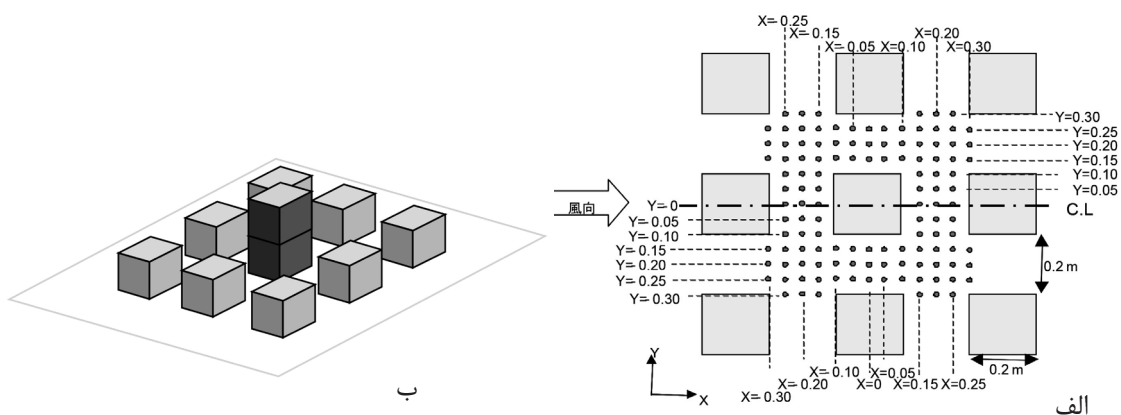
۳-۲- سوالات تحقیق

۱. تغییر ساختار فرمی و شاخصه‌های هندسی یک ساختمان بلندمرتبه چه تاثیری بر الگوی باد شهری دارد؟
۲. مناسب‌ترین راهکار طراحی به منظور ارتقای جریان پیرامونی یک ساختمان بلندمرتبه چیست؟

۳-۳- روش تحقیق

روش تحقیق در بخش مطالعات نظری به روش توصیفی و روش جمع‌آوری اطلاعات نظری، روش مطالعات منابع کتابخانه‌ای است. راهبرد تحقیق در بخش دوم پژوهش، راهبرد شبه‌تجربی است که با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی CFD، تحلیل عددی جریان انجام شده است. بررسی رفتار باد با استفاده از روش شبیه‌سازی رایانه و به کمک نرم‌افزار Ansys Airpak 3.0.16 انجام شده است. اعتبارسنجی خروجی‌های نرم‌افزاری با تکیه بر نتایج تست تونل باد موسسه تحقیقاتی AIJ ژاپن انجام گرفت. مدل شبیه‌سازی‌شده، مجموعه‌ای از ۹ بلوک صلب ساختمانی می‌باشد که بررسی تطبیقی نتایج حاصل از آن با خروجی‌های نرم‌افزار، صحت مدل توربولانسی

شکل ۱: مدل‌های آزمایش‌شده در تونل باد



الف) موقعیت نقاط سنجش و چیدمان ساختمان‌ها در تست تونل باد انجام‌شده توسط AIJ. ب) سه‌بعدی مدل مورد آزمایش در تست‌های تونل باد AIJ.

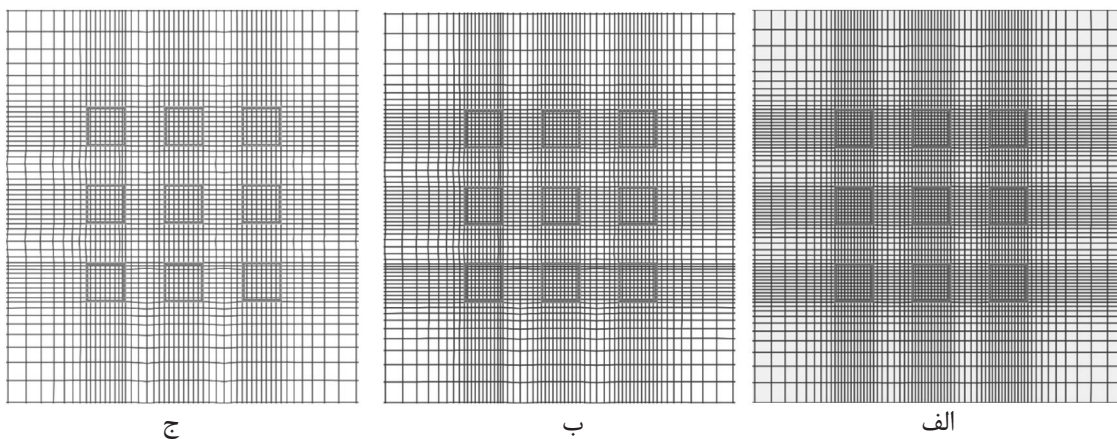
به صورت متوالی تغییر یافت. ضریب رشد شبکه در هر سه نوع مش بندی به اندازه ۱.۲ در تمامی جهات و نوع مش ها، مکعبی ساختاریافته می باشند. پژوهش های پیشین و شبیه سازی های رایانه ای نتایج تست تونل باد مذکور نشان داده است که برای دستیابی به نتایجی دقیق، وجود شبکه با اندازه $1/10$ طول ضلع و ضریب رشد حداکثری ۱.۳ لازم است (Mochida et al., 2002). تعداد مش ها در سه حالت مختلف به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، در جدول ۱ آمده است.

مدل توربولانسی استفاده شده در شبیه سازی ها $k-\omega$ SST می باشد. ابعاد دامنه محاسباتی با در نظر داشتن استاندارد AIJ، به اندازه 5H از جناحین و بالا و به اندازه 10H در منطقه پشت به باد در نظر گرفته شده است (Tominaga et al., 2008). بر این اساس ابعاد محدوده ای که مدل ها در آن واقع شده اند به اندازه 1×1 متر و ابعاد دامنه محاسباتی ۱۳ متر در راستای محور X، ۹ متر در راستای محور Y با ارتفاع ۴ متر می باشد. معیار همگرایی به اندازه 10^{-5} تعریف شده است (Asfour, 2010). به منظور بررسی استقلال حل از شبکه^۶ اندازه مش ها در سه مرحله به

جدول ۱: مشخصات شبکه بندی برای بررسی استقلال حل از شبکه

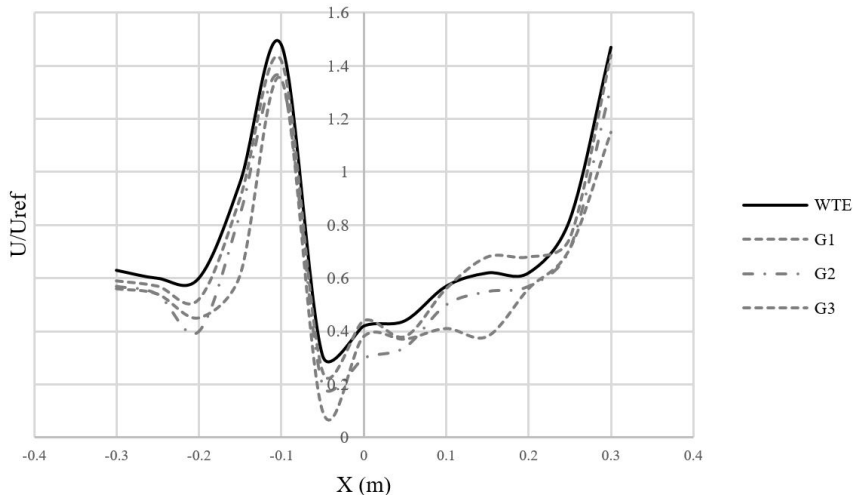
نام شبکه بندی	تعداد شبکه	ضریب رشد شبکه	حداقل اندازه شبکه
G1	۱۱۱۷۱۶۸	۱.۲	۰.۰۸ طول ضلع بنا
G2	۷۳۰۸۰۰	۱.۲	۰.۱ طول ضلع بنا
G3	۵۵۴۸۹۴	۱.۲	۰.۱۲ طول ضلع بنا

شکل ۲: سه نوع شبکه بندی برای بررسی استقلال حل از شبکه



(الف) شبکه بندی ریز (G1، ب) شبکه بندی متوسط (G2، ج) شبکه بندی درشت (G3)

شکل ۳: مقایسه نتایج آزمایش های تونل باد با نتایج شبیه سازی CFD با سه نوع شبکه بندی متفاوت



نمودارهای سرعت باد اندازه گیری شده به سرعت مبنا در سه مدل با مش بندی متفاوت در راستای محور $Y=0.25$

یک ساختمان صلب و پنج ساختمان با مقاطع طولی متفاوت شبیه‌سازی و سنج‌های پتانسیل تهویه طبیعی پیرامون بنا در مورد آن‌ها اندازه‌گیری شد. زیربنای کلیه مدل‌ها با هم برابر بوده و عمق تورفتگی‌ها در تمامی مدل‌ها به اندازه ۱.۵ متر می‌باشد. با توجه به اینکه هدف پژوهش، بررسی تاثیر ساختار فرمی بر جریان باد شهری می‌باشد و جریان داخلی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، بلوک‌های ساختمانی به شکل مدل‌های صلب بدون بازشو در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۲). گام دوم پژوهش به بررسی تاثیر ارتفاع فرورفتگی بر الگوی جریان باد پیرامون بنا و پتانسیل تهویه طبیعی آن می‌پردازد. بدین منظور با تغییر ارتفاع فرورفتگی‌ها از ۱.۵ تا ۳.۵ متر، مجموعاً ۵ مدل در این مرحله شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر و با مدل صلب مقایسه گردید. مدل‌های مرحله دوم همانند مدل‌های مرحله قبل به شکل صلب و بدون بازشو در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۲).

لازم به ذکر است که هر گونه تغییر در عمق تراس‌ها، تراز توزیع تراس‌ها، تعداد تراس‌ها و غیره می‌تواند الگوی جریان داخلی و پیرامونی ساختمان را تحت تاثیر قرار دهد (Saa- datjoo et al., 2018). علاوه بر مشخصه‌های ساختمان هدف، هرگونه تغییر در ارتفاع، نحوه همجواری، تراکم، عرض معابر و غیره ساختمان‌های پیرامونی نیز به شدت بر الگوی جریان باد تاثیر گذارند. با توجه به گستردگی و کثرت متغیرها و عدم امکان بررسی تمامی آن‌ها در قالب یک پژوهش، در این تحقیق با فرض ثابت بودن تمامی متغیرهای مذکور، تنها متغیر مستقل پژوهش، در مرحله اول الگوی توزیع تورفتگی‌ها و در مرحله دوم، ارتفاع تورفتگی‌ها در طبقات می‌باشد.

بررسی‌ها نشان داد که متوسط اختلاف میان نتایج شبیه‌سازی CFD و تست‌های تونل باد به میزان ۹ درصد می‌باشد. بر این اساس می‌توان اذعان نمود که مدل توربولانسی انتخاب‌شده، شرایط لایه مرزی و سایر تنظیمات نرم‌افزار، قابل استناد و معتبر می‌باشد و می‌توان بر این اساس شبیه‌سازی‌های پژوهش پیش رو را انجام داد.

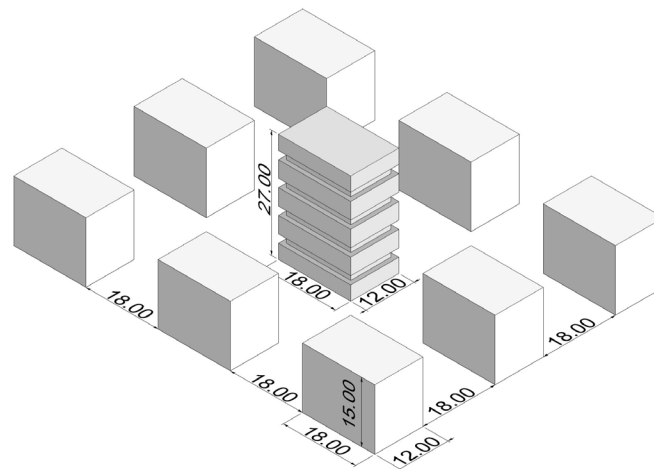
بررسی میزان اختلاف میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مش‌بندی‌های نوع G1 و G2 و G3 به ترتیب برابر با ۰.۰۴۹، ۰.۱ و ۰.۱۵ می‌باشد. بر این اساس نوع مش‌بندی G1 که در آن اندازه کوچکترین شبکه برابر با ۰.۰۸ طول ضلع بناست به عنوان مش‌بندی مناسب انتخاب گردید.

۴-۲- مدل‌های شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی در این پژوهش یک واحد همسایگی متشکل از ۹ بلوک ساختمانی می‌باشد. ساختمان هدف، در مرکز این مجموعه واقع شده و تغییرات ساختاری بر روی آن اعمال می‌گردد تا نقش این تغییرات بر رفتار باد پیرامون بنا تحلیل گردد. ساختار واحد همسایگی بر مبنای متوسط ارتفاع ساختمان‌ها و متوسط عرض معابر (مورفولوژی شهری) شهر تهران طراحی شده است. عرض معابر ۱۸ متر و ارتفاع ساختمان‌های موجود در مجموعه ۱۵ متر (ساختمان ۵ طبقه) با پلان ۱۲×۱۸ متر در نظر گرفته شد. ساختمان هدف، بلوکی ۹ طبقه با ارتفاع ۲۷ متر و دارای پلانی مستطیلی شکل با ابعاد ۱۲×۱۸ متر می‌باشد (شکل ۴).

این پژوهش در دو مرحله انجام شده است. هدف از گام اول پژوهش بررسی تاثیر فرم و ساختار حجمی بر رفتار باد پیرامون ساختمان در تراز عابر پیاده می‌باشد. بدین منظور

شکل ۴: مورفولوژی شهری شبیه‌سازی شده و موقعیت ساختمان هدف



متر است که در مرکز مجموعه واقع شده است.

واحدهای همسایگی ساختمان‌هایی پنج طبقه با ارتفاع ۱۵ متر و مدل موردنظر ساختمانی ۹ طبقه با ارتفاع ۲۷

جدول ۲: مشخصات مدل‌های گام اول پژوهش با مقاطع طولی متفاوت

E	D	C	B	A	Solid	
۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	ارتفاع
۹	۹	۹	۹	۹	۹	تعداد طبقات
۱۲	۱۲	۱۲	۳-۶	۱.۵	۰	ارتفاع فرورفتگی (متر)
۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۰	عمق فرورفتگی (متر)
۱۶۲۰	۱۶۲۰	۱۶۲۰	۱۶۲۰	۱۶۲۰	۱۹۴۴	زیربنا (متر مربع)

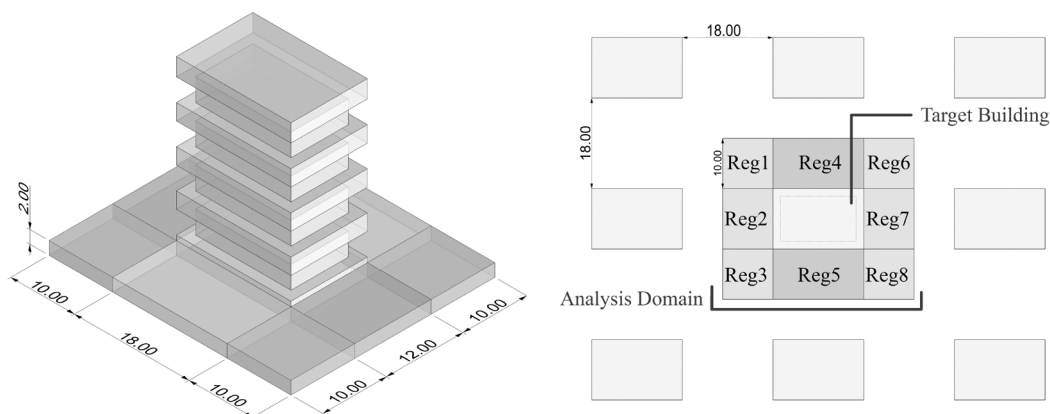
جدول ۳: مشخصات مدل‌های گام دوم پژوهش؛ ساختمان‌های متخلخل با ارتفاع تخلخل متفاوت

A 3.5	A 3	A 2.5	A 2	A 1.5	Solid	
۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	۲۷	ارتفاع
۹	۹	۹	۹	۹	۹	تعداد طبقات
۳.۵	۳	۲.۵	۲	۱.۵	۰	ارتفاع فرورفتگی (متر)
۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۰	عمق فرورفتگی (متر)

سنجش و ارزیابی می‌گردد. ارتفاع حوزه سنجش رفتار باد از کف معبر تا ارتفاع ۲ متر بالاتر از کف معبر می‌باشد تا به طور کامل فضای حرکتی عابرین پیاده پیرامون ساختمان را پوشش دهد. موقعیت حوزه‌های سنجش نسبت به ساختمان مرکزی و واحدهای همسایگی در شکل ۵ نشان داده شده است.

متوسط و ماکزیمم سرعت باد در تراز پیاده، دو متغیر وابسته این پژوهش به منظور ارزیابی رفتار باد پیرامون ساختمان می‌باشند. بدین منظور معبر پیرامون ساختمان به هفت حوزه مکعبی شکل تقسیم و متغیرهای مذکور در هر یک از این حوزه‌ها اندازه‌گیری و ثبت گردید. حوزه‌های تعیین شده فاصله ۱۰ متری از ساختمان هدف (مرکزی) را پوشش می‌دهند و رفتار باد در این فاصله از ساختمان،

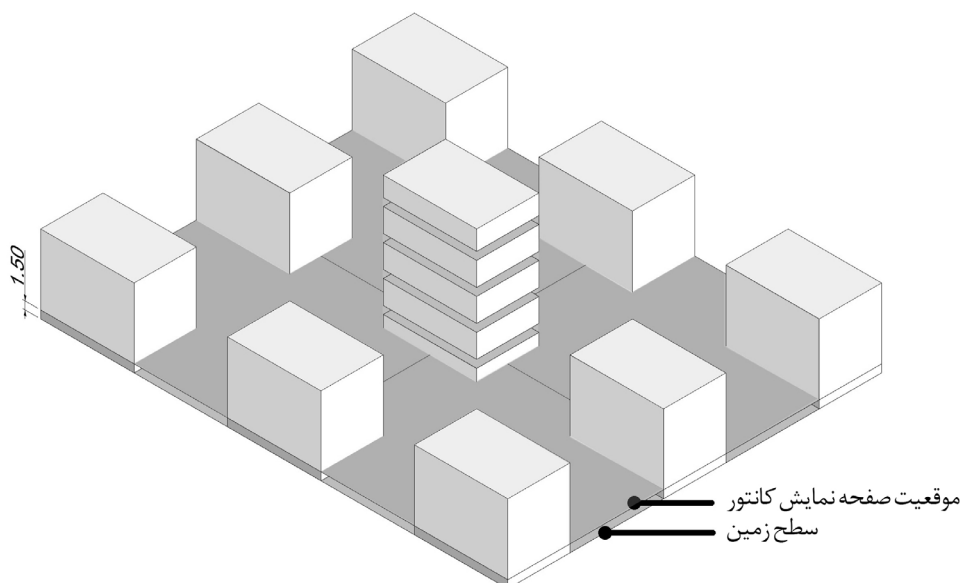
شکل ۵: موقعیت حوزه‌های سنجش نسبت به ساختمان مرکزی و واحدهای پیرامونی



روی صفحه‌ای که به موازات سطح زمین و در ارتفاع ۱.۵ متری از آن قرار دارد ثبت شد. موقعیت صفحه نمایش کانتورها در شکل ۶ نشان داده شده است.

به منظور بررسی تطبیقی بهتر الگوی جریان در مدل‌های مورد پژوهش، کانتورهای گرافیکی سرعت از نرم‌افزار استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. کانتورهای سرعت بر

شکل ۶: موقعیت صفحه کانتور نسبت به ساختمان و سطح زمین



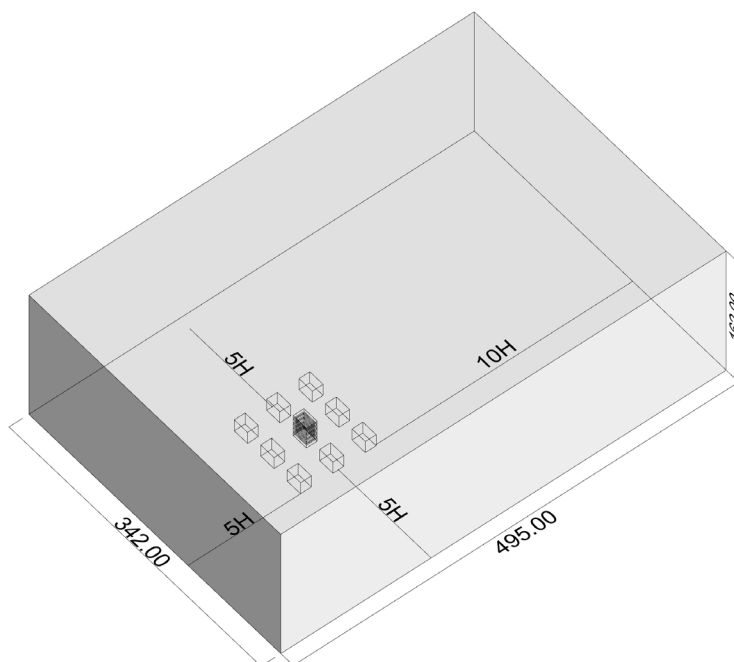
کانتورهای گرافیکی سرعت باد بر روی صفحه‌ای به موازات سطح زمین و با ارتفاع ۱.۵ متر ثبت شده‌اند.

جریان برای مجموعه‌ای از ساختمان‌ها انجام شود، حداقل ارتفاع دامنه برابر با $5H$ ، جناحین به اندازه $5H$ و ابعاد منطقه پشت به باد برای به حداقل رسانی جریان برگشتی برابر $10H$ از دیواره‌های بنا در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه ابعاد محدوده مورد مطالعه به اندازه 90×72 متر و ارتفاع بلندترین ساختمان 27 متر می‌باشد، ابعاد دامنه محاسباتی با در نظر داشتن استاندارد AIJ، 477 متر در راستای x ، 360 متر در راستای y و 297 متر در راستای z در نظر گرفته شده است.

۴-۲- شرایط شبیه‌سازی

فرم و ساختار هندسی ساختمان‌ها علاوه بر تغییر الگوی جریان داخلی ساختمان، رفتار باد پیرامون بنا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تحلیل‌های دینامیک باد انجام گرفته در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر هندسه ساختمان بلندمرتبه بر جریان باد شهری می‌باشد. در این راستا ۱۱ مدل ساختمانی مختلف شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. ابعاد دامنه محاسباتی بر مبنای ابعاد پیشنهادی استاندارد AIJ ژاپن تعریف شده است. بر اساس این استاندارد، در حالتی که شبیه‌سازی

شکل ۷: ابعاد دامنه محاسباتی و موقعیت مدل‌های ساختمانی در دامنه



سرعت هوا در طول ۶ ماه گرم سال برابر با ۳۰.۵ و حداکثر سرعت ۳۲.۹ متر بر ثانیه می‌باشد و جهت باد بر اساس جهت باد غالب شهر تهران و از سمت غرب به شرق تعریف شده است.

۵. یافته‌ها

در این پژوهش شبیه‌سازی جریان باد برای ۶ ماه گرم سال در شهر تهران انجام گرفت. مهم‌ترین سنجه‌های پتانسیل تهویه شهری متوسط و ماکزیمم سرعت باد به فاصله ۱۰ متری از پیرامون بنا و ارتفاع ۲ متری از سطح زمین اندازه‌گیری شدند. محدوده‌های سنجش جریان در شکل ۵ و ۸ و نتایج این سنجش برای هر مدل به صورت مجزا و بر روی پلان شبکه‌بندی اطراف ساختمان در جداول ۴-۵ آمده است. از میان حوزه‌های هشت‌گانه نشان داده شده در شکل ۸، ۱، ۲، ۳، ۸ در ناحیه رو به باد، ۴-۵ در منطقه گوشواره و نواحی ۶، ۷، ۸ در منطقه پشت به باد ساختمان قرار دارند. دو کمیت درج شده در هر خانه از جدول ۴ به ترتیب از بالا به پایین، متوسط سرعت جریان و ماکزیمم سرعت باد را نشان می‌دهد.

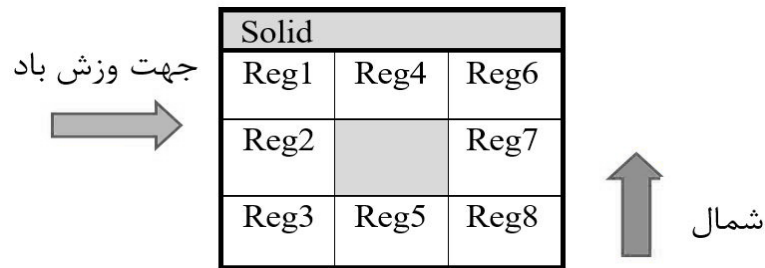
مرحله دوم ایجاد شبکه مش برای دامنه محاسباتی است که در این پژوهش با توجه به ابعاد دامنه محاسباتی و بررسی‌های استقلال حل از شبکه، ۳۰۵۳۱۴۲ مش با ضریب رشد ۱.۲ طراحی و ایجاد شد. مش‌های ایجاد شده از نوع مکعبی منسجم و ساختاریافته^۷ می‌باشند. مدل توربولانسی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها مدل k-wSST می‌باشد.

اطلاعات هواشناسی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها، اطلاعات ایستگاه مهرآباد طی ۵۰ سال گذشته (۱۳۹۳-۱۳۴۳) می‌باشد. استفاده از اطلاعات هواشناسی (که در محیط باز و در ارتفاع ده متری زمین کسب می‌شود) برای مکانی دیگر هنگامی معتبر است که اولاً بافت زمین مکان مذکور از لحاظ ناهمواری ناشی از پوشش گیاهی و ساخت‌وساز معماری مشابه بافت ایستگاه هواشناسی باشد و ثانیاً ارتفاع آن مکان نزدیک به ده متری زمین باشد. در غیر این صورت، سرعت باد با اطلاعات موجود تفاوت خواهد داشت و اگر متناسب‌سازی نشود از اعتبار اطلاعات کاسته می‌شود. برای تعریف پروفیل باد در ارتفاع دامنه محاسباتی (۰ تا ۲۹۷ متر) از رابطه زیر استفاده گردید.

$$\frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_G} = \left[\frac{z}{Z_G} \right]^\alpha \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه \bar{V}_z سرعت هوا در سایت طراحی بر حسب متر بر ثانیه و \bar{V}_G سرعت گرادیان هوا بر حسب متر بر ثانیه و z ارتفاع مورد مطالعه بر حسب متر و Z_G ارتفاع گرادیان بر حسب متر و α توان عددی مربوط به بافت طراحی است که برابر با ۰.۳۶ در نظر گرفته شده است. اطلاعات هواشناسی شهر تهران نشان می‌دهد که میانگین

شکل ۸: نام و موقعیت ۸ منطقه پیرامونی مدل‌های A-E و مدل صلب



جدول ۴: مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در مناطق پیرامونی مدل‌های A-E و مدل صلب

Solid	A		B		C		D		E								
۰.۸۲	۰.۵۶	۰.۵۷	۱.۱۱	۰.۷۳	۰.۹۱	۱.۰۱	۰.۷۲	۰.۹۸	۰.۹۲	۰.۶۸	۰.۸۳	۰.۹۶	۰.۶۱	۰.۷۶	۰.۹	۰.۸۱	۰.۸۲
۱.۸۲	۱.۵۱	۱.۳۸	۲.۰۵	۱.۷۲	۱.۷۹	۱.۹۳	۱.۷۶	۱.۸۲	۱.۸۵	۱.۵۷	۱.۵۵	۱.۸۳	۱.۵۱	۱.۶۰	۲.۱۸۲	۱.۶۵	۱.۴۵
۰.۷۱		۰.۱۷	۰.۸۹		۰.۲۹	۰.۸۲		۰.۲۲	۰.۶۸		۰.۳۱	۰.۸۹		۰.۴۱	۰.۷۱		۰.۴۵
۱.۸۹		۰.۶۰	۱.۸۸		۰.۹۸	۱.۷۶		۰.۸۰	۱.۸۲		۱.۱۰	۱.۷۸		۱.۱۱	۱.۶۱		۱.۲۵
۰.۸۵	۰.۵۹	۰.۵۸	۱.۰۹	۰.۸	۰.۸۷	۱.۰۶	۰.۸۲	۰.۹۴	۰.۹۱	۰.۶۳	۰.۶۰	۱.۱۷	۰.۷۶	۰.۷۹	۰.۸۶	۰.۷۳	۰.۶۳
۱.۸۱	۱.۵۲	۱.۳۶	۱.۹۶	۱.۷۷	۱.۷۱	۱.۹۵	۱.۷۶	۱.۷۶	۱.۸۴	۱.۴۷	۱.۴۰	۱.۹۷	۱.۷۳	۱.۴۸	۱.۸۴	۱.۶۱	۱.۵۳

جدول ۵: اختلاف مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان به دست آمده برای هر حوزه با مدل مبنا (ساختمان صلب) به درصد

A	B	C	D	E
+۳۵.۳۶+۳۰.۳۵+۵۹.۶۴+۲۳.۱۷+۲۸.۵۷+۷۱.۹۲+۱۲.۱۹+۲۱.۴۲+۴۵.۶۱+۱۷.۰۷+۸.۹۲+۳۳.۳۳+۹.۷۵+۴۴.۶۴+۴۳.۸۵				
+۱۲.۶۳+۱۳.۹۰+۲۹.۷۱+۶.۰۴+۱۶.۵۵+۳۱.۸۸+۱.۶۴+۳.۹۷+۱۲.۳۱+۰.۵۴			+۱۵.۹۴	+۲۹.۲۷+۵.۰۷
+۲۵.۳۵	+۷۰.۵۸+۱۵.۴۹	+۲۹.۴۱-۰.۴۲	+۸۲.۳۵+۲۵.۳۵	+۱۴۱.۱۱
-۰.۵۲	+۶۳.۳۳-۶.۸۷	+۳۳.۳۳-۳.۷۰	+۸۳.۳۳-۶.۱۴	+۸۵-۱۴.۸۱
+۲۸.۲۳+۳۵.۵۹+۵۰	+۲۴.۷۰+۳۸.۹۸+۶۲.۰۶+۷.۰۵	+۶.۷۷+۳.۴۴+۳۴.۶۴+۲۸.۸۱+۳۶.۲۰	+۱.۱۷+۲۳.۷۲+۳۱.۰۳	
+۵.۲۸+۱۶.۴۴+۲۵.۷۳+۷.۷۳+۱۵.۷۸+۲۹.۴۱+۱.۶۵		-۳.۲۸+۲.۹۴+۸.۸۳+۱۳.۸۱+۸.۸۲	+۱.۶۵+۵.۹۲+۲۷.۲۰	

میزان افت سرعت در مدل E با ۱۴.۸۱- نسبت به مدل مبنا مشهود است.

بررسی متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق گوشواره (Reg 4, 5) حاکی از رشد مثبت هر دو متغیر نسبت به مدل صلب می‌باشد. ^۱میزان رشد متوسط سرعت جریان در بازه ۶.۷۷+ تا ۴۴.۶۴+ و میزان افزایش ماکزیمم سرعت جریان در دامنه ۰ تا ۲۹.۲۷ درصد قرار دارد. بررسی تطبیقی مدل‌ها نشان داد که متوسط و ماکزیمم سرعت باد در مناطق گوشواره مدل E بیش‌ترین و در مدل C دارای کم‌ترین رشد مثبت نسبت به مدل صلب می‌باشند.

نتایج حاصل از سنجش سرعت باد در منطقه پشت به باد (Reg 6, 7, 8) نشان داد که رفتار باد در این منطقه با ایجاد تغییرات هندسی در فرم ساختمان‌ها بهبود یافته است. اما میزان رشد سرعت و اصلاح الگوی جریان باد تحت تاثیر ساختار هندسی بناها متفاوت بوده است؛ به طوری که

بررسی نتایج ثبت شده در حوزه‌های هشت‌گانه پیرامون هر مدل نشان داد که متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در جناحین منطقه رو به باد (Reg 1, 3) همواره مثبت بوده است. متوسط سرعت جریان در این دو حوزه از ۷.۰۵ تا ۳۵.۳۶ درصد رشد داشته است که بیش‌ترین رشد این متغیر در مدل A قابل مشاهده است. این در حالی است که ماکزیمم سرعت باد در دو حوزه مذکور در فاصله ۰ تا ۱۲.۶۳ درصد رشد داشته است که بیش‌ترین رشد مربوط به مدل A می‌باشد. بررسی تطبیقی متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در دو حوزه Reg 3 و Reg 1 حاکی از آنست که مدل A دارای بیش‌ترین اختلاف مثبت و مدل E دارای کم‌ترین اختلاف با مدل صلب در دو حوزه مذکور می‌باشد. علی‌رغم بیش‌تر حوزه‌های مورد سنجش که با رشدی مثبت، رفتاری بهتر نسبت به مدل صلب را از خود نشان داده‌اند، ماکزیمم سرعت جریان در جبهه رو به شرق ساختمان (Reg 2) سیری نزولی داشته است. بیش‌ترین

متوسط سرعت باد رشدی در محدوده ۳.۴۴ درصد تا ۲.۹۴ درصد تا ۱۴۱.۶۶ درصد داشته است. ۱۹۴.۱۱ درصد و ماکزیمم سرعت باد رشدی در دامنه

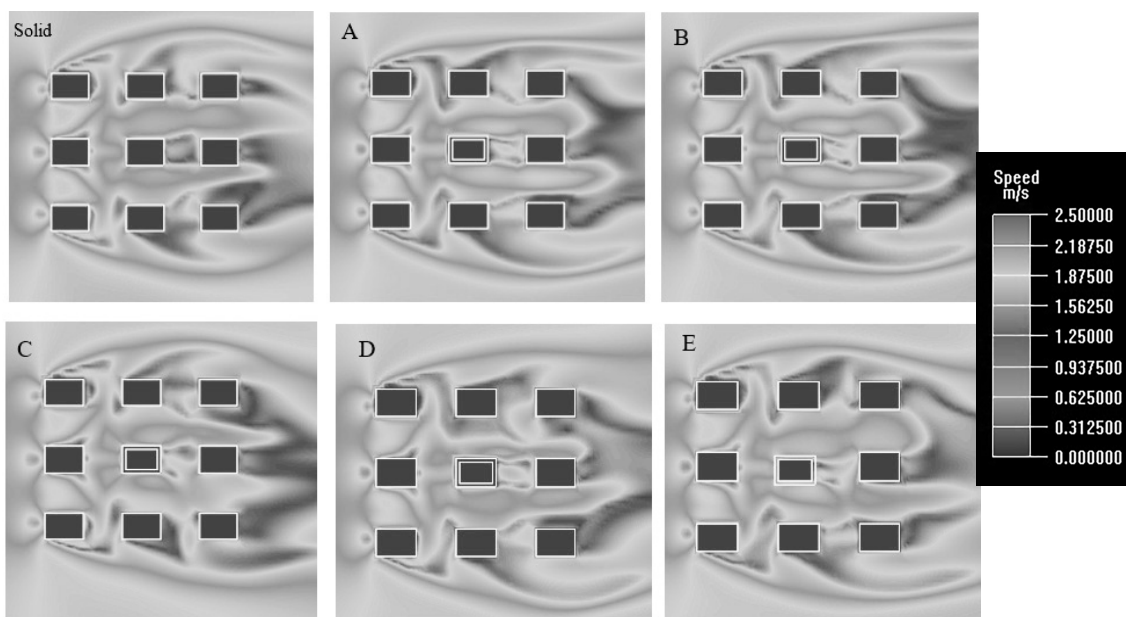
شکل ۹: نمودارهای میانگین مقادیر به دست آمده برای متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق ۸ گانه پیرامونی مدل های A-E



مناسب پس از مدل A به شمار می آید که می تواند متوسط سرعت جریان را تا حدود ۴۶.۶۶ درصد و ماکزیمم سرعت باد را به میزان ۱۴.۱۸ درصد در تراز عابر پیاده پیرامون ساختمان بلندمرتبه ارتقا دهند. این در حالی است که اختلاف بسیار کم نتایج مدل های C و E با مدل صلب حاکی از ناکارآمدی این ساختارهای هندسی به منظور افزایش پتانسیل باد شهری می باشد. کانتورهای گرافیکی سرعت باد بر روی صفحه ای در ارتفاع ۱.۵ متری از سطح زمین به بررسی تطبیقی الگوی جریان باد در مدل های مختلف کمک می کند (شکل ۱۰).

به منظور بررسی تطبیقی بهتر نتایج، کمیت های به دست آمده برای دو متغیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق هشت گانه پیرامونی ساختمان ها متوسط گیری و نتایج آن در قالب نمودارهای میله ای شکل ۹ به نمایش درآمد. مقایسه نتایج حاصل حاکی از آن است که مدل A با بالاترین میزان اختلاف با مدل صلب بهترین گزینه برای بهبود تهویه باد شهری به شمار می آید. در این مدل متوسط و ماکزیمم سرعت باد پیرامون بنا در مقایسه با مدل مبنا (صلب) به میزان ۴۸.۳۳ درصد و ۱۶.۸۹ درصد افزایش یافته است. مدل B با نتایج تقریباً مشابه، گزینه

شکل ۱۰: کانتورهای گرافیکی سرعت جریان در ارتفاع ۱.۵ متر از سطح زمین در مدل های A-E و ساختمان صلب

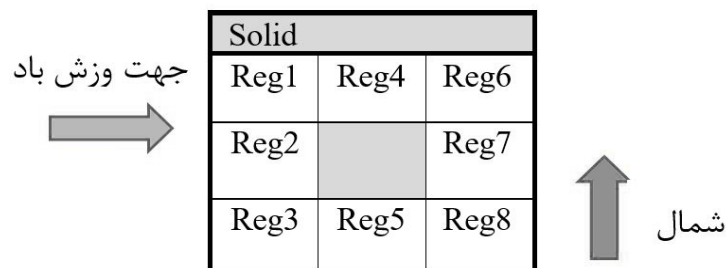


قابل ملاحظه‌ای تعدیل شده و آسایش عابرین در این ناحیه را به دنبال داشته باشد. کانتورهای گرافیکی بیانگر اینست که تغییر ساختار هندسی و شاکله بنا نمی‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر الگوی جریان در منطقه رو به باد ساختمان داشته باشد.

گام دوم پژوهش تاثیر ارتفاع تورفتگی بدنه بر تهویه معابر اطراف ساختمان را بررسی کرد. حوزه‌های مورد سنجش و نتایج تحلیل‌های عددی در شکل ۱۱ و جداول ۶-۷ آمده است.

بررسی تطبیقی کانتورهای گرافیکی به وضوح نشان می‌دهد که تغییرات هندسی اعمال شده در ساختمان مرکزی، جریان‌های اطراف ساختمان را تحت‌الشعاع قرار داده است که در این میان مناطق گوشواره و منطقه پشت به باد بنا از این تغییرات بیش‌ترین تاثیر را پذیرفته‌اند. ایجاد شکست در فرم مقطع طولی ساختمان، باعث انحراف جریان از مسیر مستقیم شده و هدایت بهتر جریان به منطقه پشت به باد ساختمان را در پی دارد. از این رو رکود هوای مشهود در این منطقه از مدل صلب، با ایجاد تخلخل‌های طولی و شکست‌های بدنه بنا، می‌تواند تا حد

شکل ۱۱: نام و موقعیت ۸ منطقه پیرامونی مدل‌های A1.5- A3.5 و مدل صلب



جدول ۶: مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان به دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها در مناطق پیرامونی مدل‌های A1.5-A3.5 و مدل صلب

Solid	A1.5		A2		A2.5		A3		A3.5								
۰.۸۲	۰.۵۶	۰.۵۷	۱.۱۱	۰.۷۳	۰.۹۱	۱.۰۷	۰.۷۳	۰.۹۵	۱.۰۱	۰.۶۹	۰.۸۱	۱.۰۶	۰.۸۱	۱.۰۳	۱.۰۷	۰.۷۸	۰.۹۶
۱.۸۲	۱.۵۱	۱.۳۸	۲.۰۵	۱.۷۲	۱.۷۹	۱.۹۷	۱.۷	۱.۸۲	۱.۸۸	۱.۴۹	۱.۵۱	۱.۹۳	۱.۷۶	۱.۸۲	۱.۹	۱.۶۶	۱.۷۱
۰.۷۱		۰.۱۷	۰.۸۹		۰.۲۹	۰.۸۵		۰.۲۳	۰.۷۴		۰.۳	۰.۸۷		۰.۲۹	۰.۸۵		۰.۲۹
۱.۸۹		۰.۶۰	۱.۸۸		۰.۹۸	۱.۸		۰.۹۹	۱.۷		۱.۰۴	۱.۷۶		۰.۸۰	۱.۷۳		۰.۸۰
۰.۸۵	۰.۵۹	۰.۵۸	۱.۰۹	۰.۸	۰.۸۷	۱.۱۰	۰.۷۹	۰.۹۳	۱.۰۹	۰.۷۹	۰.۹۶	۱.۱۱	۰.۸۷	۱.۰۰	۱.۱۰	۰.۸۵	۰.۹۵
۱.۸۱	۱.۵۲	۱.۳۶	۱.۹۶	۱.۷۷	۱.۷۱	۱.۹۹	۱.۷۳	۱.۷۴	۱.۹۴	۱.۶۸	۱.۶۹	۱.۹۵	۱.۷۶	۱.۷۶	۱.۹۰	۱.۶۸	۱.۶۸

جدول ۷: اختلاف مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان به دست‌آمده برای هر حوزه با مدل مبنا (ساختمان صلب) به درصد

A1.5	A2	A2.5	A3	A3.5
+۳۵.۳۶+۳۰.۳۵+۵۹.۶۴+۳۰.۴۸+۳۰.۳۵+۶۶.۶۶+۲۳.۱۷+۲۳.۲۱+۴۲.۱۰+۲۹.۲۶+۴۴.۶۴+۸۰.۷۰+۳۰.۴۸+۳۹.۲۸+۶۸.۴۲				
+۱۲.۶۳+۱۳.۹۰+۲۹.۷۱+۸.۰۴+۱۲.۵۸+۳۱.۸۸+۳.۲۹-۱.۳۲+۹.۴۲+۶.۰۴+۱۶.۵۵+۳۱.۸۸+۴.۳۹+۹.۹۳+۲۳.۹۱				
+۲۵.۳۵	+۷۰.۵۸+۱۹.۷۱	+۳۵.۲۹+۴.۲۲	+۷۶.۴۷+۲۲.۵۳	+۷۰.۵۸+۱۹.۷۱
-۰.۵۲	+۶۳.۳۳-۴.۷۶	+۶۵-۱۰.۰۵	+۷۳.۳۳-۶.۸۷	+۳۳.۳۳-۸.۹۳
+۲۸.۲۳+۳۵.۵۹+۵۰+۲۹.۴۱+۳۳.۸۹+۶۰.۳۴+۲۸.۲۳+۳۳.۸۹+۶۵.۵۱+۳۰.۵۸+۴۷.۴۵+۷۲.۴۱+۲۹.۴۱+۴۴.۰۶+۶۳.۷۹				
+۵.۲۸+۱۶.۴۴+۲۵.۷۳+۹.۹۴+۱۳.۸۱+۲۷.۹۴+۷.۱۸+۱۰.۵۲+۲۴.۲۶+۷.۷۳+۱۵.۷۸+۲۹.۴۱+۴.۹۷+۱۰.۵۲+۲۳.۵۲				

نتایج به دست آمده از مرحله دوم شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در تمامی مدل‌ها، متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق 1, 3 Reg نسبت به مدل صلب افزایش داشته است. در این دو حوزه، تغییرات متوسط سرعت جریان نسبت به مدل مبنا در بازه ۲۳.۱۷+ تا ۳۵.۳۶+ و تغییرات

ماکزیمم سرعت جریان در بازه ۳.۲۹+ تا ۱۲.۶۳+ قرار دارد. بیش‌ترین افزایش سرعت جریان در این دو ناحیه مربوط به مدل A1.5 و کم‌ترین مقدار آن مربوط به مدل A2.5 می‌باشد. در این میان بیش‌ترین رشد مثبت مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق گوشواره

نتایج به دست آمده از مرحله دوم شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در تمامی مدل‌ها، متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق 1, 3 Reg نسبت به مدل صلب افزایش داشته است. در این دو حوزه، تغییرات متوسط سرعت جریان نسبت به مدل مبنا در بازه ۲۳.۱۷+ تا ۳۵.۳۶+ و تغییرات

بازه ۲۳.۲۱ درصد تا ۴۷.۴۵ درصد و ماکزیمم سرعت آن رشدی در حدودی ۹.۹۳ درصد تا ۱۶.۵۵ درصد داشته است.

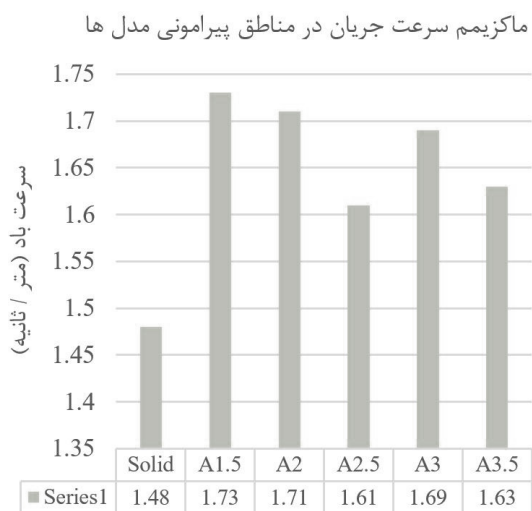
بررسی نتایج در منطقه پشت به باد (Reg 6, 7, 8) نشان داد که با ایجاد تغییرات هندسی، رفتار جریان در منطقه پشت به باد ساختمان نسبت به مدل صلب بهتر شده است. تغییرات هندسی ساختمان با افزایش چشمگیر متوسط سرعت جریان در دامنه ۳۵.۲۹ درصد تا ۸۰.۷۰ درصد و ماکزیمم سرعت باد با افزایش ۹.۴۲ تا ۷۳.۳۳ درصد، رکود حاکم بر این منطقه در مدل صلب را از میان برده و باعث بهبود تهویه باد شهری شده‌اند. در مجموع می‌توان گفت که سرعت جریان باد در منطقه پشت به باد ساختمان در مدل A3.5 دارای کم‌ترین و در مدل A3 دارای بیش‌ترین رشد نسبت به مدل صلب بوده است.

نسبت به ساختمان صلب در مدل A3 و کم‌ترین مقدار آن در مدل A2.5 مشاهده گردید.

نتایج کمی به دست آمده از شبیه‌سازی مدل‌ها حاکی از افزایش متوسط و کاهش ماکزیمم سرعت جریان نسبت به مدل صلب در منطقه رو به باد می‌باشد. متوسط سرعت جریان در این ناحیه افزایشی در بازه ۴.۲۲ درصد تا ۲۵.۳۵ درصد داشته است؛ این در حالیست که مقادیر ماکزیمم سرعت باد تا ۱۰ درصد نیز کاهش یافته است. در بین ۵ مدل آزمایش شده، مدل A1.5 بهینه‌ترین و A2.5 ضعیف‌ترین الگوی جریان در این بازه را از خود نشان دادند.

بررسی متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق گوشواره (Reg 4, 5) حاکی از رشد مثبت هر دو متغیر متوسط و ماکزیمم سرعت باد نسبت به مدل صلب می‌باشد. در این حوزه متوسط سرعت جریان رشدی در

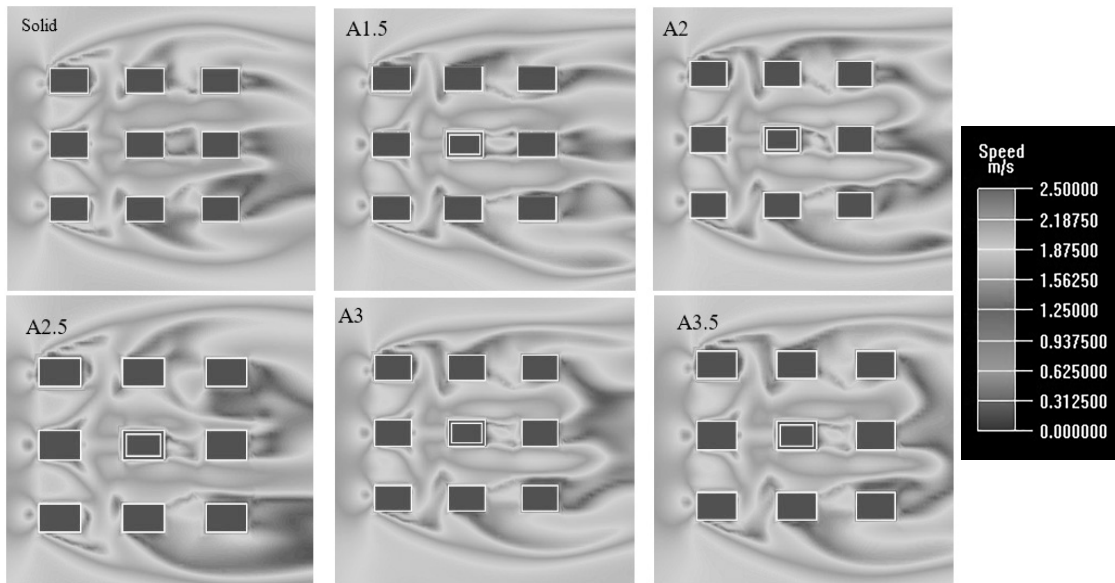
شکل ۱۱: نمودارهای میانگین مقادیر به دست آمده برای متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در مناطق ۸ گانه پیرامونی مدل‌های A1.5- A3.5



را ارتقا داده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع تورفتگی‌های بدنه از ۱.۵ تا ۲.۵ متر با کاهش متوسط و ماکزیمم جریان پیرامونی ساختمان، تاثیری منفی بر کارایی تهویه طبیعی داشته است. می‌توان اذعان نمود که ارتباط مستقیمی میان ارتفاع شکست‌های بدنه و کارایی تهویه طبیعی وجود ندارد و از میان ۵ مدل تعریف شده، مدل‌های 1,2,3 نسبت به دو مدل دیگر دارای پتانسیل و کارایی بالاتری می‌باشند.

بررسی تطبیقی نتایج (شکل ۹) نشان داد که مدل‌های A3 و A1.5 به ترتیب دارای بیش‌ترین متوسط سرعت و ماکزیمم سرعت جریان پیرامون ساختمان می‌باشند. نمودارها حاکی از آنست که ایجاد تراس‌های و فرورفتگی‌های سرتاسری در بدنه ساختمان می‌تواند تاثیر مثبتی بر جریان باد پیرامونی داشته باشد. مدل A3 با افزایش متوسط سرعت جریان پیرامونی بنا به میزان ۴۶.۶۶ درصد و مدل A1.5 با افزایش ماکزیمم سرعت باد به میزان ۱۶.۸۹ درصد پتانسیل تهویه طبیعی شهری

شکل ۱۲: کانتورهای گرافیکی سرعت جریان در ارتفاع ۱.۵ متر از سطح زمین در مدل‌های A-E و ساختمان صلب



دادند.

- از میان مدل‌های هندسی شبیه‌سازی شده در گام اول پژوهش، مدل A با بالاترین اختلاف مقادیر متوسط و ماکزیمم سرعت جریان با مدل مبنای صلب، به عنوان بهترین گزینه برای افزایش پتانسیل تهویه طبیعی شهری معرفی گردید. مدل B با ساختاری مشابه، مناسب‌ترین گزینه پس از مدل A به شمار می‌آید.

- نتایج مرحله اول شبیه‌سازی‌ها ثابت کرد که توزیع منظم تورفتگی بدنه در ارتفاع ساختمان می‌تواند با تشدید سرعت باد اطراف به تهویه معابر کمک کند. این در حالیست که تمرکز تورفتگی‌ها بر بخش مرکزی ساختمان (مدل C) باعث افت قابل ملاحظه سرعت جریان اطراف ساختمان در مقایسه با مدل صلب می‌شود. این بخش از نتایج با دستاوردهای حاصل از مطالعات دو و همکاران (Du et al., 2018) که تاثیر تخلخل ساختمان بر باد پیرامونی را بررسی می‌کند، هم‌سو می‌باشد.

- بررسی مدل‌سازی‌های مرحله اول ثابت کرد که ایجاد تراس‌های سرتاسری پیرامون بنا به عنوان یکی از تغییرات هندسی ساختمان، تاثیرات مثبتی بر تهویه طبیعی معابر پیرامونی ساختمان دارد. در این راستا شبیه‌سازی‌های مرحله دوم پژوهش تاثیر تغییر ارتفاع تراس‌ها و فرورفتگی‌های بدنه بر پتانسیل تهویه طبیعی شهری را به اثبات رسانید.

- با ایجاد تراس‌های سرتاسری با ارتفاع‌های مختلف، متوسط سرعت اطراف ساختمان در تراز عابر پیاده نسبت به مدل صلب در تمامی حوزه‌های سنجش افزایش یافت. این تغییرات مثبت در منطقه پشت به باد ساختمان بیش‌تر از حوزه رو به باد بنا می‌باشند.

- شبیه‌سازی‌های مرحله دوم نشان داد که سرعت باد پیرامون در تمامی حوزه‌ها نسبت به مدل مبنای افزایش

بررسی تطبیقی کانتورهای گرافیکی (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع تراس‌ها، تغییرات الگوی باد شهری را به دنبال داشته است. می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد تراس‌های سرتاسری باعث هدایت بهتر جریان به اطراف ساختمان و به ویژه مناطق پشت به باد ساختمان شده است. این رفتار آئرودینامیکی شرایط آسایش پیرامونی ساختمان در مقایسه با مدل صلب را بهبود می‌بخشد. از میان ۵ مدل مورد آزمایش A1.5, 2, 3 مدل‌های پیشنهادی برای ارتقا کارایی تهویه طبیعی پیرامونی ساختمان‌ها می‌باشند.

۶. بحث

- نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که ایجاد تغییرات هندسی در فرم ساختمان بلندمرتبه می‌تواند سرعت و الگوی جریان باد شهری را تحت‌الشعاع قرار دهد.

- با ایجاد تغییرات هندسی در ساختمان مبدا، متوسط سرعت باد در تمامی حوزه‌های پیرامونی تفکیک شده اطراف بنا تغییراتی مثبت داشته است. این نتایج با دستاوردهای مطالعات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017)، تسی و همکاران (Tse et al., 2017)، چو و نورفورد (Chew & Norford, 2019)، دو و همکاران (Du et al., 2018) هم‌سو می‌باشد. در این میان، تاثیرات مثبت بر روی منطقه رو به باد بنای هدف کم‌ترین میزان بوده است. این در حالیست که بیش‌ترین تغییرات مثبت بر روی رفتار جریان منطقه پشت به باد ساختمان مشهود است.

- ایجاد شکست در فرم مقطع طولی ساختمان، با انحراف جریان از مسیر مستقیم و هدایت آن به منطقه پشت به باد ساختمان، منجر به افزایش سرعت باد در این حوزه شده است. متوسط و ماکزیمم سرعت جریان در این حوزه رشدی در حدود ۱۹۴.۱۱ و ۱۴۱.۶۶ درصد از خود نشان

ساختمان قادرند در بهترین حالت، متوسط سرعت جریان منطقه پشت به باد و گوشواره‌ها را به میزان ۸۰.۷۰ درصد و ۴۷.۴۵ درصد افزایش دهند. در این میان مدل A3 با ارتفاع ۳ متری فضاهای فرورفته، پتانسیل افزایش ۴۶.۶۶ درصدی متوسط و مدل A1.5 پتانسیل افزایش ۱۶.۸۹ درصدی ماکزیمم سرعت باد پیرامون بنا را از خود نشان دادند.

نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان الگوی کمک طراحی راهنمای عمل معماران در طراحی ساختمان‌هایی باشد که می‌تواند با تشدید و تقویت جریان‌های پیرامونی ساختمان، آسایش غابرین در معابر اطراف بنا در اقلیم‌های گرم را تامین نمایند؛ اما باید در نظر داشت که در کنار مزایای مذکور، استفاده از تراس‌های ممتد در طبقات می‌تواند با تشدید سرعت جریان، علاوه بر ایجاد کوران هوا باعث ایجاد صدای باد آزاردهنده در طبقات فوقانی گردد. از این رو لازم است که در استفاده از این راهکار، تمامی جوانب و شرایط به دقت مورد مطالعه و مد نظر قرار گیرند.

یافته است. هر چند این افزایش در حوزه‌های ۶، ۷ و ۸ (منطقه پشت به باد) بسیار بیش‌تر از سایر مناطق است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که رابطه مشخصی میان تغییرات سرعت پیرامون بنا و ارتفاع تراس‌های ساختمان وجود ندارد. در این میان ساختمان‌هایی با ارتفاع تورفتگی ۱.۵، ۲ و ۳ بدنه نتایج بهتری در مقایسه با ساختمان‌های تراس‌دار با ارتفاع ۲.۵ و ۳.۵ از خود نشان دادند.

- بررسی تطبیقی مجموع مدل‌های شبیه‌سازی شده در هر دو مرحله ثابت کرد که ایجاد تغییرات هندسی و فرم مقطع ساختمان در ترازهای مختلف جریان باد اطراف بنا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این دستاورد با نتیجه پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط تیچریتز و نیکلیلو (Tsichritzis & Nikolopoulou, 2019) و تسی و همکاران (Tse et al., 2017) هم‌سو می‌باشد. با این حال بهترین راه‌کار برای افزایش سرعت جریان باد شهری، ایجاد تغییرات به شکل تورفتگی‌های منظم در کل ارتفاع بنا می‌باشد. تمرکز این شکست فرمی در بخش‌هایی از ساختمان و به ویژه بخش میانی تاثیر منفی بر کارایی تهویه و جریان باد پیرامونی ساختمان دارد.

۷. نتیجه‌گیری

توجه به ملاحظات اقلیمی و رفتار آیرودینامیک ساختمان در کنار مسائل عملکردی و زیبایی‌شناسی در قدم‌های اولیه طراحی معماری امری ضروری است. ساختمان‌های ۹ طبقه‌ی مورد بررسی در گام اول این پژوهش، پنج مدل ساختمان با ساختار هندسی و مقاطع طولی متفاوت بودند. بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های CFD تاثیر مثبت این تغییرات بر ارتقای جریان باد شهری در مقایسه با مدل صلب را به اثبات رسانید. نتیجه این تغییرات افزایش ۴۸.۳۳ درصدی متوسط و ۱۶.۸۹ درصدی ماکزیمم سرعت جریان باد شهری در مقایسه با ساختمان مکعبی ساده (در بهترین حالت) بوده است. تمامی حوزه‌های پیرامونی مدل هدف شاهد رشد مثبت سرعت جریان بودند، اما در این میان منطقه پشت به باد با افزایش ۱۹۴ درصدی متوسط و ۱۴۱ درصدی ماکزیمم سرعت باد بیش‌ترین تغییرات مثبت را داشته است. ایجاد تغییرات فرمی با هدف تشدید جریان معابر اطراف در قالب تورفتگی بدنه باید به شکل توزیع منظم تورفتگی در کل ارتفاع بنا باشد. تمرکز تورفتگی در ارتفاع مشخصی از بنا به ویژه بخش‌های میانی توصیه نمی‌گردد. مرحله دوم پژوهش با تمرکز بر روی ساختمان‌های گروه A به عنوان کارآمدترین مدل مرحله اول، به بررسی نقش تغییر ارتفاع تورفتگی‌های بدنه بر رفتار باد پیرامون بنا پرداخت. نتایج شبیه‌سازی‌های این مرحله نشان داد که ارتباط مستقیمی میان ارتفاع فرورفتگی بدنه، متوسط و ماکزیمم سرعت جریان باد اطراف ساختمان وجود ندارد. این مدل‌ها با بهبود الگوی رفتار باد در ۸ حوزه پیرامون

پی‌نوشت

۱. ساختمان‌هایی که با ارتفاع ۲۷ متر و بیش‌تر یا ساختمانی که تعداد طبقات آن با احتساب همکف، ۸ طبقه و بیش‌تر باشد یا ارتفاع بالاترین کف طبقه قابل بهره‌برداری آن بیش از ۲۳ متر از تراز متوسط زمین باشد، بلندمرتبه نامیده می‌شود.

2. Aynsley

3. Osman

۴. رازجویان در بررسی تاثیر فیزیک بنا بر رفتار آیرودینامیکی، تناسبات ساختمان را در قالب طول مانع و کشیدگی آن رو به باد و نسبت ارتفاع به طول مانع رو به باد بررسی کرده است (رازجویان، ۱۳۸۶).

5. Architectural Institute of Japan

۶. استقلال حل از شبکه به معنای انتخاب بهینه‌ترین شبکه ممکن و ابعاد مش برای دریافت پاسخ‌های صحیح در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز گروه CFD می‌باشد.

7. Structured Hexahedron

۸. تنها مورد استثنا مدل C با کاهش ۳.۲۸ درصدی ماکزیمم سرعت باد نسبت به حالت مبنا بوده است.

فهرست منابع

- رازجویان، محمود. (۱۳۸۶). آسایش در پناه باد. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهیدبهشتی، تهران.
- سلیقه، الهام و سعادت جو، پریا. (۱۳۹۹). بررسی نقش تناسبیات حیاط مرکزی بر سرمایش ایستای ساختمان در اقلیم گرم و مرطوب (نمونه موردی: ساختمان های یک مرتبه شهر بندرعباس). نشریه نقش جهان، ۳(۵).
- زینالی، بتول، کرمی، فیروزه، خالدی، شهریار و اصغری، صیاد. (۱۳۹۶). اثر تراکم بافت بر سرعت جریان باد در محله الهیه شهر تهران. نشریه فضای جغرافیایی، ۵۹(۱۷).
- Ai, Z. T., & Mak, C. M. (2013). CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and near-wall treatment. *Atmospheric Environment*, 77, 568–578. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.034>
- Aliabadi, A. A., Krayenhoff, E., Nazarian, N., Chew, L. W., Armstrong, P., Afshari, A., & Norford, L. (2017). Effects of Roof-Edge Roughness on Air Temperature and Pollutant Concentration in Urban Canyons. *Boundary-Layer Meteorology*, 164. <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0246-1>
- Asfour, O. S. (2010). Prediction of wind environment in different grouping patterns of housing blocks. *Energy and Buildings*, 42(11), 2061–2069. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.015>
- Aynsley, R. (2007). Natural Ventilation in Passive Design. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.7478&rep=rep1&type=pdf>
- Bahadori, M. N. (1994). Viability of wind towers in achieving summer comfort in the hot arid regions of the middle east. *Renewable Energy*, 5(5), 879–892. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90108-2](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90108-2)
- Buccolieri, R., Sandberg, M., & Di Sabatino, S. (2010). City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmospheric Environment*, 44(15), 1894–1903. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.02.022>
- Chen, K. W., & Norford, L. (2017). Evaluating Urban Forms for Comparison Studies in the Massing Design Stage. *In Sustainability*, 6(9). <https://doi.org/10.3390/su9060987>
- Chew, L. W., & Norford, L. K. (2019). Pedestrian-level wind speed enhancement with void decks in three-dimensional urban street canyons. *Building and Environment*, 155, 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.058>
- Cui, D. J., Mak, C. M., Kwok, K. C. S., & Ai, Z. T. (2016). CFD simulation of the effect of an upstream building on the inter-unit dispersion in a multi-story building in two wind directions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 150, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.01.007>
- Dhalluin, A., & Bozonnet, E. (2015). Urban heat islands and sensitive building design – A study in some French cities' context. *Sustainable Cities and Society*, 19, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.009>
- Du, Y., Mak, C. M., Kwok, K., Tse, K. T., Lee, T. cheung, Ai, Z., Liu, J., & Niu, J. (2017). New criteria for assessing low wind environment at pedestrian level in Hong Kong. *Building and Environment*, 123, 23–36. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.036>
- Du, Y., Mak, C. M., Liu, J., Xia, Q., Niu, J., & Kwok, K. C. S. (2017). Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind directions. *Building and Environment*, 117, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.001>
- Du, Y., Mak, C. M., & Tang, B.-S. (2018). Effects of building height and porosity on pedestrian level wind comfort in a high-density urban built environment. *Building Simulation*, 11, 1215–1228. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0451-y>
- Fadl, M. S., & Karadelis, J. (2013). CFD Simulation for Wind Comfort and Safety in Urban Area: A Case Study of Coventry University Central Campus. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 2(2), 131–143. <https://doi.org/10.7492/ijaec.2013.013>
- Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K., & Meno, S. (2009). Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries. *Boundary-Layer Meteorology*, 132(2), 315–337. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9403-5>
- Hang, J., Sandberg, M., & Li, Y. (2009). Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. *Atmospheric Environment*, 43(4), 869–878. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.040>
- Hariri, M. T. R., Khosravi, S. N., & Saadatjoo, P. (2016). The Impact of High-rise Building Form on Climatic Comfort at the Pedestrian Level. *Journal of Architecture and Urban Planning*, 9(17), 61–77.
- Ikegaya, N., Ikeda, Y., Hagishima, A., Razak, A. A., & Tanimoto, J. (2017). A prediction model for wind speed ratios at pedestrian level with simplified urban canopies. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3–4), 655–665. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1655-z>
- Isyumov, N., & Davenport, A. G. L. W. E. in B. (1975). The Ground Level Wind Environment in Built-up Areas. 4th International Conference on Winf Effects on Buildings and Structures.

- Liu, J., Niu, J., & Xia, Q. (2016). Combining measured thermal parameters and simulated wind velocity to predict outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 105, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.038>
- Medhat Osman. (2011). Evaluating and enhancing design for natural ventilation in walk-up public housing blocks in the Egyptian desert climatic design region. University of Dundee.
- Melbourne, W. H. (1978). Criteria for environmental wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 3(2), 241–249. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(78\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0167-6105(78)90013-2)
- Mochida, A., Tominaga, Y., Murakami, S., Yoshie, R., Ishihara, T., & Ooka, R. (2002). Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building - Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. *Wind and Structures An International Journal*, 5, 227–244. https://doi.org/10.12989/was.2002.5.2_3_4.227
- Montazeri, H., Blocken, B., & Hensen, J. L. M. (2015). Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 83, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.022>
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 197–228. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.05.002>
- NajafKhosravi, S., Saadatjoo, P., Mahdavinejad, M., & Amindeldar, S. (2016). The effect of roof details on natural ventilation efficiency in isolated single buildings. *PLEA 2016 - Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments*.
- Ng, E., YUAN, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004>
- Rose, L., Horrison, E., & Lavanya Jothi Venkatachalam. (2011). Influence of Built Form on the Thermal Comfort of Outdoor Urban Spaces. *The 5th International Conference of the International Forum on Urbanism (IFoU)*, Oke 1987.
- Saadatjoo, P., Mahdavinejad, M., Khosravi, S. N., & Kaveh, N. (2016). Effect of Courtyard Proportion on Natural Ventilation efficiency. 5, 92–97.
- Saadatjoo, P., Mahdavinejad, M., & Zarkesh, A. (2019). Porosity Rendering in High-Performance Architecture : Wind-Driven Natural Ventilation and Porosity Distribution Patterns. 12(26), 73–87. <https://doi.org/10.22034/AAUD.2019.89057>
- Saadatjoo, P., Mahdavinejad, M., & Zhang, G. (2018). A study on terraced apartments and their natural ventilation performance in hot and humid regions. *Building Simulation*, 11(2), 359–372. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0407-7>
- Saadatjoo, P., Mahdavinejad, M., Zhang, G., & Vali, K. (2021). Influence of permeability ratio on wind-driven ventilation and cooling load of mid-rise buildings. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102894. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102894>
- Saadatjoo, P., & Saligheh, E. (2021). The Role of Buildings Distribution Pattern on Outdoor Airflow and Received Daylight in Residential Complexes; Case study: Residential Complexes in Tehran. *Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 11(3), 67–92. <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-50471-en.html>
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10–11), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Tsang, C. W., Kwok, K. C. S., & Hitchcock, P. A. (2012). Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Building and Environment*, 49, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.014>
- Tse, K. T., Zhang, X., Weerasuriya, A. U., Li, S. W., Kwok, K. C. S., Mak, C. M., & Niu, J. (2017). Adopting ‘lift-up’ building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment. *Building and Environment*, 117, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.011>
- Tschritzis, L., & Nikolopoulou, M. (2019). The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>
- Uematsu, Y., & Isyumov, N. (1999). Wind pressures acting on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00036-7)
- Willemsen, E., & Wisse, J. A. (2007). Design for wind comfort in The Netherlands: Procedures, criteria and open research issues. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9), 1541–1550. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.02.006>
- Wu, Y., Niu, J., & Liu, X. P. (2017). Air infiltration induced inter-unit dispersion and infectious risk assessment in a high-rise residential building. *Building Simulation*, 11. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0388-6>

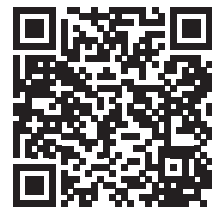
- Xu, X., Yang, Q., Yoshida, A., & Tamura, Y. (2017). Characteristics of pedestrian-level wind around super-tall buildings with various configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 166, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.013>
- Yim, S. H. L., Fung, J. C. H., Lau, A. K. H., & Kot, S. C. (2009). Air ventilation impacts of the “wall effect” resulting from the alignment of high-rise buildings. *Atmospheric Environment*, 43(32), 4982–4994. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.002>
- Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities - A computational parametric study. *Building and Environment*, 50, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.023>
- Zhang, X., Tse, K. T., Weerasuriya, A. U., Li, S. W., Kwok, K. C. S., Mak, C. M., Niu, J., & Lin, Z. (2017). Evaluation of pedestrian wind comfort near ‘lift-up’ buildings with different aspect ratios and central core modifications. *Building and Environment*, 124, 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.012>
- Zheng, X., Montazeri, H., & Blocken, B. (2020). CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES. *Building and Environment*, 173, 106747. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106747>

نحوه ارجاع به این مقاله

سعادت‌جو، پریا. (۱۴۰۰). بررسی تاثیر تورفتگی بدنه ساختمان بر عملکرد جریان باد شهری. نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر، ۱۴(۳۷)، ۴۵-۶۳.

DOI: 10.22034/AAUD.2021.241309.2270

URL: http://www.armanshahrjournal.com/article_147105.html



COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Armanshahr Architecture & Urban Development Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



