

Abridged Paper

Original Research Paper

Optimizing Pedestrian Wind Comfort via Integrated Landscapes: CFD-Based Synergy Analysis*

Mahshid Ghorbanian^{1*}, Saeid Banimahdi Dehkordi², Mehdi Khakzand³

1. Assistant Professor, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2. Master of landscape architecture, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

3. Associate Professor, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Highlights

- 40% of residential open spaces violate Davenport wind comfort criteria.
- Integrated landscape systems reduced uncomfortable wind points by 67%.
- Synergy effect provides 15% additional performance beyond linear sums.
- Highest synergy (1.22) in building gaps allows targeted wind mitigation.

Abstract

Airflow is one of the most critical components of outdoor thermal and wind comfort in urban open spaces, influenced by the complex interplay of building geometry and landscape design. The present study aims to quantitatively evaluate wind behavior and develop integrated landscape design strategies by investigating pedestrian wind comfort in the open spaces between 12 residential blocks (Omid Town, Tehran). To this end, the wind flow pattern at the pedestrian level (1.75 meters) was simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD) in Ansys Fluent software, employing the k-ε turbulence model and based on the Davenport comfort criterion. Baseline results indicated that 40% of the 42 measurement points exceeded the pedestrian wind comfort thresholds. Subsequently, two intervention scenarios (1: Vegetation; 2: Integrated system of vegetation and porous barriers) were evaluated. Quantitative analyses demonstrated that the integrated scenario (representing the third generation of approaches) resulted in a 67% reduction in the number of uncomfortable points. More importantly, the synergy effect analysis revealed that the combined strategy provided a 15% additional performance improvement beyond the linear sum of individual interventions. This superior, non-linear effect confirms the necessity of developing evidence-based design frameworks for the comprehensive management of microclimates in residential complexes.

Article Info

Received	01/08/2025
Revised	18/09/2025
Accepted	04/10/2025
Available Online	20/01/2026

Keywords

Pedestrian Wind Comfort
Synergy Effect
Integrated Landscape Systems
CFD Simulation
Urban Microclimate.



© [2026] by the author(s).

Citation of the article

Ghorbanian, M., Banimahdi Dehkordi, S., & Khakzand, M. (2026). Optimizing Pedestrian Wind Comfort via Integrated Landscapes: CFD-Based Synergy Analysis. *Iranian Urban design studies*, 2(2), 257-282.

* This article is extracted from the master's thesis of the author, Saeid Banimahdi Dehkordi, titled "Landscape design of mid-block spaces in residential towns for creating a comfort zone against wind using Ansys Fluent", supervised by Mehdi Khakzand and Mahshid Ghorbanian, at Iran University of Science and Technology.

** Author Corresponding: Email: ghorbanian@iust.ac.ir

Introduction: Rapid urbanization and the proliferation of high-rise residential complexes have significantly altered urban microclimates, particularly regarding wind flow patterns. While urban ventilation is necessary for air quality, excessive wind speeds at the pedestrian level—driven by phenomena such as the “downwash” and “channeling” effects—frequently compromise safety and comfort. Historically, urban wind management has evolved through three distinct generations: from early passive design to isolated interventions like windbreaks, and finally to modern “integrated systems”. Despite the evolution of these strategies, many residential complexes, such as Tehran’s Omid Town, suffer from localized wind discomfort due to inadequate landscape planning. There is a critical research gap in quantifying how multiple landscape elements (e.g., trees and porous fences) interact. Most studies treat these as standalone measures, failing to account for the synergy effect—the non-linear performance boost that occurs when interventions are strategically combined. This study addresses this gap by using advanced CFD modeling to prove that integrated systems offer superior protection compared to traditional, fragmented approaches. The goal is to establish a quantitative, evidence-based framework that assists urban designers in creating wind-sensitive outdoor spaces.

Materials and Methods: The study focuses on Omid Town, a prominent residential complex in Tehran characterized by a systematic arrangement of 12 blocks. The geometry was modeled accurately to reflect the mid-block gaps where wind acceleration is most prevalent. Simulations were conducted using Ansys Fluent. The k-ε turbulence model was selected for its proven reliability in predicting urban wind fields. To ensure results were independent of the mesh size, a Grid Independence Study was performed. Four mesh densities were tested, and a “very fine” grid consisting of 7,010,094 cells was utilized, achieving a convergence stability with less than 0.8% variance. The inlet velocity was set based on Mehrabad meteorological station data, focusing on the critical maximum wind speed of 10.8 m/s. The Davenport criterion was adopted as the assessment benchmark, defining the threshold for comfort based on the frequency and intensity of wind speeds suitable for activities like walking or sitting. Design Scenarios included:

- Baseline: Current state without landscape interventions.
- Scenario 1 (Standalone): Strategic placement of high-density vegetation (modeled as porous media).
- Scenario 2 (Integrated): Combining vegetation with porous barriers ($t=0.5$ porosity) to create a multi-layered shield.

Findings: The initial CFD results (Baseline Analysis) confirmed severe discomfort in the central courtyards and peripheral gaps. Out of 42 designated monitoring points, 17 points (40%) failed to meet the Davenport comfort threshold. The wind tunnel effect between parallel blocks increased localized velocities by up to 30% compared to the inlet speed. The scenario performance was as bellow:

- Scenario 1: The introduction of vegetation significantly reduced wind speeds in immediate downstream areas, improving comfort at 8 of the 17 problematic points. However, it failed to address high-altitude downwash redirected to the ground level.
- Scenario 2: The integrated system showed superior performance. The number of uncomfortable points dropped from 17 to 5, representing a 67% improvement.

The most significant finding is the quantification of the Synergy Coefficient. By comparing the integrated results against the mathematical sum of standalone measures, it was observed that the integrated scenario provided a 15% additional wind speed reduction. In specific mid-block gaps, the synergy coefficient reached 1.22, proving that the proximity of porous barriers and vegetation creates a complex turbulence-filtering effect that neither can achieve alone.

Discussion and Conclusion: The findings validate the transition toward Third-Generation integrated landscape design. The 15% synergy effect suggests that the interaction between different landscape



elements is non-linear; the porous barrier breaks the initial wind force, allowing the vegetation to act as a secondary filter that stabilizes the airflow. This study contributes to urban design and landscape architecture by moving beyond qualitative “rules of thumb” to quantitative “evidence-based design.” For architects and planners, the results imply that simply planting trees is insufficient in high-velocity zones. Instead, a multi-layered approach using varied porosities and heights is essential. While the CFD model used the k-ε turbulence model effectively, future studies could utilize Large Eddy Simulation (LES) for higher temporal accuracy. Additionally, seasonal variations in leaf area density (LAD) for deciduous trees should be modeled to assess winter vs. summer performance. In conclusion, integrated landscape systems offer a robust solution for enhancing urban livability, providing a measurable synergy that maximizes pedestrian comfort and safety.

Declarations

Conflict of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest associated with this study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Informed Consent

This research did not involve human participants requiring informed consent.

Ethical Approval

This study did not involve clinical experiments on humans, animals, or sensitive data, and its information did not require approval from any ethics committee.

Authors' Contributions

Conceptualization: Mahshid Ghorbanian, Saeid Banimahdi Dehkordi, Mehdi Khakzand; Data Curation and Investigation: Saeid Banimahdi Dehkordi; Formal analysis: Saeid Banimahdi Dehkordi, Mahshid Ghorbanian; Visualization: Mahshid Ghorbanian, Saeid Banimahdi Dehkordi; Writing (Original Draft): Mahshid Ghorbanian, Saeid Banimahdi Dehkordi; Writing (Review & Editing): Mahshid Ghorbanian; Project administration: Mahshid Ghorbanian, Mehdi Khakzand; Validation and Final Approval: All authors approved the final version of the manuscript.

Acknowledgments

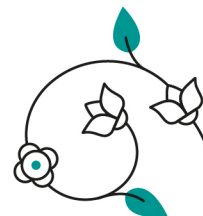
No acknowledgments have been reported by the authors.

References

- Aguinaga, S., de Virel, M.D., Guilhot, J., Caniot, G., Sanquer, S., Dias, D., & Nguyen, C. (2017). Design of the citadel of Bonifacio urban area through experimental and numerical assessment of pedestrian comfort. Paper presented at the 7th European-African Conference on Wind Engineering (EACWE 2017). <https://cstb.hal.science/hal-02309712/>
- Aynsley, R.J.B.S. (1974). Effects of airflow on human comfort. 9(2), 91-94. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(74\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0007-3628(74)90003-6)
- Aynsley, R.J.E.D.G. (2014). Natural ventilation in passive design. 1-16. <http://www.jstor.org/stable/26151921>.
- Bani-Mahdi Dehkordi, S., Ghorbanian, M., & Khakzand, M. (2024). *Shenasaei-ye anasor-e mohem dar memari-ye manzar-e faza-haye baz beyn-e mojteme-haye maskooni ba rooykard-e asayesh-e eghlimi dar barabar-e bad* [Identification of key elements in landscape architecture of open spaces between residential complexes with a climatic comfort approach toward wind]. In *Proceedings of the 8th National Conference on Architecture and Sustainable City*, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/2190721> [in Persian]
- Blocken, B. (2014). 50 years of computational wind engineering: past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 69-102. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008>



- Blocken, B., Roels, S., & Carmeliet, J. (2004). Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(10), 849-873. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.004>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2), 238-252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Van Beeck, J.P.A.J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and environment*, 100, 50-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
- Boutet, T.S.J. (1987). *Controlling air movement: a manual for architects and builders*.
- Capeluto, I.G. (2005). A methodology for the qualitative analysis of winds: natural ventilation as a strategy for improving the thermal comfort in open spaces. *Building and environment*, 40(2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.07.003>
- Ghorbanian, M. (2024). *Behineh-sazi-ye tarahi-ye shahri baraye kahesh-e asarat-e bad ba estefadeh az dinamikh-e sayalat-e mohasebati (CFD)* [Optimization of urban design to reduce wind effects using computational fluid dynamics (CFD)]. In *Proceedings of the 8th National Conference on Architecture and Sustainable City*, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/2190757> [in Persian]
- Gromke, C., & Ruck, B. (2007). Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 41(16), 3287-3302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.043>
- Hala, E., & Shkodrani, N. (2020). Design for wind comfort. The CFD assessment over a future outdoor public space. *Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management*, 1(1), 13-24. <https://dergipark.org.tr/en/pub/apjhad/issue/55024/693250>
- Hong, B., & Lin, B. (2015). Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. *Renewable Energy*, 73, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.060>
- Iqbal, Q.M.Z., & Chan, A. L. S. (2016). Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation. *Building and environment*, 101, 45-63. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.015>
- Isyumov, N., & Davenport, A.G. (1975). The ground level wind environment in built-up areas. In *Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, (Heathrow 1975) (pp. 403-422).
- Javanroodi, K., Mahdaveinejad, M., & Nik, V.M.J.A.E. (2018). Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. 231, 714-746. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.116>
- Kuo, C.Y., Wang, R.J., Lin, Y.P., & Lai, C.M. (2020). Urban design with the wind: Pedestrian-level wind field in the street canyons downstream of parallel high-rise buildings. *Energies*, 13(11), 2827. <https://doi.org/10.3390/en13112827>
- Mahgoub, A.O., & Ghani, S. (2021). Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for windbreaks CFD simulation. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102648>
- Molaee, M. M., Pilehchiha, P., & Shadanfar, A. (2019). *Behineh-sazi-ye tanasobat-e bazsho va jابه-ye noorgiri ba rooykard-e kahesh-e masraf-e energy dar sakhteman-haye edari* [Optimization of opening proportions and daylighting façade with an energy consumption reduction approach in office buildings]. *Naqsh-e Jahan: Theoretical Studies and New Technologies in Architecture and Urbanism*, 9(2), 117–123. https://bsnt.modares.ac.ir/article_856_8c235f89a8143a28a1d6067e959dd858.pdf [in Persian]
- Osman, M. (2011). Evaluating and enhancing design for natural ventilation in walk-up public housing blocks in the Egyptian desert climatic design region (Doctoral dissertation, University of Dundee. https://discovery.dundee.ac.uk/ws/portalfiles/portal/1274519/Osman_phd_2011.pdf
- Razjouyan, M. (2014). *Asayesh dar panah-e bad* [Comfort in shelter from wind]. Tehran, Iran: Shahid Beheshti University Press. [in Persian]
- Rezaei Hariri, M. T., Najaf Khosravi, S., & Saadatjoo, P. (2016). *Barrasi-ye tasir-e maghta-e sakhteman-haye boland-mortabe bar raftar-e bad dar piramoon-e bana* [Investigating the effect of high-rise building cross-sections on wind behavior around buildings]. *Nameh-ye Memari va Shahrsazi (Journal of Architecture and Urbanism)*, 9(17), 61–77. [in Persian]
- Stathopoulos, T. (2009). Wind and comfort. In *5th European and African Conference on Wind Engineering*,



- EACWE 5, Proceedings.
- 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>
 - 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(9-11), 1541-1550.
 - Yuan, C. (2018). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities. In *Urban Wind Environment: Integrated Climate-Sensitive Planning and Design* (pp. 79-100): Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-5451-8_5
 - Yuan, C., Ng, E., & Norford, L. K. (2014). Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 71, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.008>
 - Zheng, S., Guldmann, J.M., Liu, Z., Zhao, L., Wang, J., Pan, X., & Zhao, D. (2020). Predicting the influence of subtropical trees on urban wind through wind tunnel tests and numerical simulations. *Sustainable Cities and Society*, 57, 102116. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102116>

Note for Readers:

This paper contains an identical English abstract in two sections:

Abridged Paper: To provide an overview for international readers.

Persian Section: To meet the standardized structure of Persian academic publications.

This repetition is intentional to ensure alignment with academic standards and facilitate readability for both audiences. Readers are encouraged to review the full paper for comprehensive details.

یادداشت برای خوانندگان:

این مقاله شامل یک چکیده انگلیسی در دو بخش است:

Abridged Paper: برای ارائه یک دید کلی به خوانندگان بین‌المللی.

بخش فارسی: به منظور رعایت استانداردهای ساختار مقالات علمی فارسی.

تکرار این چکیده، با هدف انطباق با استانداردهای علمی و تسهیل مطالعه برای هر دو گروه از مخاطبان طراحی شده است. خوانندگان می‌توانند برای دریافت جزئیات کامل، به متن اصلی مقاله مراجعه کنند.

© [2026] by the author(s). This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). The authors retain copyright, and this work may be shared and redistributed with proper attribution.

License link: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



© [۲۰۲۶] نویسنده(گان). این مقاله تحت مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) منتشر شده است. نویسنده(گان) مالک حقوق

مادی و معنوی اثر خود هستند، و این مقاله می‌تواند با ذکر منبع مورد استفاده، بازنشر و توزیع شود.

لینک مجوز: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ارزیابی عملکرد سامانه‌های منظر یکپارچه بر آسایش بادی عابریاده: تحلیل کمی اثر هم‌افزایی با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)*

مهشید قربانیان^{۱*}، سعید بنی‌مهدی دهکردی^۲، مهدی خاک‌زند^۳

۱. استادیار، گروه هنرهای کاربردی (معماری منظر)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲. کارشناس ارشد، گروه هنرهای کاربردی (معماری منظر)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۳. دانشیار، گروه هنرهای کاربردی (معماری منظر)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

نکات شاخص

- نقض معیار دانپورت در ۴۰ درصد از فضاهای باز شهرک مسکونی امید (خط مبنا و شرایط موجود)
- کاهش ۶۷ درصد نقاط بحرانی بادی با اجرای سامانه‌های منظر یکپارچه
- بهبود ۱۵ درصد عملکرد فراتر از مجموع خطی با تحلیل اثر هم‌افزایی
- شناسایی ضریب هم‌افزایی ۱.۲۲ در شکاف‌های بین‌ساختمانی جهت مکان‌یابی

چکیده

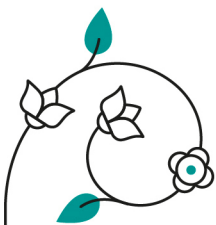
مشخصات مقاله

تاریخ ارسال ۱۴۰۴/۰۵/۱۰
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۶/۲۷
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۷/۱۲
تاریخ انتشار آنلاین ۱۴۰۴/۱۰/۳۰

براساس معیار دانپورت جریان هوا یکی از مؤلفه‌های مهم آسایش حرارتی و بادی در فضاهای باز شهری است که تحت‌تأثیر پیچیده هندسه ساختمان‌ها و چیدمان منظر قرار می‌گیرد. پژوهش حاضر به ارزیابی راهکارهای طراحی منظر یکپارچه در جهت ارتقای آسایش بادی در فضاهای باز بین ۱۲ بلوک مسکونی (شهرک امید تهران) می‌پردازد. در این راستا، با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در نرم‌افزار Ansys Fluent و با بهره‌گیری از مدل توربولانسی k-ε، الگوی جریان باد در تراز عابریاده (۱.۷۵ متر) براساس معیار دانپورت شبیه‌سازی شد. نتایج وضعیت خط مبنا نشان داد که ۴۰ درصد از ۴۲ نقطهٔ سنجش از آستانه‌های آسایش بادی فراتر می‌روند. به‌دنبال آن، دو سناریوی مداخله (۱: پوشش گیاهی؛ ۲: سیستم یکپارچه پوشش گیاهی و موانع متخلخل) ارزیابی شدند. تحلیل‌های کمی نشان دادند که سناریوی یکپارچه (نسل سوم رویکردها) تعداد نقاط فاقد آسایش بادی را به‌میزان ۶۷ درصد کاهش داد. مهم‌تر آنکه نتایج تحلیل هم‌افزایی نشان داد که راهبرد یکپارچه و ترکیبی، ۱۵ درصد بهبود اضافی فراتر از مجموع خطی مداخلات انفرادی ارائه می‌دهد. این اثر غیرخطی و برتر، لزوم تدوین چهارچوب‌های طراحی مبتنی بر شواهد برای مدیریت جامع ریزاقليم در شهرک‌های مسکونی را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی

آسایش بادی عابریاده
اثر هم‌افزایی
سامانه‌های منظر یکپارچه
مدل توربولانسی k-ε
فضای باز بین شهرک‌های مسکونی
CFD
Ansys Fluent





Original Research Paper

Optimizing Pedestrian Wind Comfort via Integrated Landscapes: CFD-Based Synergy Analysis*

Mahshid Ghorbanian^{1*}, Saeid Banimahdi Dehkordi², Mehdi Khakzand³

1. Assistant Professor, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Master of landscape architecture, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Landscape Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Highlights

- 40% of residential open spaces violate Davenport wind comfort criteria.
- Integrated landscape systems reduced uncomfortable wind points by 67%.
- Synergy effect provides 15% additional performance beyond linear sums.
- Highest synergy (1.22) in building gaps allows targeted wind mitigation.

Abstract

Airflow is one of the most critical components of outdoor thermal and wind comfort in urban open spaces, influenced by the complex interplay of building geometry and landscape design. The present study aims to quantitatively evaluate wind behavior and develop integrated landscape design strategies by investigating pedestrian wind comfort in the open spaces between 12 residential blocks (Omid Town, Tehran). To this end, the wind flow pattern at the pedestrian level (1.75 meters) was simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD) in Ansys Fluent software, employing the k-ε turbulence model and based on the Davenport comfort criterion. Baseline results indicated that 40% of the 42 measurement points exceeded the pedestrian wind comfort thresholds. Subsequently, two intervention scenarios (1: Vegetation; 2: Integrated system of vegetation and porous barriers) were evaluated. Quantitative analyses demonstrated that the integrated scenario (representing the third generation of approaches) resulted in a 67% reduction in the number of uncomfortable points. More importantly, the synergy effect analysis revealed that the combined strategy provided a 15% additional performance improvement beyond the linear sum of individual interventions. This superior, non-linear effect confirms the necessity of developing evidence-based design frameworks for the comprehensive management of microclimates in residential complexes.

Article Info

Received	01/08/2025
Revised	18/09/2025
Accepted	04/10/2025
Available Online	20/01/2026

Keywords

Pedestrian Wind Comfort
Synergy Effect
Integrated Landscape Systems
CFD Simulation
Urban Microclimate.



© [2026] by the author(s).

Citation of the article

Ghorbanian, M., Banimahdi Dehkordi, S., & Khakzand, M. (2026). Optimizing Pedestrian Wind Comfort via Integrated Landscapes: CFD-Based Synergy Analysis. *Iranian Urban design studies*, 2(2), 257-282.

* This article is extracted from the master's thesis of the author, Saeid Banimahdi Dehkordi, titled "Landscape design of mid-block spaces in residential towns for creating a comfort zone against wind using Ansys Fluent", supervised by Mehdi Khakzand and Mahshid Ghorbanian, at Iran University of Science and Technology.

** Author Corresponding: Email: ghorbanian@iust.ac.ir

مقدمه

مسئله تأثیر باد و جریان هوا در آسایش محیط‌های مسکونی از دیرباز مورد توجه بوده است. براساس نظریات ویتروویوس^۱ و ارسطو، یکی از اهداف اصلی در طراحی ساختمان‌ها، بهره‌گیری از نسیم‌های طبیعی برای تهویه و کاهش گرمای محیط بوده است. ارسطو در چهار قرن قبل از میلاد می‌نویسد: سالم‌ترین شهرها آن‌هایی هستند که بر فراز زمینی با شیب متمایل به شرق بنا شوند تا از مزایای نسیم صبح برخوردار باشند. ویتروویوس، معمار رومی یک قرن قبل از میلاد، می‌نویسد: بعد از برپایی حصار شهر، نوبت به تقسیم‌بندی زمین، خانه‌ها و کوچه‌ها می‌رسد که باید با توجه به شرایط اقلیمی انجام شود. مجموعه خانه‌ها و کوچه‌ها هنگامی بالاترین کارایی را دارد که برای حفاظت کوچه‌ها در مقابل بادهای مزاحم پیش‌بینی لازم شده باشد (Razjouyan, 2015). در سال‌های اخیر، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که جهت‌گیری ساختمان‌ها، ارتفاع بناها و ساختار فیزیکی فضای شهری تأثیرات زیادی بر جریان باد و آسایش عابران در فضاهای عمومی دارند (Aynsley, 2014; Ghorbanian, 2024). براساس تحقیق‌های انجام‌شده، شش عامل اصلی در آسایش انسان در فضاهای شهری تأثیرگذار است: تابش خورشید، دمای هوا، رطوبت، فعالیت بدنی، نوع لباس و باد (Boutet, 1987). از میان این عوامل، باد نقش به‌سزایی در آسایش عابران پیاده دارد؛ به‌خصوص در فضاهای باز شهری که در آن سرعت باد و تغییرات آن می‌تواند موجب ایجاد شرایط ناخوشایند و خطرناک برای ساکنان شود. باد در روی زمین عامل مهمی برای تبادل گرما، رطوبت و انتقال ذرات ذره‌بینی و غیرذره‌بینی از نقطه‌ای به نقطه دیگر است. این امر از لحاظ اقلیمی در فراهم آوردن آسایش برای انسان یا اختلال در آن، چه از لحاظ گرمایی و چه از لحاظ راحتی رفتاری، نقش مهمی دارد (Capeluto, 2005).

فضای باز در شهرک‌های مسکونی علاوه بر مسائل محیطی بستری برای شکل‌گیری روابط جمعی است. این فضا به‌عنوان مکملی برای فضای سبز به تعدیل تراکم ساختمانی کمک می‌کند. تأمین آسایش اقلیمی ساکنان، یکی از مؤلفه‌های کلیدی حضورپذیری این فضاهاست (Boutet, 1987). سرعت باد و جریان هوا یکی از مؤلفه‌های بسیار مهم در تأمین آسایش افراد در فضاهای باز شهری و محوطه شهرک‌های مسکونی است. نبود جریان مناسب در محیط‌های شهری و فضای باز شهرک‌های مسکونی می‌تواند به اختلال عملکرد و کاهش حضورپذیری این فضاها منجر شود. ساختار فیزیکی شهری، شامل شکل و هندسه ساختمان، تراکم ساختمان، ارتفاع بناها، اختلاف ارتفاع، الگوی چیدمان بلوک‌ها و تناسب فضای باز، از مهم‌ترین فاکتورهایی هستند که می‌توانند الگوی جریان پیرامونی ساختمان‌ها را در تراز عابران پیاده تحت‌تأثیر قرار دهند (Kuo et al., 2020; Banimahdi, 2020; Dehkordi et al., 2023). به‌ویژه در بافت‌های با ساختمان‌های بلندمرتبه و متراکم، پدیده تشدید سرعت باد در سطح عابر پیاده^۲ به‌دلیل تأثیرات آیرودینامیکی گوشه‌های ساختمان‌ها و تونل شدن جریان در شکاف‌های باریک، به چالشی جدی در طراحی شهری و منظر تبدیل شده است.

این پژوهش به بررسی تأثیر سرعت باد در فضاهای باز شهرک‌های مسکونی و نحوه تأثیر آن بر آسایش عابران پیاده و درنهایت بررسی راهکارهای طراحی یکپارچه برای کنترل باد پرداخته است. در این راستا، به شبیه‌سازی جریان باد در شهرک مسکونی شهرک امید تهران پرداخته شده و نقاط بحرانی که سرعت باد در آن‌ها به‌حدی می‌رسد که می‌تواند به ناراحتی عابران منجر شود، شناسایی شده است. در این تحقیق، به‌طور ویژه به بررسی نحوه تأثیر عوامل مختلف، نظیر فرم هندسی ساختمان‌ها، تراکم جمعیتی و استفاده از پوشش‌های گیاهی برای کاهش سرعت باد پرداخته شده است. پژوهش با تمرکز بر ضرورت ارائه راهکارهای فعال طراحی منظر برای تعدیل جریان آزاردهنده، در تلاش برای ارائه راهکارهای طراحی مناسب فضاهای باز شهرک مسکونی شهرک امید تهران در راستای ارتقای آسایش محیطی با تأکید بر جریان باد است. علی‌رغم مطالعات فراوان در زمینه CFD ساختمان‌های بلند، تحقیقات اندکی به بررسی دقیق تأثیرات ریزمقیاس^۳ طراحی منظر و پوشش گیاهی بر تعدیل جریان باد در شهرک‌های میان‌مرتبه^۴ و پرتراکم ایران پرداخته‌اند که این مطالعه سعی در پر کردن این شکاف دارد. پژوهش حاضر به‌دنبال یافتن نقاطی در فضای بین بلوک‌های شهرک مسکونی امید تهران است که آسایش عابران پیاده را به خطر می‌اندازد تا درنهایت راهکارهای مناسب برای کاهش جریان باد مزاحم در فضاهای بین‌بلوکی این شهرک مسکونی را پیشنهاد دهد.

پیشینه پژوهش

دسته‌بندی عوامل مؤثر بر آسایش بادی

تاکنون دسته‌بندی‌های مختلفی برای پارامترهای تأثیرگذار بر جریان باد داخلی و پیرامونی ساختمان انجام شده است. آیسنلی (۲۰۱۴) عوامل مختلفی همچون فرم ساختمان و طرح پوسته بنا، جهت‌گیری بنا، جهت‌گیری بنا، تراکم شهری و ویژگی‌های محیطی در اطراف ساختمان‌ها تأثیرات زیادی بر جریان باد دارند (Aynsley, 2014). در دسته‌بندی جامع‌تر عثمان (۲۰۱۱)، عوامل مؤثر بر رفتار باد به سه مقیاس خرد، میانه و کلان طبقه‌بندی شده‌اند. 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 و ساختار طبیعی سایت در مقیاس کلان جای گرفته است. براساس این تقسیم‌بندی، ساختار پوسته ساختمان،





جهت‌گیری بنا، تناسبات ساختمان و فرم آن از عوامل معمارانه مؤثر بر رفتار باد در اطراف تک‌بنا هستند (Osman, 2011). همچنین، برخی مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از پوشش‌های گیاهی می‌تواند به‌طور مؤثری سرعت باد را کاهش دهد و از این طریق آسایش عابران را بهبود بخشد (Stathopoulos, 2009 و Hong & Lin, 2015).

پژوهش‌های متعدد دیگری نیز بر تأثیرات مثبت طراحی مناسب فضاهای باز بر آسایش انسان تأکید کرده‌اند. در تحقیقاتی که توسط کیو و همکاران (Kuo et al., 2020) انجام شد، نشان داده شد که طراحی فضاهای باز با استفاده از درختان و پوشش‌های گیاهی به‌طور چشمگیری می‌تواند سرعت باد را کاهش دهد و فضای آرام‌تری برای ساکنان ایجاد کند. علاوه بر این، برخی از مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از المان‌های طراحی مانند بادشکن‌ها و تغییرات در ارتفاع بناها می‌تواند به‌طور مؤثری جریان باد را در فضاهای شهری کنترل و از ایجاد شرایط ناخوشایند برای ساکنان جلوگیری کند (Blocken et al., 2004; Blocken et al., 2007; Blocken et al., 2016).

تأثیر مورفولوژی و چیدمان ساختمان بر جریان باد عابریاده

بررسی‌های متعددی نشان داده‌اند که مورفولوژی ساختمان به‌صورت مستقیم بر الگوی جریان باد در تراز عابریاده تأثیر می‌گذارد. در پژوهش انجام‌شده توسط هالا و شودران (۲۰۲۰) نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که بالاترین سرعت باد در بین شکاف ساختمان‌ها ایجاد می‌شود. چنین سرعتی باد ممکن است برای تردد یا دویدن دشوار نباشد؛ اما برای افرادی که نشسته یا استراحت می‌کنند، آزاردهنده است (Hala & Shkodrani, 2020). مطالعات ویلسمن و همکارش در سال ۲۰۰۷ نشان داد که برای ساختمان‌هایی با ارتفاع بیش از ۳۰ متر، انجام شبیه‌سازی‌های جریان باد یا آزمایش تونل باد، به‌علت تشدید سرعت باد شهری، بسیار ضروری است (Willemssen & Wisse, 2007). مطالعه‌ای روی ساختمان‌های بلند نشان داد که گردش باد در گوشه‌های ورودی گذرگاه در تراز عابریاده، به‌طور چشمگیری تحت تأثیر جهت‌گیری و جداسازی ساختمان قرار دارد (Iqbal & Chan, 2016). الگوی چیدمان ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از مولفه‌های بسیار تأثیرگذار بر الگوی جریان باد در فضاهای باز شهری به‌شمار می‌آید. در همین راستا، محققان به این نتیجه رسیدند که جانمایی ضلع بزرگ بنا به موازات باد غالب می‌تواند به تشدید گردابه‌های باد در گوشه‌های ساختمان و به‌تبع آن ایجاد جریان مطلوب در تراز عابریاده منجر شود (Molaei et al., 2019).

ارتفاع ساختمان نیز شاخصه مهمی در بررسی سرعت باد شهری است. بررسی رابطه بین ارتفاع و آسایش شهروندان ثابت کرد که تشدید سرعت باد در اطراف ساختمان‌هایی با ارتفاع بیش از ۵۰ متر، آسایش عابران را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سلب می‌کند. یوان و همکاران (۲۰۱۸) با شبیه‌سازی مورفولوژی متخلخل ساختمانی و مقایسه آن‌ها با مدل صلب، به این نتیجه رسیدند که تعبیه فضاهای متخلخل در ترازهای تحتانی کمک قابل‌ملاحظه‌ای به افزایش جریان توربولانسی در تراز عابریاده می‌نماید (Yuan et al, 2018). همچنین، عقب‌نشینی‌ها در سطوح ساختمان یا پنت‌هاوس‌ها، عناصری هستند که عموماً مزاحمت جریان باد در سطح عابریاده را کاهش می‌دهند (Stathopoulos, 2009). ایجاد تغییرات ساختاری در فرم هندسی بنا و فرم مقطع ساختمان (اعم از شکست بدنه، خالی کردن و عقب‌نشستگی) در ترازهای تحتانی و به‌ویژه طبقه همکف، تأثیرات مثبتی بر ارتقای جریان باد شهری خواهد داشت (رضایی حریری و همکاران، ۱۳۹۵).

راهکارهای طراحی منظر و پوشش گیاهی برای تعدیل جریان باد

علاوه بر تغییر در مورفولوژی ساختمان، عناصر طراحی منظر مانند پوشش گیاهی و بادشکن‌ها به‌عنوان راهکارهای فعال برای کنترل جریان باد مورد توجه قرار گرفته‌اند. پوشش گیاهی مانند بوته‌ها و درختان مخروطی همیشه‌سبز و صفحه‌های متخلخل نیز می‌توانند به‌عنوان اقدامی مثبت برای کنترل جریان باد با سرعت زیاد در سطح عابریاده استفاده شوند (Stathopoulos, 2009). آگونیانا و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که استفاده از پوشش گیاهی یکی از راه‌های کارآمد برای تأمین آسایش باد عابران پیاده هنگام طراحی منطقه شهری است (Aguinaga et al, 2017). هالا و شودران در مطالعه خود بیان می‌کنند که کاشت درختان در مناطقی که سرعت باد بیش از ۷-۸ متر بر ثانیه است، ممکن است یکی از راهبردهای کاهش سرعت باد باشد (Hala & Shkodrani, 2020). در پژوهشی دیگر، رفتار بادشکن‌هایی نظیر فنس‌ها، بادشکن‌هایی از جنس گیاهان و نماهای متخلخل (با میزان تخلخل ۰٫۲۵ تا ۰٫۶) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نماهای متخلخل تأثیر بسیاری در هدایت جریان باد دارند؛ اما به‌تنهایی نمی‌توانند سرعت باد را کاهش دهند و پیشنهاد می‌شود با هندسه‌های دیگر و پوشش گیاهی ترکیب شوند (Mahgoub & Ghani, 2021). ژنگ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از تونل باد، تأثیر درختان استوایی بر جریان باد شهری را بررسی کردند و ضریب پسا را بین ۰٫۵۲۳ تا ۰٫۹۳۲ برای چهار نوع درخت واقعی تعیین کردند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای گیاهان در کاهش سرعت باد است (Zheng et al., 2020). همچنین، در مناطقی که سرعت باد بیش از ۷ تا ۸ متر بر ثانیه است، کاشت درختان به‌عنوان راهبردی کاهش سرعت باد پیشنهاد شده است. حتی سیستم‌های هوشمند مانند درب‌های اتوماتیک مجهز به سنسور برای تشخیص سرعت‌های بالاتر از حد آسایش (و صدور فرمان بسته شدن درب‌ها)، به تقلیل سرعت جریان در معابر کمک می‌کنند (Blocken et al., 2004).



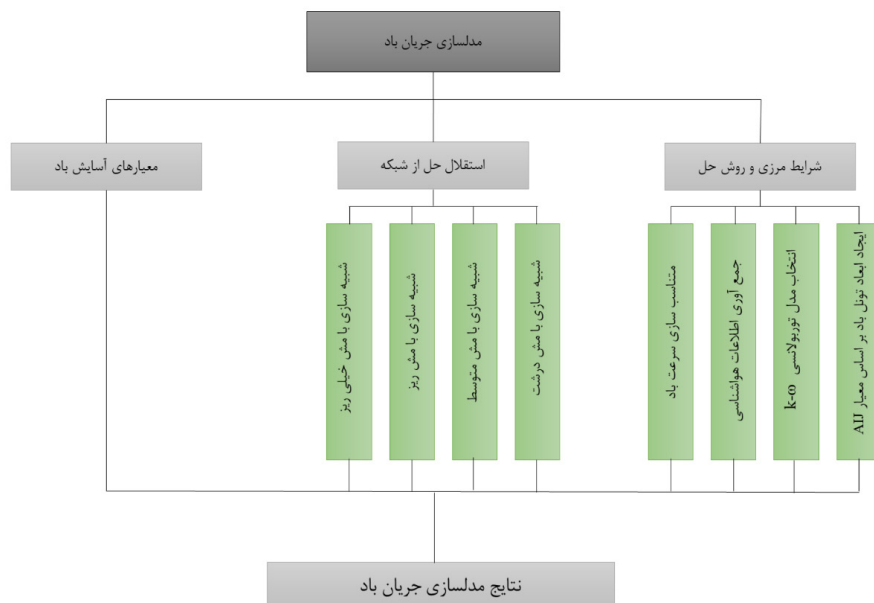
چهارچوب نظری مداخلات طراحی یکپارچه

تکامل راهبردهای مدیریت باد شهری از طراحی غیرفعال^۶ آغاز شده است که ویژگی کلیدی آن بر اصلاح جهت‌گیری و فواصل ساختمان‌ها تمرکز دارد؛ با این حال، این رویکرد به دلیل انطباق‌پذیری محدود پس از ساخت، انعطاف‌پذیری کمی در مواجهه با تغییرات اقلیمی دارد. در گام بعدی، استفاده از مداخلات منفرد، مانند بهره‌گیری از پوشش گیاهی یا موانع فیزیکی مطرح شد که علی‌رغم سادگی، با محدودیت‌هایی چون اثرات مجزا و بهینه‌سازی محدود روبه‌رو است. در نهایت، رویکردهای نوین به سمت سامانه‌های یکپارچه حرکت کرده‌اند که از ترکیب چندمداخله‌ای برای مدیریت جریان هوا بهره می‌برند؛ اگرچه این سیستم‌ها کارایی زیادی دارند؛ اما به دلیل پیچیدگی طراحی و چالش‌های اعتبارسنجی، نیازمند تحلیل‌های دقیق مهندسی و مدل‌سازی‌های پیشرفته هستند (رجوع کنید به Blocken, 2014؛ Gromke & Ruck, 2007؛ Yuan et al., 2014). در بیشتر تحقیقات پیشین، تمرکز اصلی بر تأثیر عوامل کلان مانند تراکم شهری و فرم کلی ساختمان‌ها بوده است و کمتر به جزئیات دقیق‌تری مانند تأثیر ویژگی‌های ریزمقیاس و استفاده از پوشش‌های گیاهی پرداخته شده است. این پژوهش سعی دارد شکاف‌های موجود در این مطالعات را پر کند و تأثیر برخی عوامل ریزمقیاس (چینش گیاهی و ترکیب آن‌ها با موانع متخلخل) را در بهبود آسایش عابران پیاده در فضای باز شهرک‌های مسکونی بررسی نماید. به همین منظور بررسی اثربخشی سامانه یکپارچه هدف پژوهش حاضر است.

مواد و روش‌ها نوع و مراحل پژوهش

نوع این مطالعه توصیفی و تحلیلی است و براساس ماهیت پژوهش، از تحلیل کمی و متغیرهای سنجش‌شدنی استفاده شده است. با توجه به ماهیت چندبخشی موضوع پژوهش ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای مرتبط با مباحث کلی و پایه‌ای جریان باد و همچنین مولفه‌های طراحی مرتبط با آسایش عابران پیاده در فضاهای بین شهرک‌های مسکونی انجام گرفت. در فاز دوم، از روش میدانی برای انتخاب نمونه موردی و ارزیابی اولیه عوامل میدانی از جمله سرعت و جهت باد و شدت آزاردهندگی آن استفاده شد. نهایتاً شهرک مسکونی شهرک امید واقع در منطقه ۴ تهران به‌عنوان محدوده هدف انتخاب شد. در ادامه، فرایند تحقیق اسناد فرادست شهر تهران و منطقه ۴ مورد مطالعه قرار گرفت و داده‌های آماری هواشناسی سالانه از طریق سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری شد (شکل ۱).

در مرحله اول، شبیه‌سازی‌ها با استفاده از هندسه دقیق ساختمان‌ها و ویژگی‌های فیزیکی فضا انجام گرفت. مدل‌های مرزی به‌صورت ورودی سرعت باد^۷ برای شبیه‌سازی باد غالب در تهران و فشار خروجی^۸ تنظیم شدند. برای بررسی دقت شبیه‌سازی‌ها، از تحلیل استقلال شبکه^۹ استفاده شده است که در آن مدل‌های مختلف مش‌بندی با دقت‌های متفاوت ارزیابی شدند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از مش‌های با دقت بالاتر به نتایج دقیق‌تری در پیش‌بینی جریان باد منجر می‌شود.



شکل ۱. فرایند مدل‌سازی جریان باد و استخراج یافته‌های پژوهش



در مرحله بعد، داده‌های هواشناسی ایستگاه مهرآباد تهران به‌عنوان ورودی برای شبیه‌سازی استفاده شدند. این داده‌ها شامل سرعت، جهت باد، دما و رطوبت بودند. براساس این داده‌ها، شبیه‌سازی‌ها در دو حالت بافت شهری متراکم و بافت حومه‌ای انجام گرفت تا تأثیر تغییرات محیطی بر جریان باد در فضای باز شهرک‌های مسکونی بررسی شود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌منظور شناسایی نقاط بحرانی که سرعت باد در آن‌ها به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه می‌رسد، تحلیل و ارزیابی شدند. این نقاط به‌عنوان نواحی با کمترین آسایش عابران پیاده شناسایی شدند و راهکارهای مختلف برای کاهش سرعت باد در این نواحی ارائه شد.

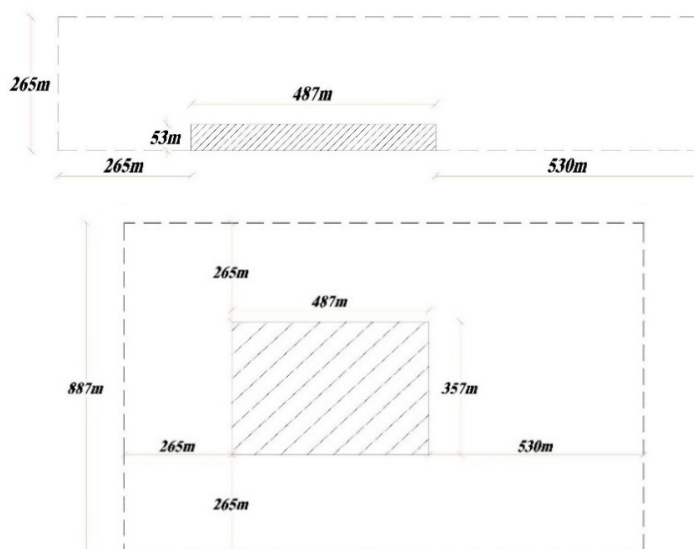
مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

به‌منظور شبیه‌سازی جریان باد و تأثیر آن بر آسایش عابران پیاده در فضای باز شهرک‌های مسکونی، از مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. در این تحقیق، از نرم‌افزار Ansys Fluent برای شبیه‌سازی جریان باد در فضای باز شهرک مسکونی شهرک امید تهران، به‌دلیل قدرت پردازش محاسبه عددی پیچیده‌ترین هندسه‌ها بهره گرفته شد. مدل توربولانسی k-ε برای شبیه‌سازی جریان باد در این تحقیق انتخاب شد؛ چراکه این مدل در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در محیط‌های شهری بسیار مؤثر است (Tominaga et al., 2008).

شرایط مرزی و مدل توربولانسی

در این پژوهش به‌منظور تعیین دامنه محاسباتی از معیار AIJ استفاده شده است (Tominaga et al., 2008). سایت مطالعه‌شده (شهرک امید تهران) از نظر رده قرارگیری در معرض باد^{۱۰}، از نوع محیط شهری متراکم (در مقابل حومه شهری^{۱۱} یا محیط باز^{۱۲}) محسوب می‌شود. ابعاد تونل باد با توجه به ارتفاع بلندترین ساختمان (H=53m) در محدوده هدف انتخاب شده است. بدین منظور، ابعاد دامنه از طرفین و همچنین جبهه روبه‌باد به اندازه ۵H و از سمت جبهه پشت‌به‌باد ۱۰H لحاظ شده است. ابعاد نهایی دامنه محاسباتی برابر با ۱۲۸۲ متر در طول (جهت جریان)، ۸۸۷ متر در عرض و ۲۶۵ متر در ارتفاع (۵H) است (شکل ۲):

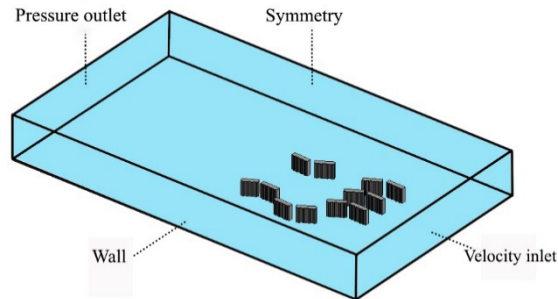
- گسترش بالادست^{۱۳} برابر با ۵H (۲۶۵ متر) برای اطمینان از توسعه کامل پروفیل باد قبل از برخورد به سازه‌ها.
 - گسترش پایین‌دست^{۱۴} برابر با ۱۰H (۵۳۰ متر) برای دریافت کامل توسعه پسا و اطمینان از خروج جریان بدون اغتشاش از دامنه.
 - گسترش‌های جانبی^{۱۵} برابر با ۵H (۲۶۵ متر) در هر طرف برای به حداقل رساندن اثرات انسداد و تأثیر مرز بر جریان.
 - ارتفاع دامنه^{۱۶} برابر با ۵H (۲۶۵ متر) برای جلوگیری از شتاب مصنوعی جریان در نزدیکی سقف.
- نوع مرزها شامل Velocity Inlet برای صفحه ورود جریان، Pressure Outlet برای صفحه خروج، Wall برای کف و Symmetry برای دیواره‌ها و سقف در نظر گرفته شد (شکل ۳).



شکل ۲. ابعاد تونل باد

انتخاب مدل توربولانسی مناسب با مراجعه به مقالات مشابه پیشین و مطالعات تطبیقی انجام گرفت. بررسی‌ها نشان داد بیشتر شبیه‌سازی‌های جریان باد در مقیاس شهری از مدل توربولانسی k-ω به‌دلیل بالاترین میزان انطباق با نتایج تونل باد، بهره می‌گیرند (Javanroodi et al., 2018).

لذا، در این پژوهش نیز از مدل استاندارد $k-\omega$ استفاده شد.



شکل ۳. شرایط مرزی دامنه محاسباتی

متناسب‌سازی پروفیل سرعت باد

داده‌های اولیه اقلیمی از طریق اسناد، منابع کتابخانه‌ای و بررسی‌های میدانی به دست می‌آید. اطلاعات هواشناسی استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌ها و اطلاعات ایستگاه مهرآباد طی سالیان گذشته است. برای تعریف پروفیل باد ابتدا سرعت به‌دست‌آمده از ایستگاه هواشناسی در ارتفاع ۱۰ متری (بافت حومه) برای بافت شهری متراکم (بافت مورد مطالعه) متناسب‌سازی شد. برای متناسب‌سازی سرعت باد در دو بافت متفاوت از رابطه‌نمایی زیر استفاده شد:

$$\frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_z} = \frac{\left[\frac{Z}{Z_{G1}}\right]^{a_1}}{\left[\frac{Z}{Z_{G2}}\right]^{a_2}}$$

در این رابطه \bar{V}_z ، سرعت متوسط باد در ارتفاع مورد نظر در بافت معلوم هواشناسی \bar{V}_z سرعت متوسط باد در همان ارتفاع در بافت مطالعه است. Z_{G1} ارتفاع مورد نظر در بافت معلوم برحسب متر، Z_{G2} ارتفاع گرادبان در بافت مورد مطالعه است. a_1 و a_2 توان‌های عددی مربوط به بافت معلوم (ایستگاه هواشناسی) که محیط حومه ایست و برای بافت مطالعه که محیط شهری با ساختمان‌های متراکم است، به‌ترتیب ۰.۲۵ و ۰.۳۶ در نظر گرفته شده است (Aynsley, 1974). اطلاعات هواشناسی شهر تهران نشان می‌دهد که میانگین سرعت هوا در طول ۶ ماه گرم سال برابر با حداقل ۳.۰۵ و حداکثر سرعت ۳۲.۹ متر بر ثانیه است. جهت باد براساس جهت باد غالب شهر تهران و از سمت غرب به شرق تعریف شده است. بنابراین سرعت باد در ارتفاع متری بافت مورد مطالعه (شهرک امید) به‌ترتیب، حداقل ۱.۸۷ و حداکثر ۲۰.۲۳ متر بر ثانیه به دست آمد. مقدار حاصله با استفاده از رابطه زیر برای دامنه محاسباتی متناسب‌سازی شد. سپس، برای تعریف پروفیل باد در دامنه محاسباتی از رابطه‌نمایی سرعت در لایه مرزی اتمسفری استفاده شد:

$$\frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_G} = \left[\frac{Z}{Z_G}\right]^a$$

در این رابطه \bar{V}_z سرعت هوا در سایت طراحی برحسب متر بر ثانیه و \bar{V}_G سرعت گرادبان هوا برحسب متر بر ثانیه و Z ارتفاع مورد مطالعه برحسب متر و Z_G ارتفاع گرادبان برحسب متر و a توان عددی مربوط به بافت طراحی است که برابر با ۰.۳۶ در نظر گرفته شده است. پس متناسب‌سازی سرعت سرعت‌های حداکثر و حداقل در رابطه فوق، سرعت میانگین ورودی باد در ارتفاع ۱.۷۵ متری (تراز عابر پیاده) به‌ترتیب حداقل ۱ و حداکثر ۱۰.۸ متر بر ثانیه به دست آمد. این دو حالت (حداقل و حداکثر) به‌عنوان سناریوهای شبیه‌سازی استفاده شدند.

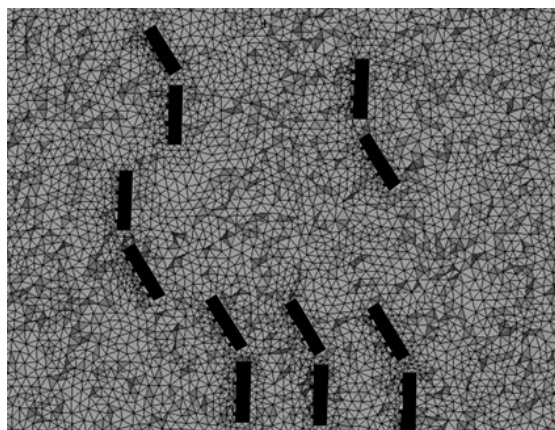
مدل‌سازی پوشش گیاهی به‌عنوان محیط متخلخل

در سناریوهای مداخله، درختان و بوته‌ها به‌عنوان عناصر بادشکن، با استفاده از مدل محیط متخلخل^{۱۷} در نرم‌افزار Ansys Fluent شبیه‌سازی شدند. این رویکرد، تأثیر مقاومت آیرودینامیکی پوشش گیاهی بر جریان باد را از طریق معادله مومنتوم و افزودن عبارات مقاومتی^{۱۸} اعمال می‌کند. دو پارامتر کلیدی، مقاومت لختی (C2) و نفوذپذیری ($\alpha/1$) براساس تراکم پوشش گیاهی تعیین شدند. برای پوشش گیاهی متراکم با ضریب سطح برگ (LAI) بین ۴ تا ۶ مقادیر مقاومتی مورد استفاده شامل یک ضریب لزجت^{۱۹} برابر 10^5 m^{-2} و یک ضریب لختی^{۲۰} برابر با ۱ در جهت جریان باد لحاظ شد. این مقادیر با مطالعات معتبر برای شبیه‌سازی دقیق کاهش سرعت باد توسط بادشکن‌های طبیعی مطابقت دارد.

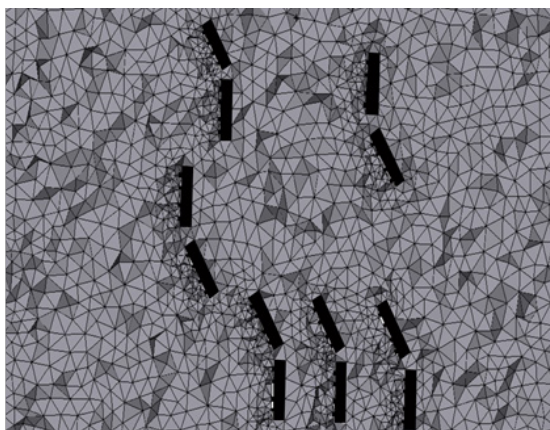


استقلال حل از شبکه

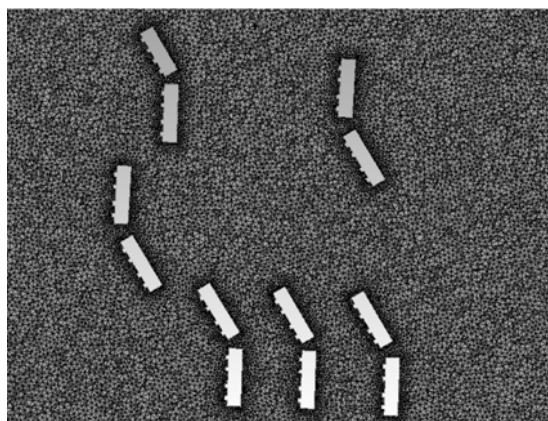
به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، ۴ حالت مختلف مش‌بندی با تعداد مش‌های به ترتیب ۲,۲۶۸,۹۷۴، ۷,۰۱۰,۰۹۴، ۵,۶۲۰,۷۰۱ و ۱۰,۱۵۸,۷۴۶ توسط نرم‌افزار Ansys Fluent ایجاد و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۴). مقدار سرعت باد در یک نقطه مرجع ثابت (P1) در تراز عابرپیاده (۱.۷۵ متر) به عنوان شاخص هم‌گرایی بررسی شد.



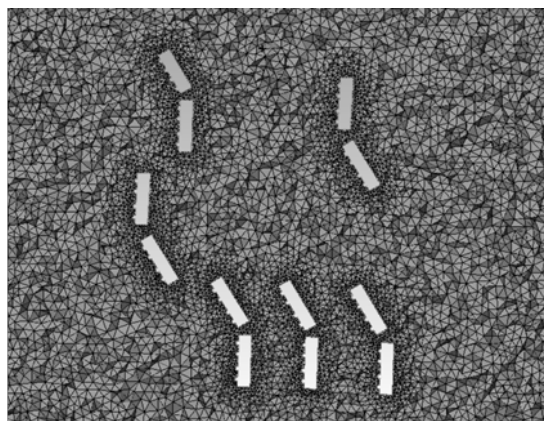
(ب) مش توسط (تعداد مش: ۵۶۲۰۷۰۱)



(الف) مش درشت (تعداد مش: ۲۲۶۸۹۷۴)



(د) مش خیلی ریز (تعداد مش: ۱۰۱۵۸۷۴۶)



(ج) مش ریز (تعداد مش: ۷۰۱۰۰۹۴)

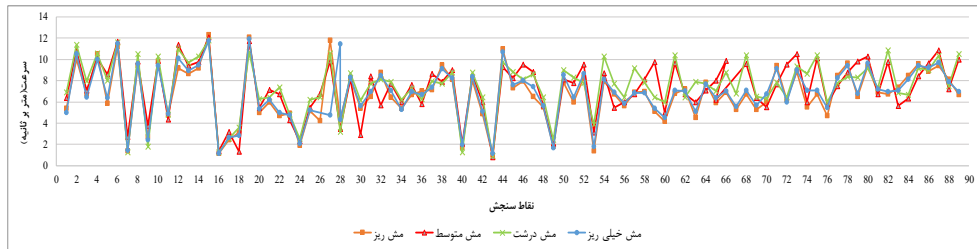
شکل ۴. حالت‌های مختلف دامنه محاسباتی به منظور بررسی استقلال حل از شبکه

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش چگالی شبکه، مقدار سرعت مرجع به یک مقدار ثابت میل می‌کند. انتخاب نهایی شبکه براساس شبکه‌ای صورت گرفت که درصد تغییرات سرعت مرجع آن در مقایسه با شبکه مترکم‌تر (شبکه ۴)، کمتر از ۲ درصد باشد. بر این اساس، شبکه مش با تعداد سلول ۷,۰۱۰,۰۹۴، به دلیل دستیابی به درصد تغییر ۱.۹ درصد، به عنوان شبکه بهینه و مستقل از شبکه انتخاب شد.

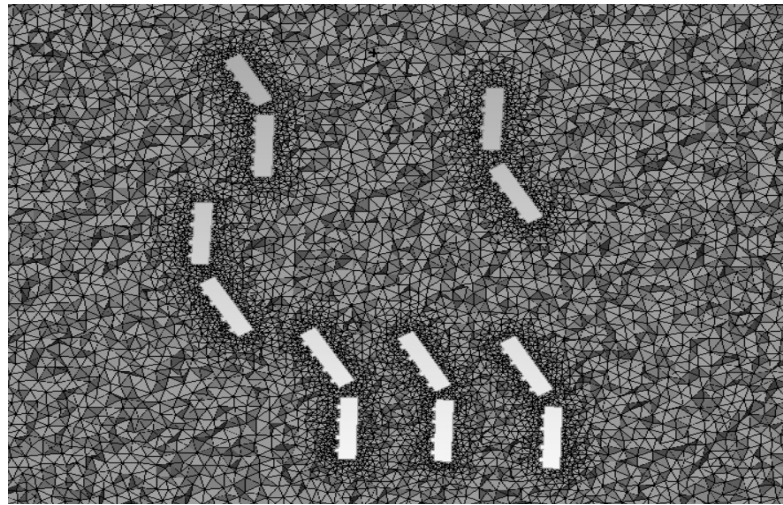
جدول ۱. نتایج بررسی استقلال از شبکه و هم‌گرایی سرعت در نقطه مرجع P1

شبکه (Mesh)	تعداد سلول‌ها (میلیون)	سرعت مرجع (Vref) در نقطه P1 به متر بر ثانیه	درصد تغییر نسبت به شبکه قبلی
شبکه ۱ (درشت)	۲.۲۶	۷.۴۸	—
شبکه ۲ (متوسط)	۵.۶۲	۷.۲۱	۳.۶٪
شبکه ۳ (ریز)	۷.۰۱۰,۰۹۴	۷.۰۷	۱.۹٪
شبکه ۴ (خیلی ریز)	۱۰.۱۵	۷.۰۱	۰.۸٪ (انتخاب شده)

این تعداد مش معادل دقت ۸۰ درصد در نتایج بود که افزایش بیشتر دقت (حالت خیلی ریز) تغییرات محسوسی در نتایج (شکل ۵) ایجاد نکرد و از نظر صرفه اقتصادی محاسباتی به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد (شکل ۶).



شکل ۵. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با ۴ نوع مش‌بندی متفاوت (خیلی ریز تا درشت)



شکل ۶. شبکه‌بندی ساختاریافته در دامنه محاسباتی بر مبنای بررسی استقلال حل از شبکه به تعداد ۲۰۱۰۰۹

طراحی و مشخصات سناریوهای مداخله

براساس تحلیل خط مبنا که نشان داد ۴۰ درصد از مناطق سایت دارای نبود آسایش بادی هستند، دو سناریوی اصلاحی با هدف کاهش حداقل ۶۰ درصد از نواحی غیر آسایشی و بهبود میانگین سرعت باد در تراز عابر پیاده تعریف و شبیه‌سازی شدند.

۱. سناریوی ۱: مداخله راهبردی با پوشش گیاهی

این سناریو بر استفاده از پوشش گیاهی متراکم به‌عنوان بادشکن‌های طبیعی در نواحی با بالاترین سرعت باد (مانند شکاف‌های بین ساختمان‌ها و گوشه‌های بادگیر) متمرکز است. مدل‌سازی پوشش گیاهی با استفاده از رویکرد محیط متخلخل در CFD انجام گرفت. جزئیات فنی مدل‌سازی محیط متخلخل، براساس تراکم زیاد و ضریب سطح برگ (LAI) متداول در گیاهان بادشکن، در جدول ۲ ارائه شده است. در این پژوهش، ساختار فیزیکی پوشش گیاهی، متراکم و با ضریب سطح برگ ۴ تا ۶ در نظر گرفته شده است که معادل استفاده از یک سیستم کاشت چندلایه (ترکیب درختان با تاج متراکم و بوته‌های بلند و پرپشت) است. اگر شاخص سطح برگ کمتر از ۳ باشد، پوشش گیاهی بیش از حد تنگ خواهد بود و باد به راحتی از میان آن عبور کرده و سبب ایجاد اثر تونل باد خواهد شد. چنانچه شاخص سطح برگ بیش از ۷ باشد، دیواره گیاهی مانند یک دیوار بتنی صلب عمل می‌کند. این کار باعث ایجاد تلاطم شدید در پشت مانع و بادهای چرخشی می‌شود و آسایش عابران را مختل می‌کند. شاخص سطح برگ معادل ۴ تا ۶ در کنار انتخاب گیاهان از گونه‌های همیشه‌سبز و بومی منطقه که قادر به حفظ ساختار بادشکن را در تمام فصول باشد، اجازه می‌دهد حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد باد از میان شاخ‌وبرگ عبور کند. این نفوذپذیری باعث می‌شود فشار پشت مانع متعادل شود و سرعت باد در منطقه آسایش (تا ارتفاع قد انسان) به شدت کاهش یابد.

جدول ۲. مشخصات فنی مدل‌سازی محیط متخلخل برای پوشش گیاهی (سناریوی ۱ و ۲)

پارامتر	شرح فنی	مقدار مورد استفاده	ملاحظات
LAI	ضریب سطح برگ (Index Area Leaf)	۴ تا ۶	نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم
D	ضریب لزجت (Resistance Viscous)	10^5 m^{-2}	نشان‌دهنده مقاومت جریان آهسته یا میزان سختی عبور هوا از میان شاخ‌وبرگ‌ها
C _x	ضریب لختی (Resistance Inertial)	1 m^{-1}	نشان‌دهنده مقاومت جریان پرسرعت یا قدرت سدکنندگی فیزیکی گیاه

جدول ۲، ترکیبی از پارامترهای کلیدی را برای رسیدن به آسایش باد دانپورت در محیط‌های شهری تبیین می‌کند. شاخص سطح برگ با مقدار ۴ تا ۶ نشان‌دهنده نوعی پوشش گیاهی کاملاً متراکم و انبوه است. انتخاب این بازه تضمین می‌کند که گیاهان، به‌ویژه گونه‌های همیشه‌سبز بومی



تهران مثل سرو نقره‌ای، به‌عنوان سدی نفوذپذیر مؤثر عمل کنند و بیشترین میزان شاخ‌وبرگ را برای مقابله با بادهای غالب داشته باشند. ضریب لزجت با مقدار 10^5 m^2 مقاومت گیاه در برابر جریان‌های آرام و لایه‌های هوا را نشان می‌دهد. مقدار انتخاب‌شده به این معناست که هوا هنگام عبور از میان فضاهای میکروسکوپی بین برگ‌ها و شاخه‌ها، با اصطکاک متوسطی روبه‌رو می‌شود که به افت انرژی باد کمک می‌کند. ضریب لختی مهم‌ترین پارامتر فیزیکی در برابر بادهای تند تهران است. این ضریب با مقدار 1 m^{-1} نشان‌دهنده قدرت سدکنندگی فیزیکی مناسبی است که بدون ایجاد تلاطم‌های شدید در پشت درخت، سرعت باد را به‌شدت کاهش می‌دهد و آن را به محدوده آسایش عابرپیاده (زیر ۵ متر بر ثانیه) می‌رساند. در نتیجه این تنظیمات عددی، مدلی از یک «بادشکن نفوذپذیر ایدئال» را به‌وجود می‌آورد که در آن، گیاهان برای اجتناب از ایجاد تلاطم مانند دیوار بتنی صلب عمل نمی‌کنند؛ بلکه با ترکیب اثر اصطکاک (لزجت) و برخورد فیزیکی (لختی)، جریان باد را فیلتر می‌کنند و محیطی آرام و با تهویه مطبوع برای ساکنان فراهم می‌سازند.

برای اینکه در تمام فصول سال، به‌ویژه زمستان که بادها سردتر هستند، شاخص سطح برگ در محدوده ۴ تا ۶ باقی بماند، باید از گیاهان همیشه‌سبز سوزنی‌برگ استفاده شود. با توجه به اقلیم نیمه‌خشک تهران و محدودیت منابع آبی، می‌توان گیاهان مندرج در جدول زیر را برای کاشت پیشنهاد داد. به‌منظور رسیدن به سطح قابل تحمل داون‌پورت در سایت، به‌جای یک ردیف درخت با شاخص سطح برگ زیاد، از دو یا سه ردیف با فاصله ترکیب درخت و درختچه استفاده شده است. این کار شکست باد را در ارتفاعات مختلف (از میچ تا بالای سر) انجام می‌دهد. برای بخش‌هایی از شهرک که نیاز به آفتاب زمستانه باشد، می‌توان در جبهه جنوبی از گیاهان خزان‌دار (مثل توت نرم یا چنار) استفاده کرد و در مقابل، برای جبهه‌های دیگر (شمال غرب تهران)، اولویت با لیست همیشه‌سبز زیر باشد:

جدول ۳. گیاهان پیشنهادی (همیشه‌سبز و بومی/ سازگار با تهران) برای ایجاد محیط گیاهی متخلخل (سناریوی ۱ و ۲)

نام گیاه	نوع پوشش	ویژگی برای بادشکن
سرو نقره‌ای	درخت	مقاوم‌ترین گزینه به خشکی و بادهای تهران با تراکم عالی
سرو خمره‌ای (توبای شرقی)	درخت / درختچه	فرم مخروطی و تراکم بسیار بالا برای ایجاد دیواره سبز
اُرس یا سرو کوهی (Junipers)	درختچه	بومی ایران، بسیار مقاوم و همیشه‌سبز با نگهداری کم
پیراکانتا یا خار آتشین	درختچه	همیشه‌سبز، متراکم و دارای تیغ که سدی فیزیکی هم ایجاد می‌کند.
برگ بو (Laurus nobilis)	درختچه	همیشه‌سبز با برگ‌های پهن که شاخص سطح برگ بالایی ایجاد می‌کند.

۲. سناریوی ۲: سیستم طراحی یکپارچه

این سناریو به‌منظور بهره‌برداری از اثر هم‌افزایی بین عناصر طراحی منظر و عناصر سازه‌ای، رویکردی دوگانه را به کار می‌گیرد. در این مدل، کاشت متراکم پوشش گیاهی (مشابه سناریوی ۱) با نصب موانع فیزیکی متخلخل (مانند توری‌های بادشکن یا صفحات مشبک) در ورودی‌های کانالی (مناطق که پدیده تونل شدن باد در ارتفاع بالاتر رخ می‌دهد) ترکیب شد. جزئیات موانع فیزیکی استفاده‌شده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات فنی موانع فیزیکی متخلخل در سناریوی ۲

عناصر مداخله	محل قرارگیری	تخلخل (Porosity - P)	هدف اصلی
دیواره‌های مشبک	ورودی شکاف‌های کلیدی بین بلوک‌ها	$0.50 \leq P \leq 0.4$	کاهش سرعت باد پیش از برخورد به عابر
صفحات شبکه‌ای	بالای سقف پنت‌هاوس‌ها	$P \approx 0.6$	کاهش جریان رو به پایین ^{۱۱}
پوشش گیاهی	تراز پیاده‌رو	(براساس جدول ۵)	شکست جریان در تراز پایین

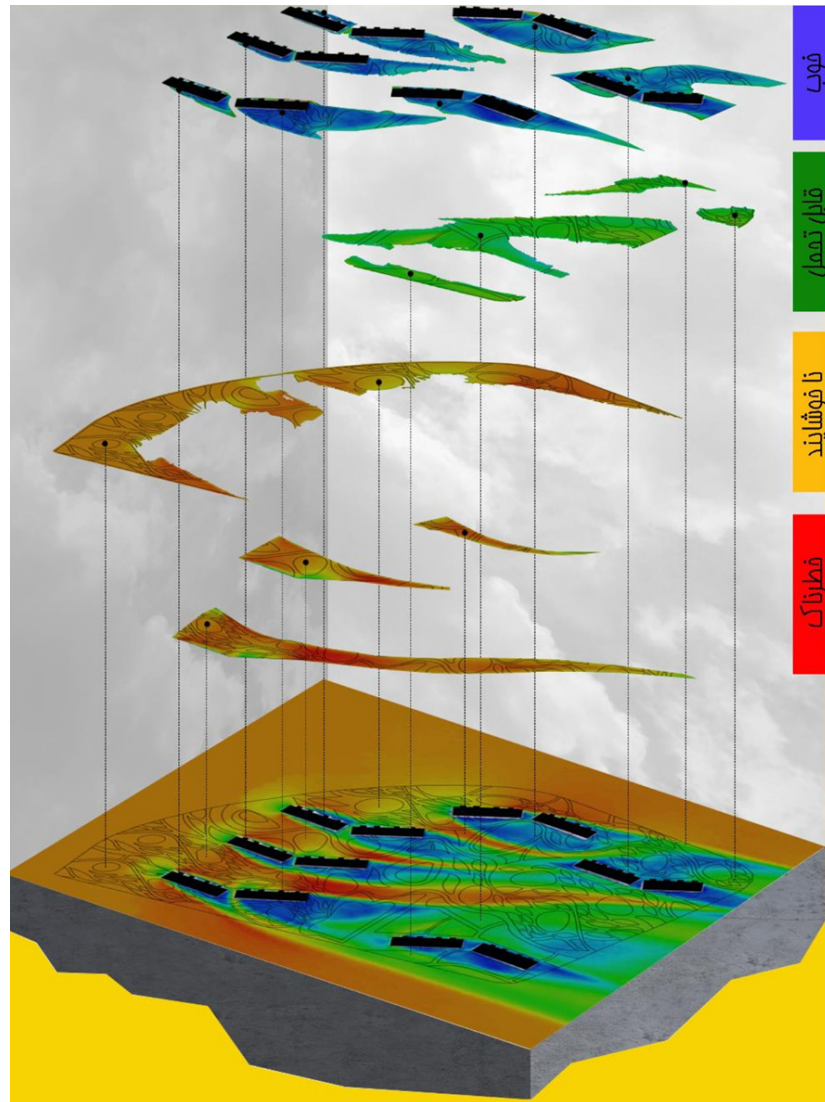
چهارچوب ارزیابی عملکرد و تحلیل آماری

برای اطمینان از ارزیابی عملکردی قوی و کمی‌سازی تأثیر سناریوهای مداخله، یک پروتکل تحلیل آماری جامع برای تولید شبکه نقاط پایش پیاده‌سازی شد. این شبکه سیستماتیک شامل ۴۲ نقطه پایش در سراسر شهرک مسکونی، به‌عنوان نماینده نقاطی که بیشترین حضور عابران پیاده و بالاترین پتانسیل خطر در آن‌ها وجود دارد (شکل ۷). این نقاط براساس توزیع فضایی و نوع فعالیت‌های انسانی به چهار منطقه فضایی آیرودینامیکی کلیدی دسته‌بندی شدند:

- شکاف‌های بین‌ساختمانی (در قالب مسیرهای اصلی عابرپیاده): شامل بخش عمده‌ای از مسیرهای اصلی عابرپیاده که در معرض پدیده تونل شدن باد قرار دارند به تعداد ۱۸ نقطه؛
- حیاط‌های باز (فضاهای گردهمایی تفریحی): شامل فضاهای گردهمایی تفریحی و مسیرهای باز که عمدتاً در مرکز بلوک‌ها قرار دارند، به تعداد ۱۲ نقطه؛



- مناطق ورودی ساختمان نقاط حیاتی واقع در ورودی ساختمان‌ها به تعداد ۸ نقطه؛
- گوشه‌های ساختمان (مناطق شتاب باد بحرانی): شامل نقاطی که تحت تأثیر شتاب باد و پدیده جریان روبه پایین هستند، به تعداد ۴ نقطه.



شکل ۷. پلان موقعیت شهرک مسکونی شهرک امید و شبکه ۴۲ نقطه‌ای پایش آسایش بادی در تراز عابر پیاده

برای اطمینان از ارزیابی عملکردی قوی و کمی‌سازی تأثیر سناریوهای مداخله، یک پروتکل تحلیل آماری جامع پیاده‌سازی شد. از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد تا معنی‌داری آماری تفاوت‌ها در میانگین سرعت باد بین وضعیت خط مبنا و سناریوهای مداخله‌گر (۱ و ۲) در ۴۲ نقطه سنجش تأیید شود. این تحلیل آماری همچنین مبنای کمی‌سازی اثر هم‌افزایی^{۲۲} مشاهده‌شده در سناریوی یکپارچه (بخش پیشین) را فراهم آورد.

یافته‌ها

معیارهای آسایش باد برای عابر پیاده

سرعت‌های مختلف باد از نظر آسایش در محیط باز در استاندارد ایسمو و داون پورت براساس نوع فعالیت افراد در فضاهای باز شهری تقسیم‌بندی می‌شود که شامل چهار دسته مطلوب، قابل تحمل، ناخوشایند و خطرناک هستند (جدول ۵). این استانداردها مبتنی بر مقیاس بوفورت است که بر مبنای سرعت باد در ارتفاع ده‌متری از سطح زمین تعریف و برای تراز عابر پیاده (۱.۷۵ متر) معادل‌سازی شده است. در این معیار، شاخصه‌های ارزیابی سرعت باد براساس چهار نوع فعالیت متداول افراد در فضای باز (پیاده‌روی تند، قدم زدن، نشستن برای مدت زمان کوتاه و طولانی) تعریف می‌شود (Isyumov & Davenport, 1975). با توجه به اینکه در فضاهای باز، سطح آسایش مورد نیاز به کاربری فضا بستگی دارد؛ نظیر کفایت سطح «قابل تحمل» برای



مسیر پیاده‌روی و نیاز به سطح «مطلوب» برای نشیمن طولانی‌مدت، هدف نهایی از مداخلات طراحی در این پژوهش، بر خارج کردن نقاط خطرناک و ناخوشایند از این محدوده‌ها به‌جای رساندن تمام نقاط به سطح مطلوب، تمرکز دارد.

جدول ۵. معیار داون‌پورت، سرعت باد حسب متر بر ثانیه در ارتفاع ۱٫۷۵ متری، برگرفته از (Isyumov & Davenport, 1975)

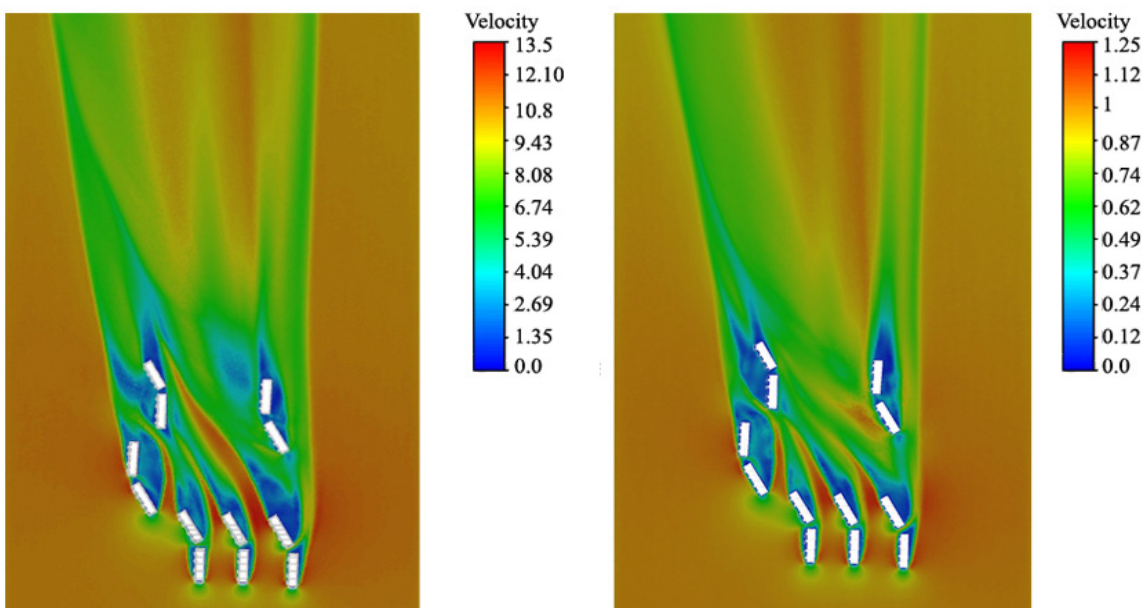
فعالیت	مکان‌ها	سطح احساس		
		خوب	قابل تحمل	ناخوشایند
پیاده‌روی سریع	پیاده‌رو - پیاده‌راه	۵٫۳-۷٫۲	۹٫۳-۷٫۳	۹٫۳-۱۱٫۵
قدم زدن	پارک، ورودی‌ها	۳٫۷-۵٫۳	۷٫۲-۵٫۳	۹٫۳-۷٫۲
نشستن کوتاه‌مدت	پلازا - پارک‌ها	۳٫۷-۲٫۲	۵٫۳-۳٫۷	۵٫۳-۷٫۲
نشستن طولانی‌مدت	فضای بیرونی رستوران، تراس‌ها	۲٫۲	۳٫۷-۲٫۲	۳٫۷-۵٫۳

نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آماری

محدوده مطالعاتی با ابعاد طول ۵۵۸ متر و عرض ۳۵۲ متر، برای ارزیابی سرعت باد براساس چهار نوع فعالیت متداول افراد در فضای باز طراحی شد. شبیه‌سازی جریان باد با سرعت میانگین حداقل (۱ متر بر ثانیه) و حداکثر (۱۰٫۸ متر بر ثانیه) در ارتفاع ۱٫۷۵ متری انجام گرفت. حدود ۴۲ نقطه مهم که ساکنان شهرک مسکونی امید بیشترین میزان حضور را در این نقاط دارند، به‌عنوان نقاط سنجش انتخاب شد. در راستای تحلیل خط مبنا، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حداکثر سرعت باد در شهرک مسکونی امید نشان داد که ۴۰ درصد از ۴۲ مکان پایش شده خارج از معیار آسایش قرار دارند. حداکثر سرعت باد ثبت‌شده در گوشه‌های ساختمان‌ها و شکاف‌ها به ۱۳٫۵ متر بر ثانیه رسید که به‌طور قابل توجهی بیشتر از آستانه آسایش (۷٫۲ متر بر ثانیه) و در محدوده خطرناک (جدول ۵) قرار می‌گیرد.

تحلیل کانتور سرعت باد و ارزیابی خط مبنا

شکل ۸ کانتور سرعت باد را در تراز عابریپاده (۱٫۷۵ متری) برای دو سناریوی سرعت حداقل و حداکثر نشان می‌دهد. کانتور سرعت در ارتفاع ۱٫۷۵ متری متناسب با استاندارد آسایش (داون‌پورت) مشخص است. در سناریوی باد حداکثر (۱۰٫۸ متر بر ثانیه)، الگوی جریان به‌وضوح نشان‌دهنده تشدید سرعت^{۳۳} در شکاف‌های بین بلوک‌ها و در گوشه‌های بیرونی ساختمان‌هاست. حداکثر سرعت ثبت‌شده در این کانتورها به ۱۳٫۵ متر بر ثانیه می‌رسد که معادل سطح «خطرناک» براساس معیار داون‌پورت برای تمام فعالیت‌های عابریپاده است. این نقاط بحرانی عمدتاً در معابر شمالی جنوبی و در فضاهای باز بزرگ بین بلوک‌های ردیف جلو و عقب دیده می‌شوند.

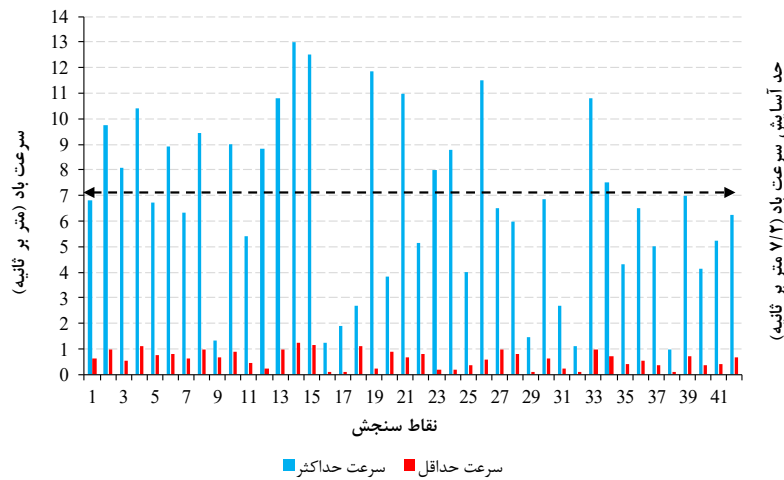


شکل ۸. توزیع فضایی کانتور سرعت باد در تراز عابریپاده (۱٫۷۵ متر) برای وضعیت خط مبنا (سرعت حداکثر ورودی ۱۰٫۸ متر بر ثانیه): همان‌طور که در کانتور نشان داده شده، نواحی با رنگ‌های گرم (قرمز و نارنجی)، نشانگر سرعت‌های بالای باد هستند که آسایش عابران پیاده را به‌طور جدی به خطر می‌اندازند. تمرکز این نواحی بحرانی در شکاف‌های بین‌ساختمانی و گوشه‌های ساختمان، نیاز به مداخلات طراحی در این نقاط را تأیید می‌کند.



تحلیل آماری نقاط سنجش

شکل ۹، سرعت باد (حداقل و حداکثر) را در ۴۲ نقطه سنجش نشان می‌دهد. حد آسایش باد برای فعالیت پیاده‌روی سریع، ۷٫۲ متر بر ثانیه است. نتایج شبیه‌سازی حاصل از جریان باد با سرعت میانگین حداقل (۱ متر بر ثانیه) نشان می‌دهد که براساس شاخص داون پورت هیچ‌گونه مزاحمتی برای ساکنان این شهرک ایجاد نمی‌کند. اما، در شبیه‌سازی جریان باد با سرعت ۱۰٫۸ متر بر ثانیه (سناریوی حداکثر)، مشخص شد که ۴۰ درصد از نقاط سنجش سرعت (معادل ۱۷ نقطه از ۴۲ نقطه) در سطح عابر پیاده (ارتفاع ۱٫۷۵ متری کف پیاده‌راه) خارج از محدوده آسایش قرار گرفته‌اند. این ۱۷ نقطه بحرانی براساس شاخص داون پورت، برای عابران پیاده در حال قدم زدن، نشستن کوتاه و بلندمدت، مزاحمت یا خطر جدی ایجاد می‌کنند.



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای سرعت باد در نقاط سنجش

همان‌طور که در جدول ۵ خلاصه شد، شرایط آسایش بادی در فضاهای باز شهرک مسکونی در وضعیت خط مبنا نامطلوب است؛ به‌طوری‌که ۴۰ درصد از نقاط پایش در محدوده نبود آسایش و خطرناک قرار دارند. توزیع فضایی این نقاط بحرانی در شکل ۸ (کانتور سرعت تمام میدان ۳۴ به وضوح نمایش داده شده است). این شکل وضعیت ۴۰ درصد نبود آسایش را که در جدول ۶ خلاصه شده است، به‌صورت بصری تأیید می‌کند. تحلیل بصری کانتور سرعت نشان می‌دهد که بالاترین سرعت‌ها در شکاف‌های بین ساختمانی (به‌دلیل پدیده تونل شدن باد) و در گوشه‌های ساختمان (به‌دلیل شتاب جریان) متمرکز شده‌اند. این یافته‌ها نیاز مبرم به مداخله طراحی برای بهبود این نواحی را توجیه می‌کند.

جدول ۶. تحلیل آماری وضعیت آسایش بادی در ۴۲ نقطه سنجش (سناریوی سرعت حداکثر ۱۰٫۸ م/ث)

ملاحظات	درصد از کل (۴۲ نقطه)	تعداد نقاط سنجش	بازه سرعت (م/ث)	سطح آسایش (براساس معیار داون پورت)
مناسب برای نشستن طولانی‌مدت	٪۲۳٫۸	۱۰	$V < 3,7$	مطلوب (Good)
مناسب برای پیاده‌روی، نامناسب برای نشستن	٪۳۵٫۷	۱۵	$3,7 < V \leq 7,2$	قابل تحمل (Tolerable)
آسایش عابر پیاده سلب شده است.	٪۲۳٫۸	۱۰	$7,2 < V \leq 9,3$	ناخوشایند (Unpleasant)
تهدید جدی آسایش و ایمنی عابر پیاده	٪۱۶٫۷	۷	$V > 9,3$	خطرناک (Dangerous)
(مطابق با یافته‌های پژوهش)	٪۴۰٫۵	۱۷	$V > 7,2$	نقاط خارج از آسایش (ناخوشایند + خطرناک)

ارزیابی عملکرد و تحلیل آماری سناریوهای مداخله

برای ارتقای آسایش بادی، دو سناریوی اصلاحی با استفاده از CFD ارزیابی شدند:

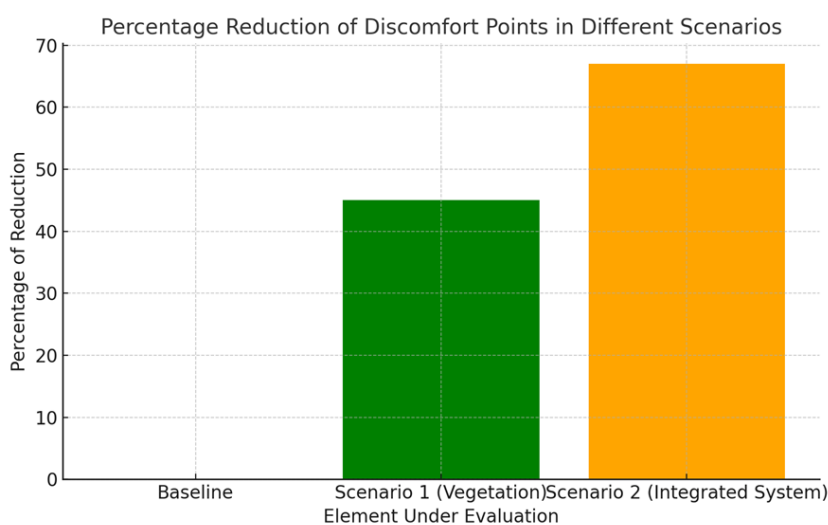
- ۱. مداخلات صرفاً مبتنی بر پوشش گیاهی کاشت درختان متراکم (براساس مدل محیط متخلخل): این سناریو در نواحی بحرانی شناسایی شده (نقاطی با $V < 7,2$ m/s) اعمال شد. نتایج نشان داد که این راهبرد به کاهش میانگین سرعت باد در ۴۲ نقطه سنجش به میزان $3 \pm 25\%$ نسبت به خط مبنا منجر شد. با وجود این، ۲۲ درصد از نقاط همچنان خارج از محدوده آسایش باقی ماندند که عمدتاً در اثر پدیده تونل شدن باد در شکاف‌هایی با ارتفاع زیاد بود.



- سناریوی ۲. سامانه یکپارچه طراحی منظر (پوشش گیاهی + موانع فیزیکی متخلخل): این سناریو شامل ترکیب کاشت مترکم پوشش گیاهی در تراز پیاده‌رو، به همراه نصب موانع فیزیکی متخلخل (با تخلخل $P < 0.5$) در ورودی شکاف‌های کلیدی ساختمان‌هاست. نتایج این سناریو به‌طور چشمگیری برتر بود. کاهش میانگین سرعت باد به میزان $38 \pm 5\%$ نسبت به خط مبنا و کاهش ۶۷ درصد در تعداد نقاط خارج از محدوده آسایش مشاهده شد. این نشان‌دهنده کاهش تعداد نقاط غیرآسایشی از ۱۷ نقطه به ۶ نقطه است.
- تحلیل هم‌افزایی: تحلیل آماری (ANOVA) نشان داد که عملکرد سناریوی یکپارچه (سناریوی ۲) نه تنها مجموع اثرات سناریوی ۱ و موانع فیزیکی، بلکه اثر هم‌افزایی ۱۵ درصد بهبود اضافی را به همراه دارد. هم‌افزایی زمانی رخ می‌دهد که عملکرد ترکیب دو مداخله (پوشش گیاهی + موانع فیزیکی) فراتر از مجموع خطی (جمع ساده) تأثیرات هریک از آن‌ها به‌تنهایی باشد که اثری غیرخطی است. این ضریب از تقسیم «میزان کاهش سرعت باد در حالت ترکیبی» بر «مجموع کاهش سرعت باد در حالت‌های انفرادی» به دست آمده است که تأییدکننده برتری رویکرد نسل سوم (سامانه‌های یکپارچه) در طراحی است. این امر بر اهمیت رویکرد طراحی منظر یکپارچه و عملکردی تأکید می‌کند (جدول ۷ و شکل ۱۰).

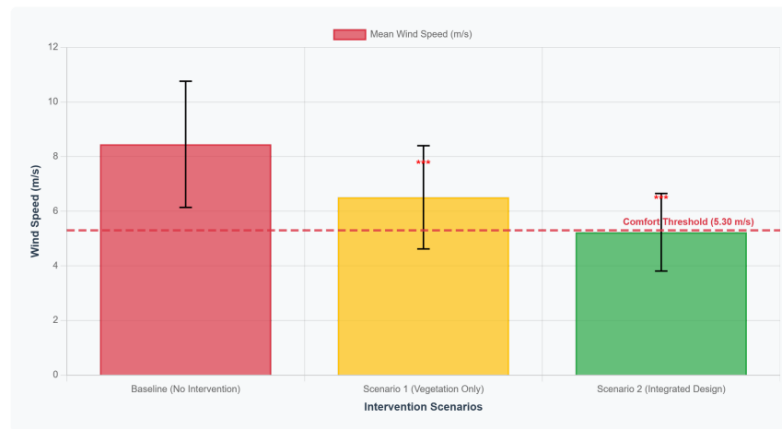
جدول ۷. نتایج عملکرد مقایسه‌ای سناریوهای مداخله همراه با تحلیل آماری

شاخص عملکرد (KPI)	خط مبنا (Baseline)	سناریوی ۱ (پوشش گیاهی صرف)	سناریوی ۲ (سامانه یکپارچه)
کاهش میانگین سرعت باد نسبت به خط مبنا	۰٪	$25 \pm 3\%$	$38 \pm 5\%$
تعداد نقاط خارج از آسایش (از ۴۲)	۱۷ (۴۲٪)	۹ (۲۲٪)	۶ (۱۴٪)
درصد کاهش نقاط نبود آسایش	۰٪	۴۵٪	۶۷٪
بهبود اضافی (هم‌افزایی)	---	---	۱۵٪
وضعیت نهایی آسایش	نامناسب	بهبودیافته	مطلوب



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد سناریوهای مداخله براساس درصد کاهش نقاط نبود آسایش

تحلیل کانتور سرعت باد با مقایسه شکل ۸ (خط مبنا) و شکل ۱۱ (سناریوی ۲)، اثربخشی فضایی هر دو سناریوی مداخله را به‌وضوح نشان می‌دهد. شکل ۸ (کانتور خط مبنا) مناطق بحرانی شتاب باد را در شکاف‌های باریک بین بلوک‌ها و گوشه‌های ساختمان‌ها نشان می‌دهد. حداکثر سرعت باد در این مناطق به ۱۳.۵ متر بر ثانیه می‌رسد که کاملاً در دسته «خطرناک» قرار می‌گیرد. این امر، توزیع نامطلوب سرعت را در تراز عابرپیاده تأیید می‌کند. همچنین نتایج بصری قابل مشاهده در تحلیل‌های جزئی نشان داد که مداخله با پوشش گیاهی (سناریوی ۱)، به‌طور مؤثر این مناطق بحرانی را کاهش می‌دهد. درختان و درختچه‌ها، به‌ویژه در اطراف مسیرهای اصلی، سرعت باد را به‌طور مناسب کاهش می‌دهند و مناطق ناراحت‌کننده را کوچک‌تر می‌کنند؛ اما قادر به از بین بردن کامل آن‌ها نیستند. همان‌گونه که در کانتور سرعت شکل ۱۱ مشخص است، پیاده‌سازی سیستم طراحی یکپارچه در سناریوی ۲، موفق به مهار کامل جریان‌های پرسرعت در نواحی بحرانی شد. الگوی جریان نشان‌دهنده هدایت مجدد باد به سمت ارتفاعات بالاتر و شکست جریان در تراز عابرپیاده است. نقاط قرمز رنگ و نارنجی (نشان‌دهنده سرعت‌های زیاد) که در وضعیت خط مبنا به‌طور گسترده مشاهده می‌شدند، تقریباً به‌طور کامل حذف شده و جای خود را به نواحی سبز و زرد (آسایش کامل) داده‌اند. این شواهد بصری، نتایج آماری جدول ۶ (کاهش ۶۷ درصد نقاط نبود آسایش) را تأیید می‌کند.



شکل ۱۱. توزیع کانتور سرعت باد در تراز عابر پیاده (۱.۷۵ متر) برای سناریوی ۲ (سیستم طراحی یکپارچه)

کمی‌سازی اثر هم‌افزایی و تحلیل فضایی

تحلیل عملکرد مداخلات ترکیبی در سناریوی ۲، اثرات هم‌افزایی قابل توجهی را فراتر از سهم افزودنی منفرد نشان می‌دهد. این اثر هم‌افزایی، کارایی رویکرد طراحی منظر یکپارچه را به‌وضوح اثبات می‌کند و براساس کمی‌سازی زیر ارزیابی شد:

- اثر منفرد سناریوی ۱ (پوشش گیاهی صرف): $4\% \pm 23\%$ بهبود
- اثر نظری صرفاً مانع فیزیکی (از مرور ادبیات): $3\% \pm 18\%$ بهبود
- اثر افزودنی مورد انتظار (جمع خطی تأثیرات): $7\% \pm 41\%$
- اثر مشاهده‌شده در سناریوی ۲ (طراحی یکپارچه): $5\% \pm 38\%$
- افزایش هم‌افزایی: ۱۵ درصد عملکرد اضافی فراتر از ترکیب خطی

این تحلیل نشان داد که ترکیب راهبردی پوشش گیاهی و موانع فیزیکی در نواحی بحرانی، به تولید بهبود عملکردی ۱۵ درصدی فراتر از جمع ساده تأثیرات مجزا منجر شده است. این امر بر اهمیت رویکرد یکپارچه تأکید می‌کند. برای درک بهتر این پدیده در مقیاس فضایی، ضریب هم‌افزایی براساس مناطق کلیدی سایت در جدول ۸ تحلیل شده است.

جدول ۸. تحلیل هم‌افزایی براساس منطقه فضایی

نوع منطقه	خط مبنا (میانگین سرعت) (m/s)	فقط پوشش گیاهی (میانگین سرعت) (m/s)	طراحی یکپارچه (میانگین سرعت) (m/s)	ضریب هم‌افزایی
گوشه‌های ساختمان	9.2 ± 1.8	7.1 ± 1.4	5.3 ± 1.1	1.18
شکاف‌های بین ساختمانی	10.8 ± 2.1	8.4 ± 1.7	6.1 ± 1.3	1.22
حیاط‌های باز	7.3 ± 1.5	5.8 ± 1.2	4.9 ± 0.9	1.08
مناطق ورودی	6.8 ± 1.3	5.2 ± 1.0	4.1 ± 0.8	1.15

بحث و نتیجه‌گیری

بحث

گسترش شهرنشینی و افزایش مهاجرت به‌سوی شهرها در دهه‌های اخیر، نیاز روزافزون به مسکن و توسعه بلندمرتبه‌سازی تبعات متعدد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را به همراه داشته است. در شهرسازی دنیای امروز با توجه به افزایش تعداد ساختمان‌های بلندمرتبه و تراکم ارتفاعی شهرها، یکی از موضوعات اساسی در حوزه آسایش عابران پیاده، تشدید سرعت جریان باد در محدوده اطراف ساختمان‌ها و برج‌های بلندمرتبه است. فضای باز شهرک‌های مسکونی نقش بسیار چشمگیری در شکل‌گیری تعاملات جمعی، گسترش روابط و ارتقا کیفیت زندگی دارد. تأمین آسایش محیطی در کنار کیفیات فضایی، از مهم‌ترین مولفه‌های حضورپذیری این فضاها به‌شمار می‌آید. شهرک مسکونی شهرک امید تهران مصداق بارزی از شرایط مذکور است. این پژوهش با انجام شبیه‌سازی‌های عددی، نقاطی را که در شهرک مسکونی شهرک امید بیشترین میزان سرعت باد را داشتند و آسایش ساکنان را سلب کرده بود، شناسایی کرد. بررسی‌ها نشان داد در پهنه فضای باز بین شهرک‌های مسکونی،



سرعت جریان در تراز عابران پیاده براساس داون‌پورت، خارج از آسایش است.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی آسایش بادی و میزان تأثیر هرکدام از سناریوهای کنترل باد در فضاهای باز شهرک‌های مسکونی با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و مدل توربولانسی $k-\epsilon$ انجام گرفت و دو سناریوی اصلاحی طراحی منظر را مقایسه کرد. نتایج اصلی تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

- شناسایی مشکل خط مبنا: تحلیل خط مبنا نشان داد که ۴۰ درصد (۱۷ نقطه) از ۴۲ نقطه سنجش در تراز عابر پیاده، خارج از محدوده آسایش بادی (سرعت‌های بالاتر از ۷.۲ متر بر ثانیه) قرار دارند. این نبود آسایش عمدتاً ناشی از پدیده‌های شتاب باد در گوشه‌ها و تونل شدن باد در شکاف‌های بین‌ساختمانی بود.
- عملکرد سناریوهای مداخله:

۱. سناریوی ۱ (پوشش گیاهی صرف): این راهبرد موفق به کاهش ۴۵ درصد از نقاط نبود آسایش شد؛ اما همچنان ۲۲ درصد از نقاط نیازمند بهبود بودند. میانگین کاهش سرعت در این سناریو $25 \pm \%$ بود.
۲. سناریوی ۲ (سیستم طراحی یکپارچه): ترکیب راهبردی پوشش گیاهی و موانع فیزیکی متخلخل، به‌عنوان بهترین عملکرد شناخته شد و توانست ۶۷ درصد از نقاط نبود آسایش را برطرف کند (کاهش نهایی به ۱۴ درصد). این سناریو به‌طور میانگین $38 \pm 5 \%$ کاهش سرعت باد را به همراه داشت.

- اثر هم‌افزایی (یافته کلیدی): تحلیل آماری نشان داد که عملکرد سناریوی یکپارچه صرفاً حاصل جمع ساده تأثیرات پوشش گیاهی و موانع فیزیکی نبود. این ترکیب، اثری هم‌افزایی ایجاد کرد که به ۱۵ درصد عملکرد اضافی فراتر از ترکیب خطی مورد انتظار منجر شد. این یافته برتری روش‌های یکپارچه و عملکردگرا در طراحی منظر را اثبات می‌کند.

- تحلیل فضایی هم‌افزایی (محل وقوع): ارزیابی فضایی نشان داد که بیشترین ضریب هم‌افزایی (۱,۲۲) دقیقاً در بحرانی‌ترین نقاط، یعنی شکاف‌های بین‌ساختمانی، رخ داده است. به این معنا که در شکاف‌های بین‌ساختمانی (مناطق تونل شدن باد)، ترکیب این دو عنصر پوشش گیاهان و موانع متخلخل ۲۲ درصد کارایی بیشتری نسبت به حالتی داشته‌اند که اثرات آن‌ها صرفاً باهم جمع شود. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب این دو عنصر، راه‌حلی ویژه و بسیار مؤثر برای کنترل پدیده تونل شدن باد ارائه می‌کند.

یافته‌های پژوهش مبنی بر اینکه ۴۰ درصد از نقاط سنجش در سناریوی باد حداکثر (۱۰,۸ متر بر ثانیه) خارج از محدوده آسایش قرار گرفته‌اند، با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. به‌طور خاص، تشدید سرعت باد تا ۱۳,۵ متر بر ثانیه در شکاف‌ها و معابر، تأییدکننده یافته‌های هالا و شکرانی^{۲۵} (۲۰۲۰) است که بالاترین سرعت باد را در شکاف ساختمان‌ها گزارش کردند. سرعت‌های ثبت‌شده در شهرک امید حتی از محدوده آزردهنده ($V > 7,2 \text{ m/s}$) فراتر رفته و در سطح «خطرناک» ($V > 9,3 \text{ m/s}$) قرار می‌گیرند (جدول ۵) که این امر ضرورت اقدامات اصلاحی فوری را نشان می‌دهد. الگوی چیدمان بلوک‌ها در شهرک امید و نبود بادشکن‌های مؤثر، باعث شده است که جریان باد غالب بدون تضعیف وارد فضاهای بین بلوک‌ها شود و به‌ویژه در گوشه‌های انتهایی و شکاف‌های جانبی، پدیده‌های آیرودینامیکی نامطلوب (مانند گردابه‌های گوشه‌ای و اثر تونل باد) ایجاد کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی

یافته‌ها نشان می‌دهند که رویکردهای مرسوم در چیدمان شهرک‌های مسکونی به‌طور ناکافی به الزامات آسایش بادی پاسخ می‌دهند؛ به‌طوری که ۴۰ درصد از فضاهای باز در شرایط خط مبنا از آستانه‌های آسایش فراتر می‌روند. این نقص سیستماتیک، لزوم ادغام فعال ملاحظات آسایش بادی در فرایندهای طراحی مسکونی را نشان می‌دهد. هم‌بستگی‌های آماری نشان می‌دهند که راهبردهای مداخله یکپارچه، عملکرد برتری را کسب می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که رویکرد ترکیبی ۱۵ درصد بهبود اضافی فراتر از ترکیب خطی مداخلات فردی ارائه می‌دهد. این اثر هم‌افزایی به‌طور خاص در شکاف‌های بین‌ساختمانی (تونل‌های باد)، با بالاترین ضریب هم‌افزایی ۱,۲۲ مشاهده شد. این یافته فرضیات افزودنی مرسوم را به چالش می‌کشد و از توسعه رویکردهای طراحی جامع حمایت می‌کند.

بررسی‌ها نشان داد که در شبیه‌سازی جریان باد با سرعت حداقل (۱ متر بر ثانیه) هیچ‌گونه مزاحمتی برای ساکنان این شهرک ایجاد نمی‌کند؛ اما در سناریوی باد حداکثر (۱۰,۸ متر بر ثانیه)، ۴۰ درصد از نقاط سنجش در ارتفاع ۱,۷۵ متری برای عابران پیاده در حال قدم زدن، و نشستن کوتاه و بلندمدت مزاحمت ایجاد می‌کند. مهم‌ترین یافته این پژوهش، تأیید برتری رویکرد طراحی منظر یکپارچه مبتنی بر عملکرد است. سناریوی ترکیب پوشش گیاهی مترکم با موانع فیزیکی متخلخل (سناریو ۲) با کاهش ۶۷ درصد در مناطق دارای نبود آسایش، بهترین عملکرد را ارائه داد. این نتایج به‌طور کمی نشان دادند که مداخلات منفرد (سناریوی ۱) برای حل کامل مشکل ناکافی هستند و به هم‌افزایی عناصر منظر و فیزیکی نیاز وجود دارد. بر این اساس توصیه می‌شود در فضاهای باز شهرک‌های مسکونی، به‌ویژه در مناطق دارای سرعت بیش از ۹,۳ متر بر ثانیه، از سامانه‌های



بادشکن ترکیبی استفاده شود. همچنین طراحی منظر باید براساس نتایج کمی CFD صورت گیرد تا عناصر متخلخل با تخلخل کنترل شده و پوشش گیاهی متراکم در موقعیت‌های استراتژیک (مانند گوشه‌های ورودی باد و شکاف‌های بین بلوک‌ها) برای شکست جریان و توزیع مجدد باد به کار روند.

براساس تحلیل جامع و کمی عملکرد مداخلات در این پژوهش، یک چهارچوب طراحی مبتنی بر شواهد (جدول ۹) تدوین شد که دستورالعمل‌های زیر را برای مدیریت آسایش بادی در فضاهای باز شهرک‌های مسکونی ارائه می‌دهد. این دستورالعمل‌ها، یافته‌های CFD و تحلیل هم‌افزایی را به اصول کاربردی تبدیل می‌کنند:

جدول ۹. دستورالعمل‌های طراحی مبتنی بر شواهد

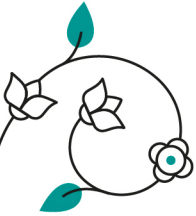
اصل طراحی	آستانه کمی (برگرفته از CFD)	مزیت عملکردی	اولویت پیاده‌سازی
مکان‌یابی راهبردی پوشش گیاهی	حداقل ۸ متر ارتفاع، ۶ متر تاج	۲۰ تا ۲۵٪ کاهش باد	بالا (اثربخشی هزینه)
سامانه‌های مانع یکپارچه	۲ متر ارتفاع، ۴۰٪ تخلخل	۱۵٪ کاهش اضافی (هم‌افزایی)	متوسط (فقط مناطق بحرانی)
مکان‌یابی هم‌افزایی	مناطق مداخله ترکیبی (شکاف‌ها)	افزایش عملکرد غیرخطی (>۱,۰ ضریب هم‌افزایی)	بالا (حداکثر سود)
پایش عملکرد	شبکه پایش ۴۲ نقطه‌ای	اعتبارسنجی و بهینه‌سازی مداوم	ضروری (کنترل کیفیت)

نتایج پژوهش موارد زیر را در راستای پاسخ به پرسش‌های پژوهش آشکار ساخت:

- عوامل مؤثر: مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آسایش جریان باد در این شهرک، شامل الگوی چیدمان بلوک‌های میان‌مرتبه، به‌ویژه ایجاد شکاف‌های رو به باد غالب، ارتفاع بناها و فقدان عناصر تعدیل‌کننده (بادشکن و پوشش گیاهی متراکم) است.
- نقاط بحرانی: نقاط بحرانی عمدتاً در معابری قرار دارند که به موازات جهت باد غالب (غرب به شرق) قرار گرفته‌اند و همچنین در مجاورت گوشه‌های تند بلوک‌ها، که سرعت در آن‌ها تا ۱۳،۵ متر بر ثانیه نیز می‌رسد (شکل ۸ و جدول ۶).
- راهکارها: برای کاهش سرعت جریان باد، راهکارهای متفاوتی پیشنهاد می‌شود که می‌تواند معیار عمل برای ایجاد جریان مطلوب باد در شهرک مسکونی شهرک امید قرار بگیرد. از جمله این راهکارها عبارت‌اند از:
 - کاشت درختان در مناطقی که سرعت باد بیش از ۷ تا ۸ متر بر ثانیه است، به‌عنوان یکی از راهبردهای کاهش سرعت باد. این درختان باید دارای توده‌برگی متراکم باشند تا نقش بادشکن مؤثر را ایفا کنند.
 - استفاده از پوشش گیاهی، مانند بوته‌ها، درختان مخروطی همیشه‌سبز و صفحه‌های متخلخل. توصیه می‌شود از درختان با ضریب پسا زیاد (مانند درختان بومی با تاج پوشش مناسب) و عناصر متخلخل (با تخلخل $P \approx 0.4$) برای کنترل و هدایت جریان باد استفاده شود.
 - اعمال اصلاحات مورفولوژیکی در تراز همکف ساختمان‌ها، مانند ایجاد عقب‌نشینی‌ها یا شیب‌دهی به ورودی‌ها، برای شکست جریان و کاهش گردابه‌ها.

پیشنهاد‌های پژوهشی آتی

توصیه می‌شود پژوهش‌های آتی با رویکرد کمی، به ارزیابی دقیق سناریوهای اصلاحی پیشنهادی (اعمال پوشش گیاهی و بادشکن‌های متخلخل) با استفاده از شبیه‌سازی CFD بپردازند و تأثیر آن‌ها را روی نمودار آسایش (مانند نمودار توربولانسی) و کاهش عددی سرعت باد در ۴۲ نقطه سنجش، مورد سنجش دهند. همچنین، بررسی تأثیرات حرارتی خرد اقلیم (مانند شاخص PMV) در کنار آسایش بادی می‌تواند به ارائه راهکارهای جامع طراحی منظر منجر شود.





بیانیه‌ها

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی مرتبط با این پژوهش وجود ندارد.

مشارکت مالی

این پژوهش از هیچ منبع مالی اعطایی سازمان‌های دولتی یا خصوصی برای پیشبرد تحقیق استفاده نکرده است.

رضایت آگاهانه

تمام شرکت‌کنندگان در این پژوهش، رضایت آگاهانه خود را به صورت کتبی اعلام کرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

ایده‌پردازی و طراحی مطالعه: مهشید قربانیان، سعید بنی‌مهدی دهکردی، مهدی خاک‌زند؛ گردآوری داده‌ها: سعید بنی‌مهدی دهکردی، مهشید قربانیان، نگارش نسخه اولیه: مهشید قربانیان، سعید بنی‌مهدی دهکردی؛ بازبینی و اصلاح مقاله: مهشید قربانیان؛ مدیریت پروژه تحقیقاتی: مهشید قربانیان، مهدی خاک‌زند؛ اعتبارسنجی و تأیید نهایی: تمام نویسندگان نسخه نهایی مقاله را تأیید کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

پی‌نوشت

1. Vitruvius
2. Pedestrian Level Wind Enhancement
3. Micro-scale
4. Mid-rise
5. Drag Coefficient
6. Passive Design
7. Velocity Inlet
8. Pressure Outlet
9. Grid Independence Study
10. Exposure Category
11. Suburban
12. Open Country
13. Upstream
14. Downstream
15. Lateral
16. Height
17. Porous Media
18. Inertial and Viscous Resistance
19. Viscous Resistance D
20. Inertial Resistance C2
21. Downwash
22. Synergy Effect
23. Wind Acceleration
24. Full-Field Contour Plot
25. Hala & Shkodrani

منابع

- بنی‌مهدی دهکردی، سعید؛ قربانیان، مهشید و خاک‌زند، مهدی، ۱۴۰۳. شناسایی عناصر مهم در معماری منظر فضای باز بین مجتمع‌های مسکونی با رویکرد آسایش اقلیمی در برابر باد، هشتمین همایش ملی معماری و شهر پایدار، تهران، <https://civilica.com/doc/2190721>
- رازجویان، محمود. (۱۳۹۳). آسایش در پناه باد، انتشارات دانشگاه شهیدبهشتی، تهران: ایران.
- قربانیان، مهشید، (۱۴۰۳)، بهینه‌سازی طراحی شهری برای کاهش اثرات باد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، هشتمین همایش ملی معماری و شهر پایدار، تهران، <https://civilica.com/doc/2190757>
- رضایی حریری، محمدتقی؛ شیوا نجف خسروی، شیوا و پریا سعادت جو، پریا. (۱۳۹۵)، بررسی تأثیر مقطع ساختمان‌های بلندمرتبه بر رفتار باد در پیرامون بنا، نامه معماری و شهرسازی، دوره نهم، شماره ۱۷، صص ۶۱-۷۷
- مولایی، محمدمهدی؛ پیله‌چی‌ها، پیمان و شادانفر، عطیه. (۱۳۹۸). بهینه‌سازی تناسبات بازشو و جبهه نورگیری، با رویکرد کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های اداری. نقش جهان، مطالعات نظری و فناوری‌های نوین معماری و شهرسازی، ۹(۲)، ۱۱۷-۱۲۳. https://bsnt.modares.ac.ir/article_856_8c-235f89a8143a28a1d6067e959dd858.pdf
- Aguinaga, S., de Virel, M.D., Guillhot, J., Caniot, G., Sanquer, S., Dias, D., & Nguyen, C. (2017). Design of the citadel of Bonifacio urban area through experimental and numerical assessment of pedestrian comfort. Paper presented at the 7th European-African Conference on Wind Engineering (EACWE 2017). <https://cstb.hal.science/hal-02309712/>
- Aynsley, R.J.B.S. (1974). Effects of airflow on human comfort. 9(2), 91-94. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(74\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0007-3628(74)90003-6)



- Aynsley, R.J.E.D.G. (2014). Natural ventilation in passive design. 1-16. <http://www.jstor.org/stable/26151921>.
- Bani-Mahdi Dehkordi, S., Ghorbanian, M., & Khakzand, M. (2024). *Shenasaei-ye anasor-e mohem dar memari-ye manzar-e faza-haye baz beyn-e mojteme-haye maskooni ba rooykard-e asayesh-e eghlimi dar barabar-e bad* [Identification of key elements in landscape architecture of open spaces between residential complexes with a climatic comfort approach toward wind]. In *Proceedings of the 8th National Conference on Architecture and Sustainable City*, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/2190721> [in Persian]
- Blocken, B. (2014). 50 years of computational wind engineering: past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129, 69-102. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008>
- Blocken, B., Roels, S., & Carmeliet, J. (2004). Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(10), 849-873. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.004>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*, 41(2), 238-252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Van Beeck, J.P.A.J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and environment*, 100, 50-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
- Boutet, T.S.J. (1987). *Controlling air movement: a manual for architects and builders*.
- Capeluto, I.G. (2005). A methodology for the qualitative analysis of winds: natural ventilation as a strategy for improving the thermal comfort in open spaces. *Building and environment*, 40(2), 175-181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.07.003>
- Ghorbanian, M. (2024). *Behineh-sazi-ye tarahi-ye shahri baraye kahesh-e asarat-e bad ba estefadeh az dinamikh-e sayalat-e mohasebati (CFD)* [Optimization of urban design to reduce wind effects using computational fluid dynamics (CFD)]. In *Proceedings of the 8th National Conference on Architecture and Sustainable City*, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/2190757> [in Persian]
- Gromke, C., & Ruck, B. (2007). Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—experimental investigation of the flow and concentration field. *Atmospheric Environment*, 41(16), 3287-3302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.043>
- Hala, E., & Shkodrani, N. (2020). Design for wind comfort. The CFD assessment over a future outdoor public space. *Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management*, 1(1), 13-24. <https://dergipark.org.tr/en/pub/apjhad/issue/55024/693250>
- Hong, B., & Lin, B. (2015). Numerical studies of the outdoor wind environment and thermal comfort at pedestrian level in housing blocks with different building layout patterns and trees arrangement. *Renewable Energy*, 73, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.060>
- Iqbal, Q.M.Z., & Chan, A. L. S. (2016). Pedestrian level wind environment assessment around group of high-rise cross-shaped buildings: Effect of building shape, separation and orientation. *Building and environment*, 101, 45-63. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.015>
- Isyumov, N., & Davenport, A.G. (1975). The ground level wind environment in built-up areas. In *Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, (Heathrow 1975) (pp. 403-422).
- Javanroodi, K., Mahdavejad, M., & Nik, V.M.J.A.E. (2018). Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. 231, 714-746. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.116>
- Kuo, C.Y., Wang, R.J., Lin, Y.P., & Lai, C.M. (2020). Urban design with the wind: Pedestrian-level wind field in the street canyons downstream of parallel high-rise buildings. *Energies*, 13(11), 2827. <https://doi.org/10.3390/en13112827>
- Mahgoub, A.O., & Ghani, S. (2021). Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for wind-breaks CFD simulation. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102648>
- Molaie, M. M., Pilehchiha, P., & Shadanfar, A. (2019). *Behineh-sazi-ye tanasobat-e bazsho va jابه-ye noorgiri ba rooykard-e kahesh-e masraf-e energy dar sakhteman-haye edari* [Optimization of opening proportions and daylighting façade with an energy consumption reduction approach in office buildings]. *Naqsh-e Jahan: Theoretical Studies and New Technologies in Architecture and Urbanism*, 9(2), 117-123. https://bsnt.modares.ac.ir/article_856_8c235f89a8143a28a1d6067e959dd858.pdf [in Persian]
- Osman, M. (2011). Evaluating and enhancing design for natural ventilation in walk-up public housing blocks in the Egyptian desert climatic design region (Doctoral dissertation, University of Dundee. https://discovery.dundee.ac.uk/ws/portalfiles/portal/1274519/Osman_phd_2011.pdf
- Razjouyan, M. (2014). *Asayesh dar panah-e bad* [Comfort in shelter from wind]. Tehran, Iran: Shahid Beheshti University Press. [in Persian]
- Rezaei Hariri, M. T., Najaf Khosravi, S., & Saadatjoo, P. (2016). *Barrasi-ye tasir-e maghta-e sakhteman-haye boland-mortabe bar raftar-e bad dar piramoon-e bana* [Investigating the effect of high-rise building cross-sections on wind behavior around buildings]. *Nameh-ye Memari va Shahrsazi (Journal of Architecture and Urbanism)*, 9(17), 61-77. [in Persian]
- Stathopoulos, T. (2009). Wind and comfort. In *5th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE 5, Proceedings*.
- 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>
- 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(9-11), 1541-1550.
 - Yuan, C. (2018). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities. In *Urban Wind Environment: Integrated Climate-Sensitive Planning and Design* (pp. 79-100): Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-5451-8_5
 - Yuan, C., Ng, E., & Norford, L. K. (2014). Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 71, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.008>
 - Zheng, S., Guldmann, J.M., Liu, Z., Zhao, L., Wang, J., Pan, X., & Zhao, D. (2020). Predicting the influence of subtropical trees on urban wind through wind tunnel tests and numerical simulations. *Sustainable Cities and Society*, 57, 102116. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102116>



