ISSN: 2538-4384; Geographical Researches. 2022;37(4):409-416. DOI: 10.29252/geores.37.4.409

Analysis of the Effect of Urban Block Morphology on Wind Flow

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Ghobadi P.[1] *MSc,*
Maleki A.[1]* *PhD,*
Aali S.A.[1] *MSc*

How to cite this article
Ghobadi P, Maleki A, Aali S A. Analysis of the Effect of Urban Block Morphology on Wind Flow. Geographical Researches. 2022;37(4): 409-416.

[1]Department of Architecture and Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran

***Correspondence**
Address: Faculty of Architecture and Urban Planning, Islamic Art University of Tabriz, Tabriz, Iran. Postal Code: 5137753497
Phone: +98 (41) 35541812
Fax: +98 (41) 35539200
a.maleki@tabriziau.ac.ir

Article History
Received: July 27, 2022
Accepted: October 28, 2022
ePublished: December 8, 2022

ABSTRACT

Aims Paying attention to air flow in urban spaces is one of the most important criteria for designing space and improving thermal comfort and air quality in cities, which depending on their climatic conditions can increase the desirability and presence of people in urban spaces. This research aimed to investigate the effect of foure factors related to the morphology of urban blocks (enclosure, block volume, building density, and sky visibility factor) on changes in wind speed and air flow in urban corridors.

Methodology The research method is applied in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. To achieve the goal of the research, a hypothetical area was considered, and a three-dimensional simulation of an arrangement model of urban blocks in different heights (1-15 floors) was conducted by Envi-met software. The wind entering the area was considered at two different angles: zero and 45 degrees. To determine the intensity of correlation between independent and dependent variables, the regression method was used.

Findings Analysis of the simulations showed that with the increase in block heights, the average wind speed and the formation of wind tunnels in the corridors increase at an angle of 0 and 45 degrees.

Conclusion The average wind speed in building blocks parallel to the wind direction, is 20-30% higher than when the buildings are placed at an angle to the wind. Also, the wind speed is directly related to the enclosure, the block volume and the building density and inversely related with the sky view factor.

Keywords Morphology; Envi-met; Wind Speed; Volume of Blocks

CITATION LINKS

[Aali A, et al; 2017] Optimum form ...; [Sciurpi F, et al; 2017] Environmental monitoring ...; [Banerjee S, et al; 2022] Analysing impacts ...; [Babaei Foroushani Z, Changelavayi Y; 2020] The effect of ...; [Baghaei daemi A, et al; 2019] Simulation of flow ...; [Bayat A, Bemanian MR; 2021] Analysis of the ...; [Edussuriya P, et al; 2011] Urban morphology ...; [Javanroodi K, et al; 2022] Combining computational ...; [Feng W, et al; 2021] Effects of traditional ...; [Hesami S; 2018] Investigating the ...; [Javanroodi K, Nik VM; 2020] Interactions between ...; [Juan YH, et al; 2021] Impacts of urban ...; [Ku CA, Tsai HK; 2020] Evaluating the ...; [Li M, et al; 2019] CFD simulation ...; [Maleki A, et al; 2021] Analysis of spatiotemporal ...; [Maleki A, et al; 2016] An introduction of ...; [Peng Y, et al; 2019] An investigation of ...; [Rezaiee Hariri M, et al; 2016] The Impact of ...; [Robinson D, editor; 2012] Computer modelling ...; [Saadatjoo P, Saligheh E; 2021] The role of buildings ...; [Vakili Nejad R; 2021] Comparative comparison ...; [Van de Graaf T; 2014] International energy ...; [Wang B, et al; 2022] Urban form study ... [Wang B, et al; 2018] Wind potential ... [Yao JW, et al; 2017] Urban renewal ... [Zhang H; 2021] The relationship between ...

Copyright© 2022, the Authors | Publishing Rights, ASPI. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

واکاوی تاثیر مورفولوژی بلوک‌های شهری بر سرعت باد

پریسا قبادی MSc
گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
آیدا ملکی PhD
گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
سیدعلیرضا عالی MSc
گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

چکیده

اهداف: توجه به جریان هوا در فضای‌های شهری یکی از مهم‌ترین معیارهای طراحی فضا و ارتقای آسایش حرارتی و کیفیت هوا در شهرهاست که بسته به شرایط اقلیمی می‌تواند به افزایش مطلوبیت و حضورپذیری افراد در فضاهای شهری بیانجامد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی چگونگی تاثیر چهار فاکتور مرتبط با مورفولوژی بلوک‌های شهری یعنی محصوریت، حجم بلوک‌ها، تراکم ساختمانی و ضریب دید به آسمان بر تغییرات سرعت باد و جریان هوا در کریدورهای شهری بود.

روش‌شناسی: این تحقیق از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، توصیفی- تحلیلی است. در این راستا به‌منظور دست‌یابی به هدف پژوهش، یک محدوده فرضی در نظر گرفته شد و شبیه‌سازی سه‌بعدی یک مدل چینش بلوک‌های شهری در ارتفاع‌های مختلف (از یک تا ۱۵ طبقه) به کمک نرم‌افزار انویمت انجام پذیرفت. باد ورودی به محدوده در دو زاویه مختلف صفر و ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. به‌منظور مشخص‌کردن شدت همبستگی میان متغیرهای مستقل و وابسته، از روش رگرسیون استفاده شد.

یافته‌ها : تحلیل شبیه‌سازی‌ها نشان داد با افزایش ارتفاع بلوک‌ها، سرعت میانگین باد و به تبع آن تشکیل تونل‌های بادی در کریدورها در زاویه صفر و ۴۵ درجه افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: سرعت میانگین وزش باد در بلوک‌های ساختمانی موازی با جهت باد ۲۰ تا ۳۰% نسبت به زمانی که ساختمان‌ها نسبت به وزش باد زاویه‌دار قرار گرفته‌اند بیشتر است و سرعت باد با محصوریت، حجم بلوک‌ها، تراکم ساختمانی رابطه مستقیم و با ضریب دید به آسمان رابطه معکوس دارد.

کلیدواژگان: مورفولوژی، انویمت، سرعت باد، حجم بلوک‌ها

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶
*نویسنده مسئول: a.maleki@tabriziau.ac.ir

مقدمه

در طول تاریخ، انسان همواره به واسطه شهرنشینی محیط اقلیمی خود را تغییر داده است. یک شهر دارای تعداد نامتناهی ریزاقلیم است که با ساختارهای آن ارتباط تنگاتنگی دارد. این سیستم شهری-جوی به یکدیگر وابسته است و نمی‌توان با اقلیم، مستقل از شهر رفتار کرد. درک اقلیم‌های کوچک ایجادشده توسط بلوک‌های شهری می‌تواند به برنامه‌ریزی و طراحی شهرهای جدید یا توسعه مجدد شهرهای قدیمی کمک کند [Aali *et al.*, 2017]. طراحی مناسب بلوک‌های شهری می‌تواند به ایجاد جریان باد و تهویه طبیعی در کریدورهای شهری کمک کرده و از مشکلات شهری نظیر حبس آلاینده‌ها، تشدید آلودگی هوا و ایجاد جزایر گرمایی که امروزه به واسطه طراحی نامناسب شاهد آن هستیم پیشگیری نماید. از ۴۰ سال پیش، تقاضای انرژی از ساختمان‌ها (شامل ساختمان‌های مسکونی و تجاری) ۱/۸% در سال افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود از ۲۷۹۰ میلیون تن نفت در سال ۲۰۱۰ به بیش از ۴۴۰۰ میلیون تن نفت تا سال ۲۰۵۰ افزایش یابد. بیشتر این افزایش مربوط به کشورهای در حال توسعه است [Van de Graaf, 2014] که درک درست از ارتباط مورفولوژی و رفتار باد می‌تواند این میزان تقاضا را کاهش دهد و از اسراف منابع جلوگیری کند.

تعدادی از عوامل مرتبط با اقلیم از جمله سن، شیوه سوخت و ساز بدن و نوع پوشش افراد را نمی‌توان از طریق طراحی شهری و برنامه‌ریزی کالبدی و فرمی محیط تغییر داد و بر آنها اثر گذاشت، اما مواردی همچون گردش جریان هوا و رفتار باد مواردی هستند که به کمک ابزارهای طراحی شهری و برنامه‌ریزی می‌توان در آنها دخالت نمود و در مسیر ایجاد حالت بهینه به کار بست. پس می‌توان گفت که حل مسایل موجود اقلیم شهری و روبه‌روشدن با چالش‌های پیش روی ناشی از تغییرات آب و هوایی منوط به طراحی فضاهای شهری همخوان با اقلیم است. این در حالی است که فاکتورهای مرتبط با مورفولوژی شهری که تاثیر قابل توجهی بر حرکت جریان باد و درنتیجه آسایش اقلیمی شهر دارد مورد بی‌توجهی قرار گرفته است [Hesami, 2018]. مطالعه باد در فضای باز بسیار حیاتی و یک پیش‌نیاز در شهرهای پرتراکم است [Yao *et al.*, 2017].

پژوهش‌های مختلفی پیرامون بحث مدنظر انجام شده که از جمله پژوهش‌های خارجی صورت‌گرفته، ارزیابی باد با استفاده از شبیه‌سازی عددی در مقیاس شهری توسط پنگ و همکاران [Peng *et al.*, 2019] است. آنها در پژوهش خود به بررسی همبستگی کمی میان دو پارامتر مورفولوژی شهری، یعنی نسبت مساحت (FAR) و پوشش محل ساختمان (BSc) و شش شاخص تهویه شهری پرداختند که نتایج نشان داد عملکرد تهویه محلی را می‌توان با چیدمان منطقی ساختمان‌ها به‌طور موثر بهبود بخشید. تحقیق پیرامون رابطه بین نسبت سرعت باد در سطح عابر پیاده و تراکم بلوک‌های ساختمانی سنتی، نسبت سطح کف، ارتفاع ساختمان، درجه محصوریت، نسبت ابعاد و ضریب دید به آسمان (SVF) در منطقه سرد توسط فنگ و همکاران [Feng *et al.*, 2021] انجام شده که می‌تواند مرجعی برای نوسازی بلوک‌های سنتی در کشورها و شهرهای هم‌عرض جغرافیایی باشد. ادوسوریا و همکاران [Edussuriya *et al.*, 2011] تعداد زیادی شاخص تجزیه و تحلیل را با استفاده از مجموع ۲۱ شاخص برای تجزیه و تحلیل رابطه بین انتشار آلاینده‌های هوا و مورفولوژی شهری در ۲۰ محله هنگ‌کنگ اتخاذ کردند.

در ایران نیز بابایی فروشانی و چنگلوایی به بررسی پتانسیل انرژی بادی در شهر با استفاده از تحقیقات روی مورفولوژی شهری در سه پیکره‌بندی شهری (سنتی، شطرنجی و بلندمرتبه گسسته) در شهر

اصفهان پرداختند. در این تحقیق به کمک شبیه‌سازی عددی سرعت و جهت باد، شاخص‌های مورفولوژیک شهری با شاخص بالقوه جریانات باد همبستگی معنی‌داری داشتند و به کمک این شاخص‌های مورفولوژیک می‌توانیم به‌طور دقیق، خروجی جریانات انرژی باد روی بافت‌های مختلف شهری را با توجه به رویکرد انرژی کارا مقایسه کنیم. همچنین در این پژوهش با توجه به پژوهش‌های مختلف در مورد ارزیابی باد در بافت شهری، به کشف تاثیر پارامترهای مختلف مورفولوژیکی فیزیکی شهری در مقیاس همسایگی یا مقیاس شهری رسیدند [Babaei & Changelavayi, 2020].

در این راستا می‌توان به نتایج پژوهش بیات و بمانیان در زمینه ارایه راهکارهای طراحی ساختمان (رعایت ارتفاع مناسب ساختمان‌ها نسبت به فاصله بین آنها، قرارگیری ساختمان‌ها هماهنگ با باد غالب و مسیر تهویه، پیلوتی کردن ساختمان‌ها، استفاده از برج‌های خنک‌کننده مانند آتریوم و بادگیر) و پژوهش جان‌پناه و فخر مدین در زمینه خارج کردن دودهای گرم در قسمت بالاتری از ساختمان دودکش و راهکارهای طراحی منظر (قرارگیری درخت‌ها هماهنگ با باد و مسیر تهویه، استفاده از دیواره‌های با امکان جریان باد، جریان باد مرطوب و استفاده از بتن و مصالح متخلخل) اشاره کرد که هماهنگی با جریان باد و امکان جریان تهویه را فراهم می‌نماید [Bayat & Bemanian, 2021]. با این حال، هنوز تحقیقات محدودی در مورد ارزیابی اثرات مولفه‌های مورفولوژی بر رفتار باد وجود دارد. سعادت‌جو و سلیقه در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که جابه‌جایی تک‌محوری بلوک‌ها می‌تواند اثرات منفی یا مثبت بر جریان باد فضای باز داشته باشد، اما جابه‌جایی ترکیبی موجب انسداد جریان باد و کاهش سرعت آن می‌شود. جابه‌جایی تک‌محوری و ترکیبی در تمامی حالت‌ها میزان نور دریافتی بالاتری در مقایسه با حالت پایه دارد [Saadatjoo & Saligheh, 2021].

همان‌گونه که از مطالعات پیشین مشهود است پرداختن به مقوله مورفولوژی و فاکتورهای مرتبط با آن و ارتباط آنها با تغییرات سرعت باد و جریان هوا در کریدورهای شهری مبحثی است که کمتر بدان پرداخته شده است. در این تحقیق پژوهشگران سعی دارند به این مبحث بپردازند و بخشی از این خلأ مطالعاتی را پر کنند. هدف پژوهش حاضر، درک میزان تاثیر چهار فاکتور مرتبط با مورفولوژی بلوک‌های شهری یعنی محصوریت، حجم بلوک‌ها، تراکم ساختمانی و ضریب دید به آسمان [Javanroodi *et al.*, 2022; Maleki *et al.*, 2021; Banerjee *et al.*, 2022] بر سرعت باد و جریان هوا در کریدورهای شهری بود.

روش‌شناسی

انتخاب نرم‌افزار شبیه‌سازی

مطالعات مربوط به باد و نحوه جریان هوا در فضاهای مختلف به کمک یکی از دو مدل فیزیکی یا کامپیوتری انجام می‌شود که مدل‌های کامپیوتری به علت دقت بالاتر نسبت به هزینه کمتر کاربرد بیشتری دارند [Robinson, 2012]. در این مطالعه به علت عدم دسترسی به تونل باد، بررسی به کمک مدل‌های کامپیوتری و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی CFD انجام شد. ابتدا نرم‌افزارهای پرکاربرد و ویژگی‌های آنها به شرح جدول ۱ گردآوری و بررسی شد [Zhang, 2021; Maleki *et al.*, 2016; Vakili Nejad, 2021; Sciurpi *et al*, 2017].

جدول ۱) معرفی نرم‌افزارها در زمینه باد

نرم‌افزار کامپیوتری	نوع ارزیابی	مقیاس عملکردی
پروجکت واساری	تحلیل تونل باد و شبیه‌سازی مصرف انرژی	منطقه شهری
نرم‌افزار استو	ارزیابی وضعیت محیط زیست	منطقه شهری
تحلیل دینامیکی سیالات محاسباتی	شبیه‌سازی باد	منطقه شهری
انویمت	مدل سه‌بعدی خرداقلیم	منطقه شهری
ارباویند	شبیه‌سازی سه‌بعدی باد	منطقه شهری
سولن	مدل سه‌بعدی خرد اقلیم	خرداقلیم منطقه شهری
انسیس فلوئنت	شبیه‌سازی سه‌بعدی باد	ساختمان‌ها و گروه‌های ساختمانی
اتودسک فلودیزاین	شبیه‌سازی سه‌بعدی باد	ساختمان‌ها و گروه‌های ساختمانی

از آنجایی که این مطالعه بر ملاحظات میکرواقلیم شهری در عملکرد فرم شهری متمرکز است، پس از بررسی نرم‌افزارهای فوق مشخص شد که نرم‌افزار انویمت پارامترهای مورد نیاز بیشتری را برای انجام ارزیابی شبیه‌سازی ریزاقلیم شهری مانند رطوبت، جریان باد، دمای بیرون و سایر ویژگی‌های آب و هوایی در اختیار قرار می‌دهد [Aali *et al.*, 2017] و از آنجایی که قدرت و دقت شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار انویمت به دلیل تمرکز و طراحی این نرم‌افزار در رشته شهرسازی بیشتر از نرم‌افزارهای دیگر است و مستندات دقیق‌تری در اختیار محققان قرار می‌دهد، با انجام مقایسه ساختاریافته، این نتیجه حاصل شد که انویمت نرم‌افزار مناسبی برای دست‌یابی به اهداف این مطالعه است. به همین ترتیب، با توجه به ملاحظاتی که قبلاً برجسته شد و دامنه مطالعه، انویمت به‌عنوان مدل کامپیوتری مناسب برای انجام ارزیابی فرم شهری با استفاده از پارامترهای میکرواقلیم شهری انتخاب شد. ورودی‌های نرم‌افزار به دو دسته تقسیم شدند:

۱) اطلاعات آب و هوایی مانند دما، جهت و سرعت باد و رطوبت و زبری سطح که می‌توانند بر جریان باد موثر باشند (جدول ۲)

۲) مدل فیزیکی طرح که شامل ابعاد زمین، ابنیه و متریال‌هاست که تصمیم گرفته شد تمام ساختمان‌ها با متریال بتنی (به‌عنوان

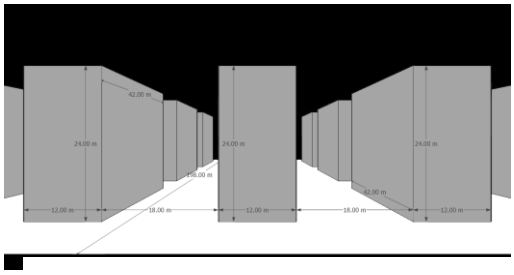
مصالح معمول) در نظر گرفته شوند تا در همه مدل‌ها مصالح یکسان باشد تا بتوانیم درک بهتری از نحوه عملکرد رفتار باد داشته باشیم.

جدول ۲) داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی با استفاده از انویمت

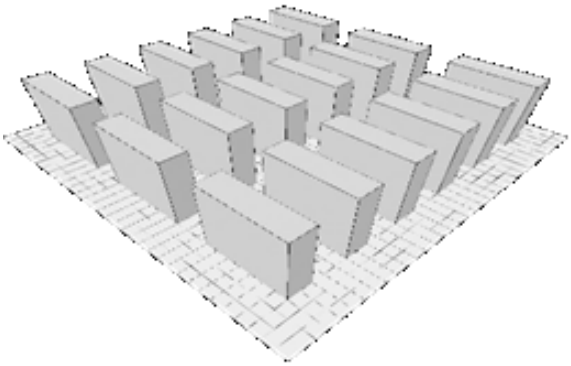
داده‌های ورودی	
دما	۳۰ درجه سانتی‌گراد
رطوبت نسبی	۵۰%
سرعت باد	۵ متر بر ثانیه
جهت باد	صفر درجه؛ ۴۵ درجه
رطوبت در ۲۵۰۰ متر	۸
زبری	۰/۰۱
زمان شروع شبیه‌سازی	۱۰ صبح
کل زمان شبیه‌سازی	۳ ساعت (۱۰ صبح تا ۱ ظهر)
ضریب تنظیم موج کوتاه	۱
موقعیت روی زمین	طول جغرافیایی: ۴۶/۳۰ درجه؛ عرض جغرافیایی: ۳۸/۰۵ درجه

فرآیند شبیه‌سازی

در این مطالعه، به‌منظور کنترل عوامل مداخله‌گر و بررسی دقیق‌تر، یک نوع چینش بلوک‌های مسکونی در ۱۵ ارتفاع مختلف و اثر آنها بر سرعت باد مورد واکاوی قرار گرفت. مدل شبیه‌سازی یک محدوده فرضی به اندازه ۱۹۸×۱۹۸ متر مربع را نشان می‌دهد. در شکل ۱ ابعاد درنظرگرفته‌شده برای بلوک‌ها و معابر و در شکل ۲ نمونه‌ای از مدل‌سازی سه‌بعدی بلوک‌ها در ارتفاع ۱۴ طبقه قابل مشاهده است. برای دقت و بهبود نتایج، تصمیم گرفته شد که حداقل ۱۸ متر از هر طرف به اطراف بلوک‌های آخر اضافه شود و اندازه هر طبقه ۳ متر برای شبیه‌سازی انتخاب شد. جهت باد ورودی به محدوده نیز در دو حالت موازی و مایل (صفر و ۴۵ درجه) در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب زاویه صفر درجه به این جهت بود که وزش باد به‌صورت موازی در زاویه صفر درجه مشابه زوایای ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه است که در این حالات باد به‌صورت عمودی به بدنه بلوک‌ها برخورد کرده و به‌صورت موازی از کریدورهای بین بلوک‌ها می‌گذرد. بنابراین از زوایای ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه به جهت شرایط مشابه با صفر درجه چشم پوشی شد و مورد ارزیابی قرار نگرفتند. زاویه ۴۵ درجه نیز به‌عنوان نماینده‌ای از برخورد باد با زاویه به بلوک‌هاست. همچنین در کلیه مدل طول بلوک ۴۲ متر، عرض بلوک ۱۲ متر و عرض معبر ۱۸ متر در نظر گرفته شد و ارتفاع مورد تحلیل نیز با توجه به شرایط انسانی ۱/۸ متر انتخاب شد. جدول ۳ اطلاعات کامل مرتبط با بلوک‌ها در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱) ابعاد درنظرگرفته‌شده برای بلوک‌ها و معابر



شکل ۲) مدل سه‌بعدی در ارتفاع ۱۴ طبقه

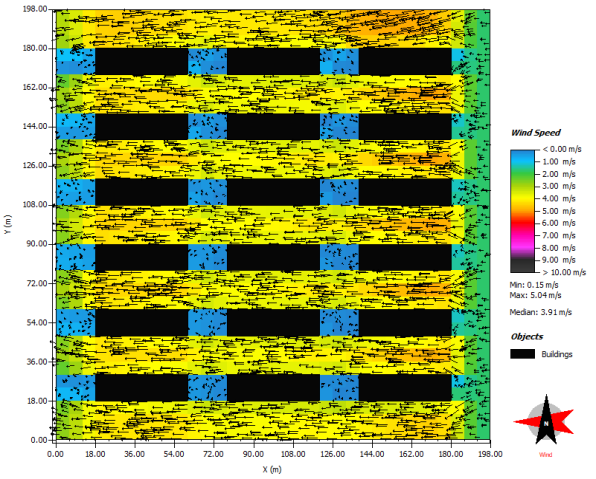
جدول ۳) اطلاعات کامل مرتبط با بلوک‌ها در مدل‌سازی

ارتفاع بلوک (متر)	مساحت ناخالص طبقه (متر مربع)	تعداد طبقات
۶	۱۸۱۴۴	۲
۹	۲۷۲۱۶	۳
۱۲	۳۶۲۸۸	۴
۱۵	۴۵۳۶۰	۵
۱۸	۵۴۴۳۲	۶
۲۱	۶۳۵۰۴	۷
۲۴	۷۲۵۷۶	۸
۲۷	۸۱۶۴۸	۹
۳۰	۹۰۷۲۰	۱۰
۳۳	۹۹۷۹۲	۱۱
۳۶	۱۰۸۸۶۴	۱۲
۳۹	۱۱۷۹۳۶	۱۳
۴۲	۱۲۷۰۰۸	۱۴
۴۵	۱۳۶۰۸۰	۱۵

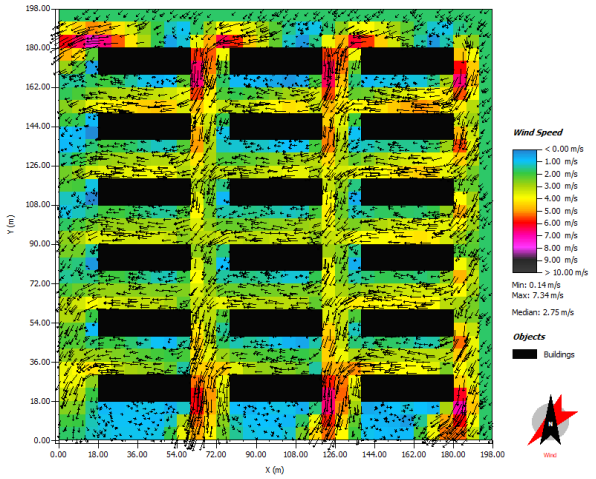
یافته‌ها

در این پژوهش با ثابت نگه‌داشتن بقیه اجزا و تمرکز بر چهار فاکتور مورفولوژی بلوک‌های شهری، میزان سرعت باد و تغییرات آن تحلیل شد. شکل‌های ۳ و ۴ دو نمونه از خروجی نرم‌افزار انویمت برای مدل‌سازی دو حالت وزش باد با زاویه صفر و ۴۵ درجه را نشان می‌دهند. شکل ۳ نشان‌دهنده این است که وزش باد در کریدورهای موازی با جهت باد، به‌صورت آزادانه اتفاق افتاده است و سرعت باد گاهی به‌وسیله بدنه کریدور تقویت شده و از سرعت ورودی داده‌شده به سایت بیشتر بوده، اما در کریدورهای عمود، وزش باد کم است و سرعت باد کاهش یافته و گاهی نزدیک به صفر بوده است؛ به این معنا که در پشت ساختمان‌ها نقاطی وجود دارد که وزش باد در آنها اتفاق نیفتاده است. در شکل ۴ که نمونه‌ای از وزش باد با زاویه ۴۵ درجه است، پس از برخورد باد به یک گوشه از بلوک ساختمانی، باد به دو جهت شکسته شده و در امتداد دیواره بلوک جریان پیدا کرده است و این شکستگی باعث افزایش سرعت باد در قسمت‌های انتهایی بلوک شده است. وزش اصلی باد در جداره شمالی و شرقی بلوک‌ها اتفاق افتاده است. همچنین در جبهه‌هایی از بلوک‌ها که

باد به‌صورت مستقیم برخورد نکرده مشاهده شده که سرعت باد به‌شدت کم است (قسمت‌هایی که آبی‌رنگ است).



شکل ۳) خروجی انویمت در ارتفاع ۱۴ طبقه با جهت باد صفر درجه



شکل ۴) خروجی انویمت در ارتفاع ۱۴ طبقه با جهت باد ۴۵ درجه

در جدول ۴ داده‌های مرتبط با فاکتورهای مورفولوژی و میانگین سرعت باد ارایه شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است با افزایش ارتفاع بلوک‌ها، سرعت میانگین باد و به تبع آن تشکیل تونل‌های بادی در کریدورها در زاویه صفر درجه افزایش یافته که این امر متناسب با فصل مورد نظر است، به‌عنوان مثال در تابستان، افزایش آسایش اقلیمی در مناطق گرمسیر و در فصل زمستان کاهش آسایش اقلیمی در مناطق سردسیر را به ارمغان آورده است. مشابه همین الگو در زاویه ۴۵ درجه هم اتفاق افتاده است و به‌صورت کلی شاهد افزایش سرعت میانگین باد در محدوده فرضی بودیم. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان داد با افزایش سه فاکتور محصوریت، حجم ساخته‌شده و تراکم ساختمانی که ارتباط مستقیمی با ارتفاع بلوک‌ها و تعداد طبقات دارد، سرعت باد نیز افزایش پیدا کرده است.

اما فاکتور ضریب دید به آسمان رابطه معکوس با سرعت میانگین باد دارد. در قیاس جهت باد در دو زاویه ۴۵ و صفر درجه، می‌توان این‌گونه بیان کرد که در وزش باد با زاویه ۴۵ درجه، حداقل سرعت میانگین ۱/۹۵ متر بر ثانیه و حداکثر ۳/۰۱ متر بر ثانیه است و در صفر درجه، حداقل ۲/۵۵ و حداکثر ۴/۱۳ متر بر ثانیه است. این اعداد و ارقام بیانگر این موضوع هستند که بلوک‌های ساختمانی اگر موازی با جهت باد ساخته شوند سرعت میانگین وزش باد حدود ۱/۵ متر بر ثانیه نسبت به زمانی که ساختمان‌ها نسبت به وزش باد زاویه‌دار قرار گرفته‌اند بیشتر است که این امر نشان‌دهنده میزان قدرت ساختمان‌ها در شکست باد و کنترل تونل باد است.

جدول ۴) داده‌های مرتبط با فاکتورهای مورفولوژی و میانگین سرعت باد

ارتفاع بلوک	سرعت میانگین باد	محصوریت	حجم	ضریب دید به آسمان	تراکم ساختمانی
وزش باد با زاویه ٤٥ درجه					
٣	٢/١	٠/١٦٦٦	٢٧٢١٦	٠/٩٧	٠/٢٣١٤
٦	١/٩٥	٠/٣٣٣٣	٥٤٤٣٢	٠/٨٧	٠/٤٦٢٨
٩	٢	٠/٥	٨١٦٤٨	٠/٧٦	٠/٦٩٤٢
١٢	٢/٠٢	٠/٦٦٦٦	١٠٨٨٦٤	٠/٧	٠/٩٢٥٦
١٥	٢/١٣	٠/٨٣٣٣	١٣٦٠٨٠	٠/٦٤	١/١٥٧٠
١٨	٢/١٦	١	١٦٣٢٩٦	٠/٥٩	١/٣٨٨٤
٢١	٢/٢٩	١/١٦٦٦	١٩٠٥١٢	٠/٥٥	١/٦١٩٨
٢٤	٢/٣٣	١/٣٣٣٣	٢١٧٧٢٨	٠/٥١	١/٨٥١٢
٢٧	٢/٥	١/٥	٢٤٤٩٤٤	٠/٤٧	٢/٠٨٢٦
٣٠	٢/٥٥	١/٦٦٦٦	٢٧٢١٦٠	٠/٤٥	٢/٣١٤٠
٣٣	٢/٧٢	١/٨٣٣٣	٢٩٩٣٧٦	٠/٤٣	٢/٥٤٥٤
٣٦	٢/٥٩	٢	٣٢٦٥٩٢	٠/٤١	٢/٧٧٦٨
٣٩	٢/٧٦	٢/١٦٦٦	٣٥٣٨٠٨	٠/٤	٣/٠٠٨٢
٤٢	٢/٨٥	٢/٣٣٣٣	٣٨١٠٢٤	٠/٣٨	٣/٢٣٩٦
٤٥	٣/٠١	٢/٥	٤٠٨٢٤٠	٠/٣٧	٣/٤٧١٠
وزش باد با زاویه صفر درجه					
٣	٢/٥٥	٠/١٦٦٦	٢٧٢١٦	٠/٩٧	٠/٢٣١٤
٦	٢/٥٧	٠/٣٣٣	٥٤٤٣٢	٠/٨٧	٠/٤٦٢٨
٩	٢/٧٢	٠/٥	٨١٦٤٨	٠/٧٦	٠/٦٩٤٢
١٢	٢/٧٤	٠/٦٦٦٦	١٠٨٨٦٤	٠/٧	٠/٩٢٥٦
١٥	٢/٩	٠/٨٣٣٣	١٣٦٠٨٠	٠/٦٤	١/١٥٧٠
١٨	٢/٩٤	١	١٦٣٢٩٦	٠/٥٩	١/٣٨٨٤
٢١	٣/١	١/١٦٦٦	١٩٠٥١٢	٠/٥٥	١/٦١٩٨
٢٤	٣/١٥	١/٣٣٣٣	٢١٧٧٢٨	٠/٥١	١/٨٥١٢
٢٧	٣/٣٢	١/٥	٢٤٤٩٤٤	٠/٤٧	٢/٠٨٢٦
٣٠	٣/٣٨	١/٦٦٦٦	٢٧٢١٦٠	٠/٤٥	٢/٣١٤٠
٣٣	٣/٥٦	١/٨٣٣٣	٢٩٩٣٧٦	٠/٤٣	٢/٥٤٥٤
٣٦	٣/٦٤	٢	٣٢٦٥٩٢	٠/٤١	٢/٧٧٦٨
٣٩	٣/٨٤	٢/١٦٦٦	٣٥٣٨٠٨	٠/٤	٣/٠٠٨٢
٤٢	٣/٩١	٢/٣٣٣٣	٣٨١٠٢٤	٠/٣٨	٣/٢٣٩٦
٤٥	٤/١٣	٢/٥	٤٠٨٢٤٠	٠/٣٧	٣/٤٧١٠

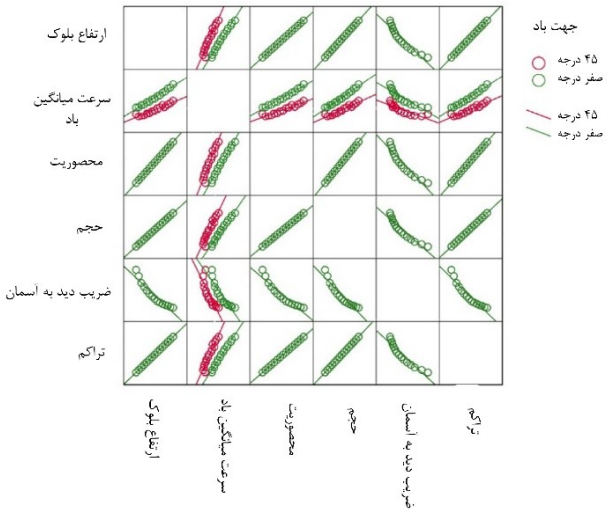
جدول ۵ ، میزان همبستگی میان متغیرها و سرعت باد در دو زاویه مدنظر وزش باد را نشان داده است. عدد شدت ارتباط هرچه به یک نزدیک‌تر باشد یعنی ارتباط بیشتری دارند که در جدول به‌غیر از فاکتور ضریب دید به آسمان، شدت ارتباط بقیه متغیرها معنی‌دار است. همچنین سطح معنی‌داری که کمتر از ۰/۰۰۵ است بیانگر ارتباط معنی‌دار است.

همان‌گونه که در نمودار ۱ قابل مشاهده است فاکتورهای ارتفاع بلوک، محصوریت، حجم و تراکم، رابطه خطی با سرعت میانگین باد داشتند.

جدول ۵) همبستگی میان متغیرهای مستقل و وابسته در زاویه ۴۵ و صفر درجه وزش باد

متغیر	sig	t	ضرایب استاندارد Beta	ضرایب غیراستاندارد انحراف از معیار	ضرایب غیراستاندارد B	سطح معنی‌داری	شدت ارتباط
وزش باد با زاویه ٤٥ درجه							
ضریب تغییر	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۷/۴۹۲	۰/۹۶۸	۰/۰۴۸	۱/۸۰۸	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۶۸
ارتفاع بلوک	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۱۳/۸۷۴		۰/۰۰۲	۰/۰۲۵		
محصوریت	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۷/۴۹۲	۰/۹۶۸	۰/۰۴۸	۱/۸۰۸	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۶۸
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۱۳/۸۷۴		۰/۰۳۲	۰/۴۴۲		
حجم	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۷/۴۹۲	۰/۹۶۸	۰/۰۴۸	۱/۸۰۸	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۶۸
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۱۳/۸۷۴		۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۲۷۰۵		
ضریب دید به آسمان	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۲۱/۹۶۹	-۰/۸۶۷	۰/۱۵۰	۳/۲۹۳	کمتر از ۰/۰۰۰۱	-۰/۸۶۷
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	-۶/۲۷۲		۰/۲۵۲	-۱/۵۸۱		
تراکم ساختمانی	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۷/۴۹۲	۰/۹۶۸	۰/۰۴۸	۱/۸۰۸	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۶۸
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۱۳/۸۷۴		۰/۰۲۳	۰/۳۱۸		
وزش باد با زاویه صفر درجه							
ضریب تغییر	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۶۹/۳۸۶	۰/۹۹۳	۰/۰۳۴	۲/۳۳۳	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۳
ارتفاع بلوک	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۰/۳۰۰		۰/۰۰۱	۰/۰۳۷		
محصوریت	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۶۹/۳۸۶	۰/۹۹۳	۰/۰۳۴	۲/۳۳۳	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۳
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۰/۳۰۰		۰/۰۲۲	۰/۶۷۲		
حجم	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۶۹/۳۸۶	۰/۹۹۳	۰/۰۳۴	۲/۳۳۳	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۳
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۰/۳۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۴۱۱۸		
ضریب دید به آسمان	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۲۵/۵۲۳	-۰/۹۱۴	۰/۱۸۱	۴/۶۳۱	کمتر از ۰/۰۰۰۱	-۰/۹۱۴
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	-۸/۱۰۴		۰/۳۰۵	-۲/۴۷۳		
تراکم ساختمانی	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۶۹/۳۸۶	۰/۹۹۳	۰/۰۳۴	۲/۳۳۳	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۳
	کمتر از ۰/۰۰۰۱	۳۰/۳۰۰		۰/۰۱۶	۰/۴۸۴		

اعداد سبزرنگ به معنی داشتن ارتباط و اعداد قرمزرنگ به معنای فاقد ارتباط است.



نمودار ۱) میزان ارتباط خطی متغیرها

بحث

پژوهش حاضر با هدف بررسی چگونگی تاثیر چهار فاکتور مرتبط با مورفولوژی بلوک‌های شهری یعنی محصوریت، حجم بلوک‌ها، تراکم ساختمانی و ضریب دید به آسمان بر سرعت باد در کریدورهای شهری انجام گرفت. اگرچه به موضوع باد و مورفولوژی در تحقیقات گذشته [Juan *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022; Ku & Tsai, 2020] یا پژوهش‌هایی که در مقدمه بدان‌ها اشاره شد پرداخته شده است، با این حال، بیشتر مطالعات بر مقیاس ساختمان یا بر اطراف ساختمان‌های بلند متمرکز شده‌اند، یا در شهرهای مختلف کشورهای دیگر و به کمک روش‌هایی غیر از نرم‌افزار مختص خرداقلیم در مقیاس شهری انجام شده‌اند که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

در پژوهش بقائی دائمی و همکاران که با هدف بهینه‌سازی فرم در ساختمان‌های بلند و بررسی تکنیک‌های آئرودینامیک به‌منظور کاهش نیروی پسا انجام شد، از نرم‌افزار اتودسک فلودیزاین ۲۰۱۴ استفاده شد [Baghaei daemi *et al.*, 2019]. رضایی حریری و همکاران به بررسی تاثیر مقطع ساختمان‌های بلندمرتبه بر رفتار باد در پیرامون بنا به کمک نرم‌افزارهای گمبیت و فلوئنت پرداختند [Rezaiee Hariri *et al.*, 2016]. جوانرودی و نیک [Javanroodi & Nik, 2020] نیز به بررسی تعاملات بین شاخص‌های مورفولوژی شهری و متغیرهای آب و هوای شدید پرداختند. مطالعه لی و همکاران [Li *et al.*, 2019] از جمله مطالعاتی که هم میدان باد و هم مورفولوژی شهری را در نظر گرفتند و با استفاده از مدل دینامیک سیالات محاسباتی و اطلاعات دقیق جغرافیایی ساختمان، شبیه‌سازی میدان باد شهری را انجام دادند. بنابراین جای خالی پژوهشی که با استفاده از شبیه‌سازی به کمک انویمت در مقیاس خرداقلیم شهری و با ثابت نگه‌داشتن برخی عوامل در راستای کنترل شرایط در زوایای خاص قرارگیری بلوک‌ها، به مقوله مورفولوژی پرداخته باشد به‌خوبی احساس شد که با انجام این مطالعه سعی در پرنمودن این خلأ مطالعاتی شد.

نتایج پژوهش‌های دیگر نشان‌دهنده این است که شکل پایه مثلث با اصلاح آئرودینامیک پخ‌خورده و با فرم آئرودینامیک مخروطی برای طراحی ساختمان‌های حدود ۱۵۰ متر، می‌تواند کمترین میزان ضریب پسا و بهترین رفتار آئرودینامیک در مقابل نیروی باد را داشته باشد یا پارامترهای مورفولوژی شهری (هندسه چیدمان، ارتفاع نهایی و تراکم شهری) می‌توانند میانگین بزرگی سرعت باد (تا ۲۳٪) و دمای هوا (تا ۱۶٪) را در مقیاس میکرو تغییر دهند. اما با توجه به پژوهش صورت‌گرفته با ثابت نگه‌داشتن بقیه عوامل، با افزایش ارتفاع، میانگین سرعت باد در صورت وزش باد در هر دو زاویه صفر و ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. این اتفاق می‌تواند ناشی از افزایش تراکم باد در حجم بین بلوک‌های ساختمانی باشد. همچنین با چینش موازی بلوک‌های ساختمانی با جهت باد، سرعت میانگین وزش باد حدود ۱/۵ متر بر ثانیه نسبت به زمانی که ساختمان‌ها نسبت به وزش باد با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند بیشتر می‌شود که این میزان تقریباً معادل ۲۰ تا ۳۰٪ افزایش را نشان می‌دهد. این موضوع با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده می‌تواند ناشی از میزان زبری سطح بلوک‌ها که با متریال بتن در نظر گرفته شده بودند باشد که در برخورد مایل باد با سطوح جداره‌ها اندکی از سرعت باد گرفته شده و باعث می‌شود که سرعت باد در حالت موازی که برخورد با شدت کمتری به سطوح جداره‌ها وجود دارد بیشتر از حالت برخورد مایل باشد.

از پیشنهادات پژوهش حاضر در شهرها یا پروژه‌ها با شرایط و جهت باد مشابه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱) کاهش سرعت باد با کاهش ارتفاع ابنیه و افزایش ضریب دید به آسمان در مناطق سردسیر، ۲) افزایش سرعت باد با افزایش ارتفاع ابنیه و کاهش ضریب دید به آسمان در مناطق گرمسیر، ۳) اقدامات افزایش سرعت باد به جهت نیاز برخی مکان‌های شهری به تهویه بیشتر، ۴) انجام اقدامات طراحی شهری در زمینه کاهش یا افزایش سرعت باد در بحث آسایش حرارتی در کریدورها با توجه به سرعت باد ورودی، و ۵) افزایش سرعت باد، کاهش ضریب دید به آسمان، افزایش ارتفاع بلوک‌ها، محصوریت یا تراکم ساختمانی به‌منظور برطرف‌کردن معضل جزایر گرمایی و رفع آلاینده‌ها.

همچنین لازم به ذکر است در این پژوهش برخی از فاکتورهای دیگر مانند دما، پوشش گیاهی، رطوبت، انعکاس خورشیدی و آسایش حرارتی هرچند در نظر گرفته نشده است، اما می‌توان در مطالعات آتی به آنها پرداخت. محدودیت‌های پژوهش حاضر عبارتند از: ۱) نبود دسترسی به نسخه کامل نرم‌افزار و به تبع آن دقت پایین‌تر شبیه‌سازی به جهت محدودیت در ابعاد محدوده انتخابی، ۲) عدم دسترسی به شبیه‌سازی چندهسته‌ای و بالابودن زمان شبیه‌سازی، ۳) محدودیت در مدت شبیه‌سازی به جهت سرعت پایین شبیه‌سازی با نسخه رایگان نرم‌افزار، ۴) نبود دسترسی به آزمایشگاه تونل باد و بسنده‌کردن به شبیه‌سازی کامپیوتری، و ۵) نیاز به ثابت‌بودن اغلب معیارها برای شبیه‌سازی کامپیوتری که عملاً به نوعی با شرایط محیط واقعی شهری متفاوت است، زیرا در محیط واقعی معیارهای مختلف همزمان دخیل هستند و نمی‌توان برخی از معیارها را حذف یا ثابت نگه داشت.

درمجموع با انجام پژوهش‌هایی از این دست می‌توان با بهینه‌تر کردن فرم بلوک‌ها به کریدورهای مطلوب‌تری در شهرها دست یافت و با ارایه نتایج به ارگان‌های برنامه‌ریز نظیر شهرداری و تبدیل آنها به ضوابط و قوانین شهری در طراحی و ساخت بلوک‌ها شاهد افزایش آسایش اقلیمی در فضاهای باز شهری و به تبع آن سرزندگی و حضورپذیری در آنها باشیم. طراحان شهری با توجه به نتایج پژوهش‌هایی از این دست نسبت به نیاز در اقلیم‌های مختلف، می‌توانند در ارتباط با تضعیف یا تقویت باد پیشنهادات کاربردی بدهند و این مطالعات می‌تواند مرجعی برای نوسازی بلوک‌های قدیمی یا ساخت و ساز در مناطق جدید شهری باشد.

نتیجه‌گیری

تحلیل شبیه‌سازی‌ها نشان داد با افزایش ارتفاع بلوک‌ها، سرعت میانگین باد و به تبع آن تشکیل تونل‌های بادی در کریدورها در زاویه صفر و ۴۵ درجه افزایش می‌یابد. سرعت میانگین وزش باد در بلوک‌های ساختمانی موازی با جهت باد ۲۰ تا ۳۰٪ نسبت به زمانی که ساختمان‌ها نسبت به وزش باد زاویه‌دار قرار گرفته‌اند بیشتر است و سرعت باد با محصوریت، حجم بلوک‌ها و تراکم ساختمانی رابطه مستقیم و با ضریب دید به آسمان رابطه معکوس دارد.

تشکر و قدردانی: از پروفسور مایکل بروس برای اعطای دسترسی به تیم تحلیلگر کمال تشکر را داریم.

تاییدیه‌های اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: این مقاله مستخرج از کلاس درسی دوره دکتری نویسنده اول با عنوان "رویکردهای نوین در بررسی و ارزیابی فیزیک شهر با نگرشی بر مصرف انرژی" است که توسط استاد آیدا ملکی در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام گرفته است.

سهم نویسندگان: پریسا قبادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده مقدمه/نگارنده بحث (۳۳٫۳۳%)؛ آیدا ملکی (نویسنده دوم)، روش‌شناس (۳۳٫۳۳%)؛ سیدعلیرضا عالی (نویسنده سوم)، تحلیلگر آماری (۳۳٫۳۳%)

منابع مالی: این مقاله پشتیبان مالی ندارد.

منابع

- Aali A, Haghparast F, Maleki A, Shakibamanesh A, Ghobadi P (2017). Optimum form and placement of urban blocks to maximize the use of solar energ–A case study. International Journal of Optimization in Civil Engineering. 7(4):597-615.
- Sciurpi F, Carletti C, Cellai G, Muratore V, Orsi A, Pierangioli L, Schmidt ED (2017). Environmental monitoring and building simulation application to Vasari Corridor: preliminary results. Energy Procedia. 133:219-230.
- Banerjee S, Yik SK, Dzyuban Y, Crank PJ, Yi RPX, Chow WT (2022). Analysing impacts of urban morphological variables and density on outdoor microclimate for tropical cities: A review and a framework proposal for future research directions. Building and Environment. 225:109646.
- Babaei Foroushani Z, Changelavayi Y (2020). The effect of traditional and modern urban morphology patterns on wind flow and its interactions with energy efficient approach (Case study: Isfahan). Journal of Urban Studies. 10 (37):127-142. [Persian]
- Baghaei daemi A, Eghbali R, Moez H, Bahrami P (2019). Simulation of flow in wind tunnels and optimization of aerodynamic shape of tall buildings to improve the drag coefficient under the influence of wind force. City Identity. 13(38):63-80. [Persian]
- Bayat A, Bemanian MR (2021). Analysis of the effect of tall building installation patterns on reducing the effect of thermal islands in the spaces between buildings. Urban Design Discourse. 2(1):105-120. [Persian]
- Edussuriya P, Chan A, Ye A (2011). Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. Atmospheric Environment. 45(27):4789-4803.
- Javanroodi K, Nik VM, Giometto MG, Scartezzini JL (2022). Combining computational fluid dynamics and neural networks to characterize microclimate extremes: Learning the complex interactions between meso-climate and urban morphology. Science of the Total Environment. 829:154223.
- Feng W, Ding W, Fei M, Yang Y, Zou W, Wang L, et al. (2021). Effects of traditional block morphology on wind environment at the pedestrian level in cold regions of Xi'an, China. Environment, Development and Sustainability. 23(3):3218-3235.
- Hesami S (2018). Investigating the effect of urban neighborhoods form on climate comfort with emphasis on wind flow Case study: Central texture of Sanandaj [Dissertation]. Tehran: Tehran University of Arts. [Persian]
- Javanroodi K, Nik VM (2020). Interactions between extreme climate and urban morphology: Investigating the evolution of extreme wind speeds from mesoscale to microscale. Urban Climate. 31:100544.
- Juan YH, Wen CY, Li Z, Yang AS (2021). Impacts of urban morphology on improving urban wind energy potential for generic high-rise building arrays. Applied Energy. 299:117304.
- Ku CA, Tsai HK (2020). Evaluating the influence of urban morphology on urban wind environment based on computational fluid dynamics simulation. ISPRS International Journal of Geo-Information. 9(6):399.
- Li M, Qiu X, Shen J, Xu J, Feng B, He Y, et al. (2019). CFD simulation of the wind field in Jinjiang City using a building data generalization method. Atmosphere. 10(6):326.
- Maleki A, Kahforoshan D, Ghobadi P (2021). Analysis of spatiotemporal distribution of air pollutants in Tabriz and its relationship with urban design components. Research Project. [Persian]
- Maleki A, Aali A, Ghobadi P (2016). An introduction of urbawind software and its application in urban design, 3rd International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management. Tehran: K.N.Toosi, University of Technology. [Persian]
- Peng Y, Gao Z, Buccolieri R, Ding W (2019). An investigation of the quantitative correlation between urban morphology parameters and outdoor ventilation efficiency indices. Atmosphere. 10(1):33.
- Rezaiee Hariri M, Najaf Khosravi S, 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. [Persian]
- Robinson D, editor (2012). Computer modelling for sustainable urban design: Physical principles, methods and applications. Washington: Routledge.
- 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. 11(3):67-92. [Persian]
- Vakili Nejad R (2021). Comparative comparison of thermal comfort simulation tools in urban environment. Journal of Iranian Architecture and Urbanism. 12(2):235-250. [Persian]
- Van de Graaf T (2014). International energy agency. In Sperling J, editor. Handbook of governance and security. Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing. pp. 489-503
- Wang B, Geoffroy S, Bonhomme M (2022). Urban form study for wind potential development. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science. 49(1):76-91.
- Wang B, Sun S, Duan M (2018). Wind potential evaluation with urban morphology-A case study in Beijing. Energy Procedia. 153:62-67.
- Yao JW, Zheng JY, Zhao Y, Shao YH, Yuan F (2017). Urban renewal based wind environment at pedestrian level in high-density and high-rise urban areas in Sai Ying Pun, Hong Kong. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 264(1):012014.
- Zhang H (2021). The relationship between the space corridor and pedestrian-level wind environment. 5th International Conference on Vision, Image and Signal Processing. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE.