



Research Paper

Investigating the Role of Glass Thickness and Air Layer in Enhancing the Thermal Performance of Window Openings: A Climatic Approach for Tehran City

Ashkan Hassani: Department of Architecture and Urbanism, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Shooka Khoshbakht Bahramani * Department of Architecture and Urbanism, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Vahid Ghobadian: Department of Architecture and Urbanism, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2025/02/26 **PP** 1-12 **Accepted:** 2025/06/30

Abstract

In recent decades, optimizing energy consumption in buildings has become a critical concern in architecture and building engineering, particularly in hot and dry regions such as Tehran. Windows play a pivotal role in heat transfer, and improper design and selection significantly increase energy consumption across different seasons. A lack of quantitative data and precise analytical tools for assessing the parameters influencing the thermal performance of windows remains a major challenge in this field. This study aims to provide a quantitative and analytical framework to minimize heat transfer through windows and enhance their thermal performance in buildings located in hot and dry climates, with a specific focus on Tehran. The research is based on simulations conducted using DesignBuilder software. Parameters such as glass thickness, the number and type of internal air layers, and various insulation types were analyzed using real data and the climatic conditions of Tehran. The results were compared with existing standards to identify the impact of each factor. The results indicate that increasing glass thickness, optimizing the design of air layers, and utilizing appropriate insulation can significantly reduce heat loss. This study presents a comprehensive framework for window design that assists architects in making optimal decisions during the design phase. The findings serve as a valuable reference for improving facade openings and reducing energy consumption in buildings with similar climatic conditions.

Keywords: Thermal optimization of windows, Heat Transfer, hot and dry climate of Tehran, building energy simulation, sustainable architecture.

Citation: Hassani, A., Khoshbakht Bahramani, S., Ghobadian, V. (2025). **Investigating the Role of Glass Thickness and Air Layer in Enhancing the Thermal Performance of Window Openings: A Climatic Approach for Tehran City.** *Journal of Sustainable Architecture and Environment*, 2 (8), 1-12.

* **Corresponding author:** Shooka Khoshbakht Bahramani, **Email:** sho.khoshbakht@iauctb.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Under the heightened worldwide energy need and pressing environmental issues, construction and building design practices are undergoing considerable scrutiny. Cities, especially with desert and warm climates like Tehran, are very susceptible to excessive energy requirements due to heating and cooling activities. Of the numerous architectural features, windows are among the most effective elements that regulate heat transfer between internal and external environments. Inefficient design and inappropriate material choice for windows can largely enhance thermal loss or gain, thus contributing substantially to energy use in residential buildings. In spite of the significance of the matter, there is still a considerable deficiency of research on quantitative and site-specific investigation of thermal optimization of multi-layer window systems for the particular climate of Tehran. Thermal properties of glass layers, interstitial air gap, and the window profiles themselves are all parameters commonly examined in isolation rather than through integrated simulation methodologies. In order to fill this literature gap, the present study strives to introduce an integrated simulation-based framework that is capable of guiding the thermal design of multi-glazed windows with a special emphasis on heat balance and energy efficiency improvement.

Methodology

This research is analytical and quantitative in type, and simulation and comparison of the thermal performance of various types of double-glazed windows in an average Tehran residential building are simulated with DesignBuilder simulation software. The simulation parameters are:

- Inner and outer glass thicknesses whose values are variable (from 2 mm to 20 mm),
- A consistent 2-mm thickness of the air gap between the glasses,
- Application of PVC profiles on all types of windows.

The case study is a flat with regular spatial layout, where one living room of 29 m² is selected as the simulation zone. Boundary conditions include indoor comfort temperature ranges (12–21°C in heating, 25–28°C in

cooling), lighting target (150 lux), supply rate of fresh air (10 l/s/person), and mean occupant activity (eating/drinking, metabolic factor = 0.9).

Ten window types were simulated with their glass thickness varied systematically to see the effect on thermal heat balance. The performance measure is the heat balance in kilowatts (kW), positive for gain and negative for loss.

Results and discussion

Simulation findings revealed that thermal insulation enhancement can be measured by increasing inner and outer glass panes' thickness to reduce total heat transmission across window systems. Specifically, windows with outer glass thickness between 2–10 mm showed the largest range of performance with optimum improvement of heat equilibrium at inner glass thickness ranges of 12–14 mm.

Key observations include:

- Window Type 1 (2 mm outer glass): Recorded initial heat loss as -1.72 kW. Inner glass thickness was raised to 12 mm and improved heat balance by +0.23 kW.
- Window Type 5 (10 mm outer glass): Recorded initial heat loss as -1.68 kW, which was improved by +0.22 kW when inner thickness was altered to 12 mm.
- Window Types 8–10 (outer thickness 16–20 mm): Experienced decreasing returns with improvements in performance levelling off at more than 16 mm, pointing to an economic inefficiency to spend more on improving thickness.

In both cases, the fact that a 2 mm air gap was present assisted in improving the insulating advantage but further opening of this gap (beyond the scope of this research) would be preferable. Notably, simulation results compare with research that has experienced reduced benefits once a barrier of glass thickness is passed and has emphasized the importance of economic in addition to thermal performance.

The final-deliverables are 10 synthesizing data matrices of combining glass thickness and corresponding thermal balance, together with technical drawings showing each window design.

Conclusion

The paper provides a comprehensive simulation-based approach to thermal performance analysis and optimization of double-glazed window systems for hot and dry urban climates. The key findings are that:

1. Thermal resistance improves with increasing inner and outer glass thickness, but the gain saturates after 12–16 mm.
2. 12–16 mm outer pane thickness in the windows provides the optimum cost-thermal efficiency ratio.

References

- Abdelhameed, A. T., & Alharari, A. A. (2020). Numerical Analysis of the Effect of Various Window Parameters on the Thermal Performance of a Double Glaze Window in the Climatic Region of Libya.
- Aguilar-Santana, J., Velasco-Carrasco, M., & Riffat, S. (2020). Thermal Transmittance (U-value) Evaluation of Innovative Window Technologies. *Future Cities and Environment*, 6. <https://doi.org/10.5334/fce.99>
- Bae, M., Lee, Y., Choi, G., Kim, S., & Kang, J. (2020). Analysis of the Calculation Method for the Thermal Transmittance of Double Windows Considering the Thermal Properties of the Air Cavity. *Sustainability*, 12(24).
- Banionis, K., Kumžienė, J., Burlingis, A., Ramanauskas, J., & Paukštys, V. (2021). The Changes in Thermal Transmittance of Window Insulating Glass Units Depending on Outdoor Temperatures in Cold Climate Countries. *Energies*, 14(6).
- Berardi, U., Kisilewicz, T., Kim, S., Lechowska, A., Paulos, J., & Schnotale, J. (2020). Experimental and numerical investigation of the thermal transmittance of PVC window frames with silica aerogel. *Journal of Building Engineering*, 32, 101665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101665>
- Danesh, M., Escamilla, E., Pariafsai, F., & Ostadalimakhmalbaf, M. (2019). *Characteristics of Glazing Layers of Double-Skin Facades and Energy Consumption: A Case Study in Arid Climate of Tehran*.
- Ebadati, M., Lork, A., & Alizade Elizei, M. H. (2023). Energy efficiency of residential buildings in Tehran climate by saving energy. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 177-185. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2125438>
- Heydari, A., Sadati, S. E., & Gharib, M. R. (2021). Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 35, 102099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102099>
- Hoseinzadeh, S. (2019). Thermal Performance of Electrochromic Smart Window with Nanocomposite Structure Under Different Climates In Iran. *Micro and Nanosystems*, 11, 154-164. <https://doi.org/10.2174/1876402911666190218145433>
- Khatibi, A., Jahangir, M. H., & Astaraei, F. R. (2023). Developing an IoT-based electrochromic windows for smart buildings. *Advances in Building Energy Research*, 17(2), 193-222. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2175371>
- Kirankumar, G., Saboor, S., Vali, S. S., Mahapatra, D., Talanki Puttaranga Setty, A. B., & Kim, K.-H. (2020). Thermal and cost analysis of various air filled double glazed reflective windows for energy efficient buildings. *Journal of Building Engineering*, 28, 101055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101055>
- Lechowska, A. A., Schnotale, J. A., & Baldinelli, G. (2017). Window frame thermal transmittance improvements without frame geometry variations: An experimentally validated CFD analysis. *Energy and Buildings*, 145, 188-199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.002>
- Li, D., Zhang, C., Li, Q., Liu, C., Arıcı, M., & Wu, Y. (2020). Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114547>
- Paulos, J., & Berardi, U. (2020). Optimizing the thermal performance of window frames through aerogel-enhancements. *Applied Energy*, 266, 114776. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114776>
- Perumal, S., Rajendrian, S., Vijayan, V., Dinesh, s., & Pandiyan, L. (2020). Experimental study about

- thermal resistance and heat transfer analysis regarding air gap between two glasses on window for the domestic use. *Thermal Science*, 24, 31-31.
<https://doi.org/10.2298/TSCI190411031P>
- Saadatian, S., Simões, N., & Freire, F. (2021). Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components. *Building and Environment*, 188, 107516.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107516>
- Shaik, S., Kirankumar, G., Ghosh, A., Arumugam, C., & Ramana, M. (2021). Energy Savings and Carbon Emission Mitigation Prospective of Building's Glazing Variety, Window-to-Wall Ratio and Wall Thickness. *Energies*, 14, 1-19.
<https://doi.org/10.3390/en14238020>
- Sourav Kumar, S. A., Harpreet Singh, Kaustuv Shandilya, Pema, Sunny Kaura. REVIEW ON WINDOWS OPTIMIZATION FOR ENERGY EFFICIENT BUILDINGS. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* (www.jetir.org), 8(4), 20-27.
- Takada, K., Hayama, H., Mori, T., & Kikuta, K. (2021). Thermal insulated PVC windows for residential buildings: feasibility of insulation performance improvement by various elemental technologies. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(3), 340-355.
<https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1798773>
- Van Den Bossche, N., Buffel, L., & Janssens, A. (2015). Thermal Optimization of Window Frames. *Energy Procedia*, 78, 2500-2505.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.251>
- Xu, X., Xie, J., Zhang, X., Gao, S., Cao, Y., & Liu, J. (2023). Optimal selection of window components in China based on energy performance modeling. *Energy and Buildings*, 297, 113400.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113400>



مقاله پژوهشی

بررسی نقش ضخامت شیشه و لایه هوایی در افزایش عملکرد حرارتی بازشو پنجره با رویکرد اقلیمی در شهر تهران

اشکان حسینی: دانشکده معماری و شهرسازی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 شوکا خوشبخت بهرمانی^۱: دانشکده معماری و شهرسازی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 وحید قبادیان: دانشکده معماری و شهرسازی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸ صص ۱۲-۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

چکیده

در دهه‌های اخیر، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به دغدغه‌ای مهم در معماری و مهندسی ساختمان تبدیل شده است، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک مانند تهران. پنجره‌ها نقش کلیدی در انتقال حرارت دارند و طراحی و انتخاب نامناسب آن‌ها منجر به افزایش مصرف انرژی (بر اثر افزایش اتلاف حرارتی) در فصول مختلف می‌شود. داده‌های کمی ناکافی و نیز عدم بهره‌برداری از ابزارهای تحلیلی دقیق برای بررسی پارامترهای مؤثر بر عملکرد حرارتی پنجره‌ها، سبب ایجاد خلا در دستاوردهای کمی مرتبط با این حوزه گردیده است. این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب کمی و تحلیلی در جهت کاهش انتقال حرارتی مربوط به باز شو پنجره‌ها و نیز در راستای بهبود عملکرد حرارتی آن‌ها در ساختمان‌های مناطق گرم و خشک، به‌ویژه تهران، انجام شده است. تحقیق حاضر مبتنی بر شبیه‌سازی در نرم‌افزار Design Builder و نیز استخراج و تحلیل دستاوردهای کمی صورت گرفته است. پارامترهایی مانند ضخامت شیشه، تعداد و نوع لایه‌های هوای داخلی، و انواع عایق‌بندی، با استفاده از داده‌های واقعی و شرایط اقلیمی تهران مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج با استانداردهای موجود مقایسه شده تا تأثیر هر عامل مشخص گردد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت شیشه، طراحی بهینه لایه‌های هوایی، و استفاده از عایق مناسب می‌تواند اتلاف حرارت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. این پژوهش، چارچوبی جامع برای طراحی پنجره‌ها ارائه داده که می‌تواند به معماران در اتخاذ تصمیمات بهینه در مراحل طراحی کمک کند. یافته‌ها به‌عنوان مرجعی برای بهبود بازشوهای نما و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مشابه اقلیمی کاربرد دارند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی حرارتی پنجره‌ها، انتقال حرارت، اقلیم گرم و خشک تهران، شبیه‌سازی انرژی ساختمان، معماری پایدار

استناد: حسینی، اشکان؛ خوشبخت بهرمانی، شوکا و قبادیان، وحید (۱۴۰۳). بررسی نقش ضخامت شیشه و لایه هوایی در افزایش عملکرد حرارتی بازشو پنجره با رویکرد اقلیمی در شهر تهران. فصلنامه معماری و محیط پایدار، ۲(۸)، ۱-۱۲.

^۱ نویسنده مسئول: شوکا خوشبخت بهرمانی، پست الکترونیکی: sho.khoshbakht@iauctb.ac.ir

مقدمه

در دهه‌های اخیر، مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از دغدغه‌های اصلی در زمینه‌های معماری و مهندسی ساختمان تبدیل شده است. این مسئله به ویژه در مناطقی با اقلیم‌های خاص، مانند مناطق گرم و خشک، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از آنجایی که پنجره‌ها به‌عنوان یکی از اجزای اصلی بازشو در نمای ساختمان نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال حرارت دارند، طراحی و انتخاب مناسب این اجزا می‌تواند تأثیر بسزایی در عملکرد انرژی ساختمان داشته باشد (Saadatian et al., 2021; Xu et al., 2023). در مناطقی مانند تهران، انتخاب نامناسب مواد، طراحی ناکارآمد پنجره‌ها، و عدم استفاده از عایق‌بندی مناسب، منجر به افزایش قابل توجه مصرف انرژی برای سرمایش در تابستان و گرمایش در زمستان می‌شود (Ebadati et al., 2023). از این رو، تحقیق در مورد راهکارهای بهینه‌سازی پنجره‌ها برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از اولویت‌های اصلی در حوزه معماری پایدار تبدیل شده است (Sourav Kumar).

با وجود تأثیر بالای پنجره‌ها در انتقال حرارت، مطالعاتی که به‌صورت جامع و هم‌زمان به بررسی عوامل مؤثر مانند ضخامت شیشه، لایه‌های هوای داخلی و عایق‌بندی بپردازند، اندک هستند. در اقلیم تهران نیز نبود داده‌های بومی و ابزارهای شبیه‌سازی دقیق، روند طراحی بهینه را دشوار کرده است. بنابراین، ایجاد یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی می‌تواند این خلأ را پر کرده و به معماران در تصمیم‌گیری بهتر کمک کند.

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی عملکرد حرارتی پنجره‌ها در اقلیم شهر تهران، رویکردی کمی و تحلیلی ارائه می‌دهد. تمرکز مطالعه بر کاهش انتقال حرارت و نیز حمایت از تصمیم‌گیری معماران در مراحل طراحی است. یافته‌ها می‌توانند به صرفه‌جویی انرژی، کاهش هزینه‌ها و بهبود طراحی نما در مناطق مشابه اقلیمی کمک کنند.

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و بر پایه داده‌های واقعی اقلیم تهران، تأثیر عواملی مانند ضخامت شیشه و نوع عایق‌بندی بر کاهش انتقال حرارت پنجره‌ها شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج این شبیه‌سازی‌ها برای ارائه راهکارهایی جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی‌های آینده به کار گرفته می‌شود.

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

ضریب انتقال حرارتی بازشو پنجره

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پنجره‌های دوجداره و هوشمند الکتروکرومیک با ساختارهای نانوکامپوزیتی می‌توانند به‌طور مؤثری مصرف انرژی ساختمان را کاهش دهند (Hoseinzadeh, 2019). بر اساس پژوهشی در سال ۲۰۱۹، تغییر تعداد لایه‌های لعاب در پوسته داخلی نماهای دوجداره نسبت به تغییر در پوسته بیرونی در اقلیم تهران در کاهش مصرف انرژی کارآمدتر است (Danesh et al., 2019). برای پنجره‌ها در آب و هوای سرد، ترکیب آئروژل‌های سیلیکا و مواد تغییر فاز عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد، با ضخامت آئروژل بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر و حداکثر بهره‌برداری از گرمای نهان PCM را افزایش می‌دهد (Li et al., 2020). بر اساس پژوهشی در سال ۲۰۲۱، بهینه‌سازی طراحی پنجره‌ها از لحاظ نوع و ضخامت شیشه، نسبت پنجره به دیوار، و ضخامت دیوار نقش مؤثری در کاهش بارهای گرمایشی و سرمایشی دارد (Shaik et al., 2021). همچنین، محاسبه دقیق U-value برای ارزیابی انتقال حرارتی انواع پنجره‌ها اهمیت بالایی دارد. بررسی‌های تجربی نشان داده‌اند که شیشه‌های وکیوم $W/(m^2.Kg)$ ۱٫۱۲ و دوجداره با آئروژل $W/(m^2.Kg)$ ۲٫۵۲ عملکرد بهتری نسبت به شیشه دوجداره سنتی $W/(m^2.Kg)$ ۳٫۰۹ دارند (Aguilar-Santana et al., 2020). مطالعات دیگر تأکید کرده‌اند که U-value باید با توجه به دمای واقعی محیط خارجی بازنگری شود، زیرا کاهش دما باعث تغییر ضریب انتقال حرارت پنجره می‌شود (Banionis et al., 2021). مقاله‌ای در سال ۲۰۲۰، نشان داد که با پر کردن فریم‌های UPVC با گرانول آئروژل، می‌توان انتقال حرارت را تا ۳۰٪ کاهش داد (Berardi et al., 2020).

انتقال حرارت فریم بازشو پنجره

در پژوهشی منتشرشده در سال ۲۰۲۰، ضریب انتقال حرارتی استاندارد برای پنجره‌های سه‌جداره PVC برابر $W/(m^2.K)$ ۰٫۷ تعیین شده است. با توجه به هزینه و وزن بالای شیشه‌های چهارجداره، پژوهشگر روشی جایگزین پیشنهاد داده که ضریب انتقال حرارت را تا ۰٫۴۶ $W/(m^2.K)$ کاهش می‌دهد (Takada et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر با تمرکز بر بهینه‌سازی حرارتی قاب‌های پنجره، شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی برای بررسی عملکرد حرارتی قاب‌های PVC، آلومینیومی و چوبی انجام شده و نشان داده شده است که هنوز پتانسیل قابل توجهی برای بهبود وجود دارد (Van Den Bossche et al., 2015). همچنین، پژوهشی در سال ۲۰۱۷ دو روش برای کاهش انتقال حرارت

قاب‌های PVC بدون تغییر در ابعاد یا جنس ارائه داده است: استفاده از فوم پلی‌یورتان در حفره‌های هوا و بهینه‌سازی پوشش‌های کم‌گسیل سطحی. این دو روش در شبیه‌سازی دوبعدی به ترتیب کاهش انتقال حرارت تا ۲۷٪ و ۲۸٪ را نشان داده‌اند (Lechowska et al., 2017).

انتقال حرارت تغییرات جداره بازشو پنجره

مطالعه‌ای در مجله Sustainability (2020) نشان داده است که روش رایج دولت کره برای محاسبه انتقال حرارتی پنجره‌های دوجداره ناکارآمد است، زیرا خواص حرارتی حفره هوای بین شیشه‌ها را در نظر نمی‌گیرد. در این پژوهش، از طراحی حفره‌های هوا بر اساس استانداردهای بین‌المللی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای محاسبه دقیق‌تر U-value استفاده شده است (Bae et al., 2020). همچنین، در مقاله‌ای منتشرشده در سال ۲۰۲۳، بهره‌گیری از پنجره‌های الکتروکرومیک در تعامل با اینترنت اشیاء برای کنترل تابش خورشیدی بررسی شده و نتایج آزمایش در شش اقلیم مختلف نشان داده که این فناوری می‌تواند به‌طور متوسط تا ۴۵٪ مصرف انرژی برای روشنایی و سرمایش را کاهش دهد (Khatibi et al., 2023).

مواد و روش تحقیق

با توجه به آنچه در بخش مقدمه در خصوص سوال پژوهش حاضر مطرح شده است، این پژوهش به دنبال دستیابی به یک چهارچوب قابل اتکا در زمینه انتقال حرارتی (تعادل حرارتی) بازشو‌های پنجره‌های چند جداره می‌باشد تا به وسیله آن، تأثیری که بر انتقال حرارت ساختمان‌ها از طریق جداره‌های شیشه‌ای خواهد داشت، در زمان طراحی ساختمان‌شناسایی گردد. برای دستیابی به این هدف، مراحل پژوهش در این قسمت تشریح می‌گردد.

تعیین نمونه موردی

با توجه به فاصله تحقیقاتی مطرح شده در مقدمه این پژوهش، سنجش و ارزیابی میزان انتقال حرارتی از طریق بازشو‌های پنجره، برای شهر تهران و اقلیم مشابه آن مورد نظر می‌باشد. در این راستا، نمونه موردی انتخاب شده، یک واحد مسکونی می‌باشد که بر اساس تیپولوژی طراحی و ساخت ابنیه در تهران، انتخاب گردیده است. شکل ۱، نمایانگر یک پلان تیپ از ساختمان‌های مسکونی است که به طور معمول در تهران، طراحی و ساخته می‌شود. در پلان نامبرده، فضاهایی که به رنگ آبی معین شده‌اند،



شکل ۱. پلان تیپولوژی طراحی و ساخت مسکونی در تهران (ماخذ: نگارندگان)

به عنوان موارد ثابت (متغیرهای ثابت فضایی) تعیین شده‌اند و نقشی در شبیه‌سازی ندارند. محدوده‌ای که به رنگ بنفش نمایش داده شده‌اند، فضای اصلی مورد نظر در شبیه‌سازی می‌باشد که بخش نشیمن واحد مسکونی می‌باشد. شکل ۲ به عنوان بزرگنمایی فضای مورد نظر در فرآیند شبیه‌سازی این پژوهش مطرح می‌باشد.



شکل ۲. پلان بزرگنمایی بخش شبیه سازی شده (ماخذ: نگارندگان)

در این میان، فضایی که با رنگ زرد مشخص شده است، به عنوان حایل میان فضاهای فرعی (عدم مشارکت در شبیه سازی) و فضای اصلی (مشارکت داده شده در شبیه سازی) مورد نظر می است که نقشی در فرآیند شبیه سازی این پژوهش ندارد.

جدول ۱. راهنمای نقشه نمونه موردی

۲۹ متر مربع	فضای اصلی (استفاده شده در شبیه سازی)
۳۰ متر مربع	فضای فرعی (استفاده نشده در شبیه سازی)
۷ متر مربع	فضای حائل

(ماخذ: نگارندگان)

مشخصات شبیه سازی

پس از تعیین نمونه های مورد مطالعه در این تحقیق، انجام شبیه سازی نرم افزاری جهت دستیابی به نتایج صورت خواهد پذیرفت. در طی این مرحله، موارد ورودی به نرم افزار شبیه سازی Design Builder معین می گردند. جدول شماره ۲ بیانگر ویژگی های اعمال شده به مدلسازی نمونه موردی در نرم افزار می باشد که در این قسمت مورد تشریح قرار می گیرند.

جدول شماره ۲. مشخصات شبیه سازی در نرم افزار Design Builder

1.Activity Template	
Template	Domestic Lounge
Sector	Residential space
Zone type	Standard
Include zone in thermal calculation	+
Include zone in Radiance daylighting calculation	+
2.Floor Areas and Volumes	
Floor area (m2)	29.00
Zone volume (m3)	78.30
Inner surface mode	Deflation
3.Occupancy	
Occupancy density (people/m2)	0.050
Schedule	Dwell_DomLounge_Occ
4.Environmental Control	
4.1. Heating set point temperature	
Heating (°C)	21.00
Heating set back (°C)	12.00
4.2. Cooling set point temperature	
Cooling (°C)	25.00
Cooling set back (°C)	28.00
4.3. Humidity control	
RH Humidification set point (%)	10.00
RH Dehumidification set point (%)	90.00
5.Construction template	
External wall	Cement Block
Below grade walls	Brick/brick wall (insulated to 1995 regs)
Flat roof	Flat roof U-value = 0.25 W/m2K
Pitched roof (occupied)	Clay tiles (25mm) on air gap (20mm)

(ماخذ: نگارندگان)

در فرآیند شبیه سازی این پژوهش، متغیرهای ثابت، مستقل و وابسته بشرح ذیل معرفی می گردند:

بحث و ارائه یافته‌های تحقیق

چنان که از عنوان این بخش تبیین شده است، نتایج حاصل از شبیه سازی مطابق موارد مطرح شده در بخش های ۱ و ۳، ارائه گردیده است. در بخش نخست، نتایج حاصل شده در قالب جدول و دیاگرام ارائه می گردد و پس از تعریف متغیر های مورد نظر در شبیه سازی، هر یک از انواع پنجه های مذکور، به تفصیل تشریح خواهند شد.

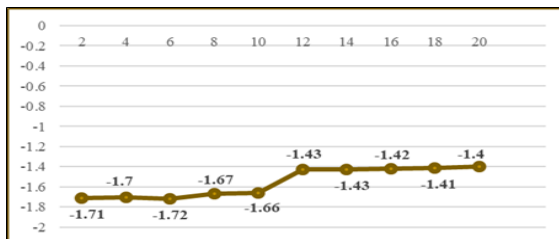
جدول ۳. نتایج بالانس حرارتی و تغییرات حاصل از شبیه سازی

[illegible]

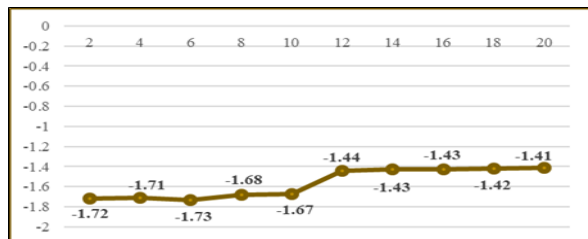
۶	-۱,۷۳	-۰,۰۲	۶	-۱,۴۱	+۰,۰۱
۸	-۱,۶۹	+۰,۰۴	۸	-۱,۴۱	۰
۱۰	-۱,۶۸	+۰,۰۱	۱۰	-۱,۴۰	+۰,۰۱
۱۲	-۱,۴۳	+۰,۲۵	۱۲	-۱,۳۹	+۰,۰۱
۱۴	-۱,۴۳	۰	۱۴	-۱,۳۸	+۰,۰۱
۱۶	-۱,۴۱	+۰,۰۲	۱۶	-۱,۳۸	۰
۱۸	-۱,۴۰	+۰,۰۱	۱۸	-۱,۳۷	+۰,۰۱
۲۰	-۱,۴۰	۰	۲۰	-۱,۳۶	+۰,۰۱
۲	-۱,۶۹	-	۲	-۱,۴۲	-
۴	-۱,۶۷	+۰,۰۲	۴	-۱,۴۲	۰
۶	-۱,۶۹	-۰,۰۲	۶	-۱,۴۱	+۰,۰۱
۸	-۱,۶۵	+۰,۰۴	۸	-۱,۴۰	+۰,۰۱
۱۰	-۱,۶۴	+۰,۰۱	۱۰	-۱,۴۰	۰
۱۲	-۱,۴۲	+۰,۲۲	۱۲	-۱,۳۸	+۰,۰۲
۱۴	-۱,۴۱	+۰,۰۱	۱۴	-۱,۳۸	۰
۱۶	-۱,۴۰	+۰,۰۱	۱۶	-۱,۳۷	+۰,۰۱
۱۸	-۱,۴۰	۰	۱۸	-۱,۳۶	+۰,۰۱
۲۰	-۱,۳۹	+۰,۰۱	۲۰	-۱,۳۵	+۰,۰۱
۲	-۱,۶۸	-	۲	-۱,۴۲	-
۴	-۱,۶۶	+۰,۰۲	۴	-۱,۴۱	+۰,۰۱
۶	-۱,۶۸	-۰,۰۲	۶	-۱,۴۰	+۰,۰۱
۸	-۱,۶۴	+۰,۰۴	۸	-۱,۳۹	+۰,۰۱
۱۰	-۱,۶۳	+۰,۰۱	۱۰	-۱,۳۹	۰
۱۲	-۱,۴۱	+۰,۲۲	۱۲	-۱,۳۸	+۰,۰۱
۱۴	-۱,۴۰	+۰,۰۱	۱۴	-۱,۳۷	+۰,۰۱
۱۶	-۱,۴۰	۰	۱۶	-۱,۳۶	+۰,۰۱
۱۸	-۱,۳۹	+۰,۰۱	۱۸	-۱,۳۶	۰
۲۰	-۱,۳۸	+۰,۰۱	۲۰	-۱,۳۵	+۰,۰۱

(ماخذ: نگارندگان)

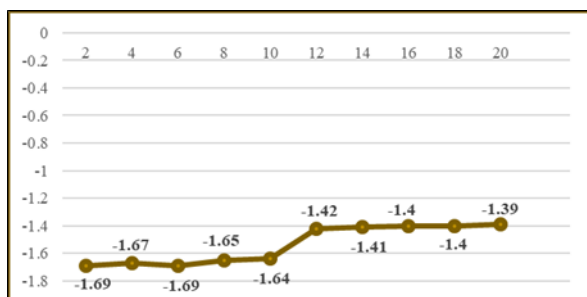
بر اساس نتایج حاصل شده در جدول، تغییرات در ضخامت شیشه‌های داخلی و بیرونی، تاثیر قابل توجهی بر اتلاف حرارتی پنجره‌ها دارد. به طور کلی، با افزایش ضخامت شیشه‌ها و لایه بالانس حرارتی به طور متوسط افزایش یافته و اتلاف حرارتی کاهش می‌یابد. برای نمونه، در پنجره‌هایی با ضخامت شیشه داخلی ۲ میلی‌متر، تغییرات بالانس حرارتی معمولاً منفی بوده و نشان‌دهنده اتلاف حرارتی است. با افزایش ضخامت شیشه به ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر، بالانس حرارتی به طور تدریجی به سمت مقادیر مثبت (کاهش اتلاف حرارتی) حرکت می‌کند. این تغییرات نشان‌دهنده آن است که هر چه ضخامت شیشه‌ها و لایه‌های هوایی افزایش یابد، امکان حفظ حرارت بیشتر می‌شود و پنجره‌ها عملکرد بهتری در زمینه عایق حرارتی از خود نشان می‌دهند.



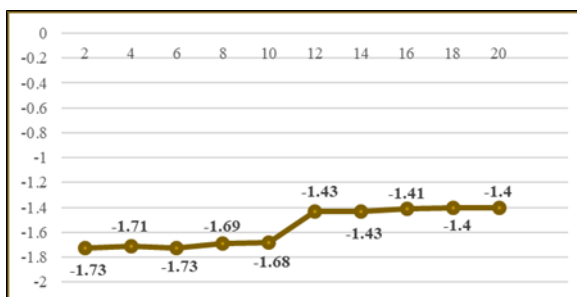
نمودار ۲. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع دوم



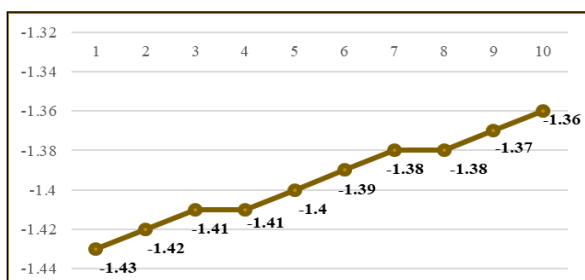
نمودار ۱. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع اول



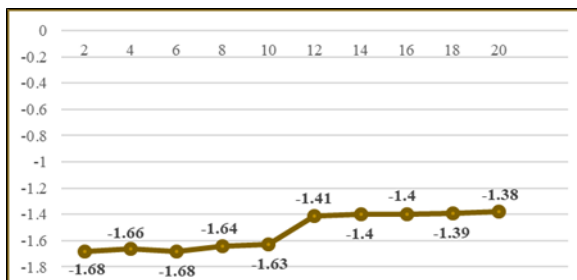
نمودار ۴. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع چهارم



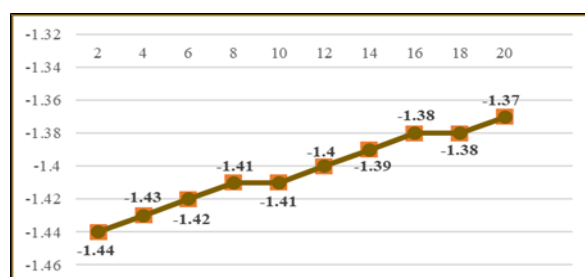
نمودار ۳. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع سوم



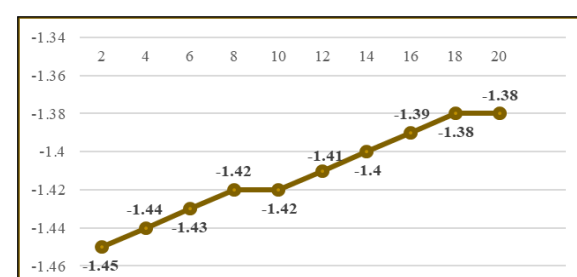
نمودار ۶. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع ششم



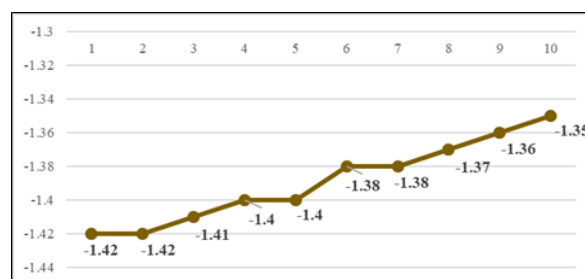
نمودار ۵. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع پنجم



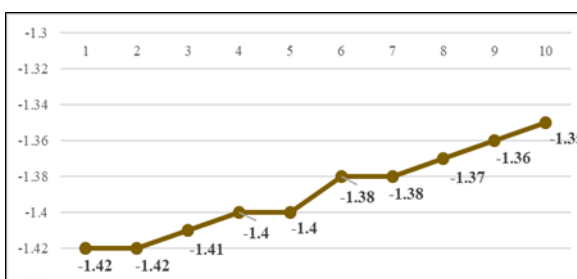
نمودار ۸. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع هشتم



نمودار ۷. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع هفتم



نمودار ۱۰. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع دهم



نمودار ۹. نتایج بالانس حرارتی پنجره نوع نهم

پنجره نوع اول: در این پنجره که ضخامت شیشه خارجی برابر ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است، و با توجه به نمودار شماره ۱، این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلیمتر، تغییراتی تا میزان ۰٫۳۳ کیلووات صورت پذیرفته است که نشان می دهد بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. لازم به ذکر است ضخامت های ۱۲ تا ۱۶ میلی متر بهترین عملکرد را نشان می دهند و افزایش بیشتر اقتصادی نیست.

پنجره نوع دوم: در این پنجره که ضخامت شیشه خارجی برابر ۴ میلیمتر در نظر گرفته شده است، و با توجه به نمودار شماره ۲، تلفات اولیه برابر ۱٫۷۱- می باشد که بهتر از نوع اول است. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلیمتر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰٫۳۳ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. لازم به ذکر است ضخامت های ۱۲ تا ۱۶ میلی متر بهترین عملکرد را نشان می دهند و افزایش بیشتر اقتصادی نیست.

پنجره نوع سوم: چنان که در نمودار شماره ۳ مشهود است، در این پنجره که ضخامت شیشه خارجی برابر ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، تلفات اولیه برابر ۱،۷۳- می باشد. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلی‌متر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰،۲۵ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. لازم به ذکر است ضخامت‌های ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان می‌دهند و افزایش بیشتر اقتصادی نیست.

پنجره نوع چهارم: چنان که در نمودار شماره ۴ مشهود است، در این پنجره که ضخامت شیشه خارجی برابر ۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، تلفات اولیه برابر ۱،۶۹- می باشد. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلی‌متر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰،۲۲ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. لازم به ذکر است ضخامت‌های ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان می‌دهند و افزایش بیشتر اقتصادی نیست.

پنجره نوع پنجم: در این پنجره ضخامت شیشه خارجی برابر ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار شماره ۵، تلفات اولیه برابر ۱،۶۸- می باشد. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلی‌متر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰،۲۲ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. لازم به ذکر است ضخامت‌های ۱۲ تا ۱۴ میلی‌متر بهترین عملکرد را نشان می‌دهند و افزایش آن از ۱۶ میلی‌متر، اقتصادی نیست.

پنجره نوع ششم: در این پنجره ضخامت شیشه خارجی برابر ۱۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار شماره ۶، تلفات اولیه برابر ۱،۴۵- می باشد. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۲ میلی‌متر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰،۲۲ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد. این پنجره به دلیل ضخامت ابتدایی بالای شیشه، عملکرد بهتری دارد و نیاز به افزایش ضخامت کمتر احساس می‌شود.

پنجره نوع هفتم: در این پنجره ضخامت شیشه خارجی برابر ۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار شماره ۷، تلفات اولیه برابر ۱،۴۴- می باشد. در این نوع بازشو پنجره با افزایش ضخامت جداره شیشه ای داخلی تا ۱۴ میلی‌متر، تغییرات قابل توجه در تا میزان ۰،۲۲ کیلووات صورت پذیرفته است که این امر نشان دهنده بالاترین بازدهی برای پنجره با این ضخامت جداره های می باشد.

پنجره نوع هشتم: در این پنجره چنان که در نمودار شماره ۸ مشهود است، ضخامت شیشه خارجی برابر ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، تلفات اولیه برابر ۱،۴۳- می باشد. در این نوع بازشو پنجره ضخامت شیشه تا ۱۶ میلی‌متر، بیان گر بهینه ترین حالت این نوع بازشو پنجره می باشد و افزایش ضخامت بیش از این، دارای صرفه اقتصادی نیست.

پنجره نوع نهم: در این پنجره ضخامت شیشه خارجی برابر ۱۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و چنان که در نمودار شماره ۹ مشهود می باشد، تلفات اولیه برابر ۱،۴۲- می باشد. در این نوع بازشو پنجره ضخامت شیشه تا ۱۸ میلی‌متر، بیان گر بهینه ترین حالت این نوع بازشو پنجره می باشد و افزایش ضخامت بیش از این، دارای صرفه اقتصادی نیست.

پنجره نوع دهم: در این پنجره ضخامت شیشه خارجی برابر ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است، مطابق آنچه در نمودار شماره ۱۰ مشهود می باشد، تلفات اولیه برابر ۱،۴۲- می باشد. در این نوع بازشو پنجره ضخامت شیشه تا ۲۰ میلی‌متر، بیان گر بهینه ترین حالت این نوع بازشو پنجره می باشد و افزایش ضخامت بیش از این، دارای صرفه اقتصادی نیست.

تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزایش ضخامت شیشه بیرونی تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد حرارتی پنجره‌های دوجداره دارد. در ضخامت‌های اولیه (۲ تا ۱۰ میلی‌متر)، هر میلی‌متر افزایش ضخامت باعث کاهش محسوس در تلفات حرارتی و بهبود بالانس حرارتی می‌شود. این امر به دلیل افزایش مقاومت حرارتی شیشه‌ها و کاهش انتقال حرارت مستقیم است. با این حال، از ضخامت ۱۲ میلی‌متر به بعد، میزان کاهش تلفات حرارتی به تدریج کاهش می‌یابد و به نوعی به یک حالت اشباع نزدیک می‌شود. این نشان می‌دهد که تأثیر افزایش ضخامت در بهبود عملکرد حرارتی شیشه‌ها در این محدوده کمتر محسوس است و بهینه‌سازی اقتصادی در این بازه اهمیت بیشتری می‌یابد. به طور کلی، پنجره‌هایی با شیشه بیرونی در بازه ضخامت ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر می‌توانند بهترین تعادل بین عملکرد حرارتی و هزینه‌های اجرایی را ارائه دهند. این بازه ضخامت، نه تنها کاهش قابل توجهی در تلفات حرارتی ایجاد می‌کند، بلکه از افزایش غیرضروری هزینه‌های ساخت و وزن پنجره نیز جلوگیری می‌کند. برای اقلیم تهران، که نیاز به کنترل دمای داخلی در فصول گرم و سرد دارد، این بازه ضخامت می‌تواند به عنوان یک راه‌حل بهینه در طراحی پنجره‌های دوجداره در نظر گرفته شود. در نهایت، انتخاب ضخامت شیشه باید با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی، نوع ساختمان، و بودجه پروژه انجام شود تا کارایی و اقتصادی بودن طراحی به حداکثر برسد.

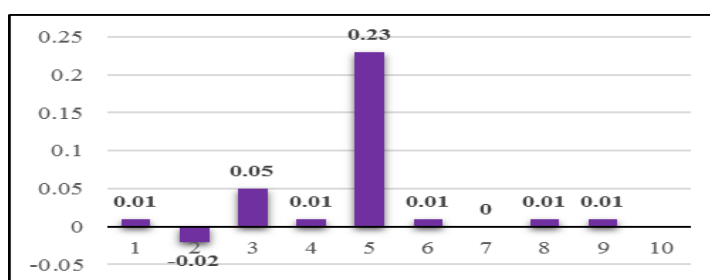
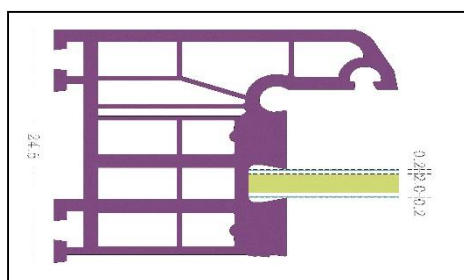
نتایج این پژوهش نشان داد که نوع و ضخامت شیشه‌های پنجره نقش کلیدی در کاهش انتقال حرارت و بهبود بالانس حرارتی ساختمان دارد. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار DesignBuilder نشان دادند که افزایش ضخامت شیشه، به‌ویژه در لایه خارجی، می‌تواند به شکل مؤثری عایق

حرارتی را تقویت کرده و اتلاف انرژی را کاهش دهد. همچنین، استفاده از لایه هوا میان شیشه‌ها نقش مهمی در کنترل انتقال حرارت ایفا می‌کند. این یافته‌ها بر لزوم انتخاب دقیق ترکیب و ساختار شیشه‌ها در طراحی پنجره برای اقلیم گرم‌خشک تهران تأکید دارند.

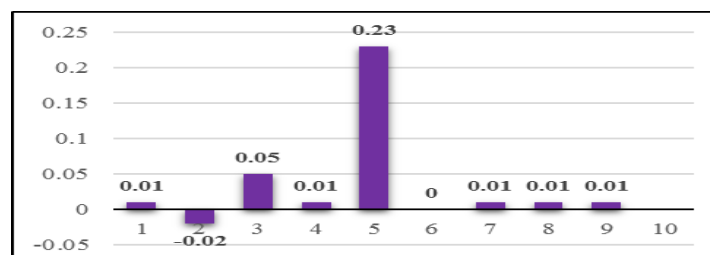
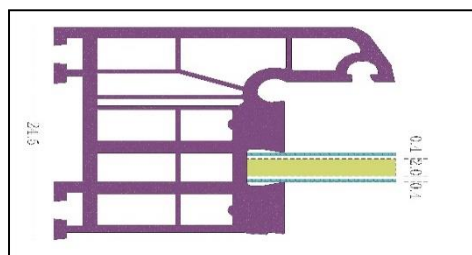
روند توسعه چهارچوب پژوهش

چهارچوب پیشنهادی این مطالعه شامل ده ماتریس داده‌محور است که هر یک به بررسی ویژگی‌های حرارتی یکی از ده نوع پنجره معرفی شده در جدول شماره ۱ می‌پردازد. این ماتریس‌ها شامل ضخامت شیشه داخلی و خارجی و میزان بالانس حرارتی حاصل از شبیه‌سازی‌ها هستند و اطلاعات کاربردی برای مراحل طراحی ساختمان فراهم می‌کنند.

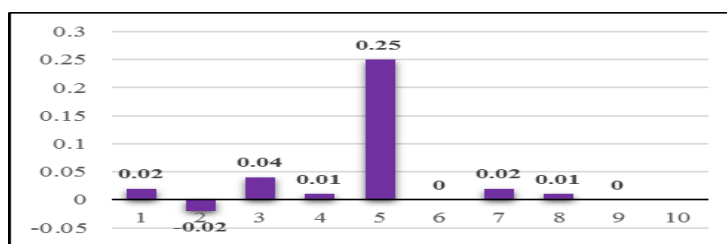
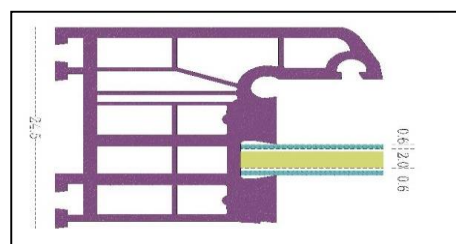
علاوه بر این، برای هر نوع پنجره، دیتیل فنی کامل با نمایش ساختار لایه‌بندی ارائه شده است. این چهارچوب می‌تواند به‌عنوان راهنمایی عملی برای معماران در انتخاب بهینه نوع شیشه و ساختار پنجره‌ها استفاده شود و در نهایت، به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های گرمایشی و سرمایشی در پروژه‌های ساختمانی منجر شود.



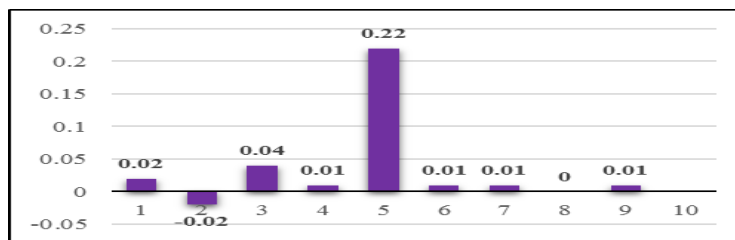
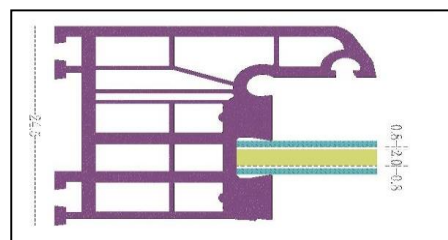
چهارچوب ساختار شماره ۱. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع اول (ماخذ: نگارندگان)



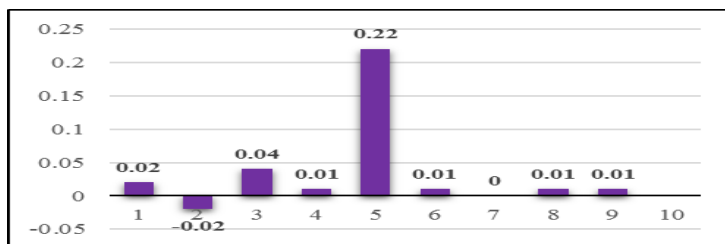
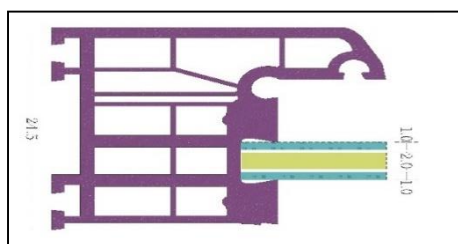
چهارچوب ساختار شماره ۲. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع دوم (ماخذ: نگارندگان)



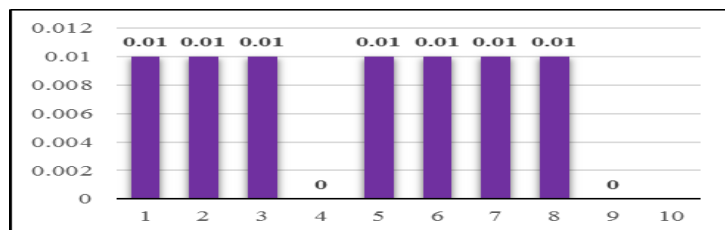
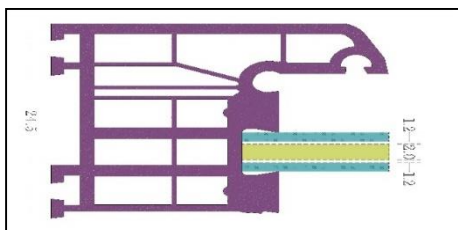
چهارچوب ساختار شماره ۳. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع سوم (ماخذ: نگارندگان)



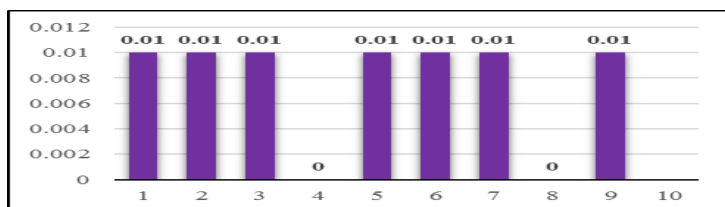
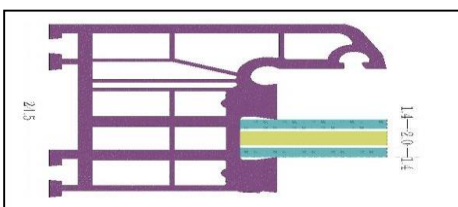
چهارچوب ساختار شماره ۴. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع چهارم (ماخذ: نگارندگان)



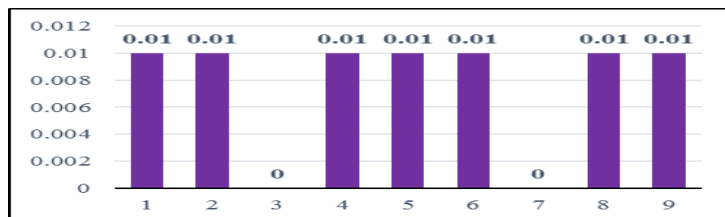
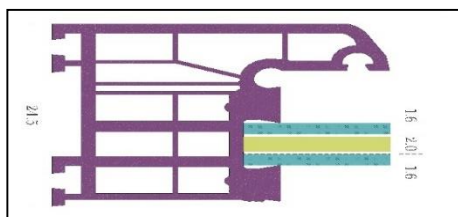
چهارچوب ساختار شماره ۵. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع پنجم (ماخذ: نگارندگان)



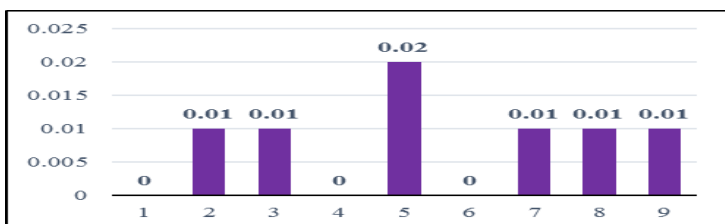
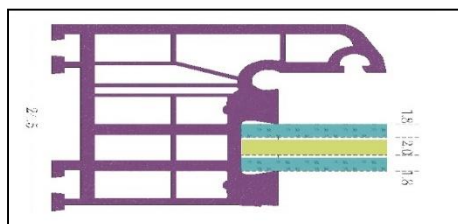
چهارچوب ساختار شماره ۶. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع ششم (ماخذ: نگارندگان)



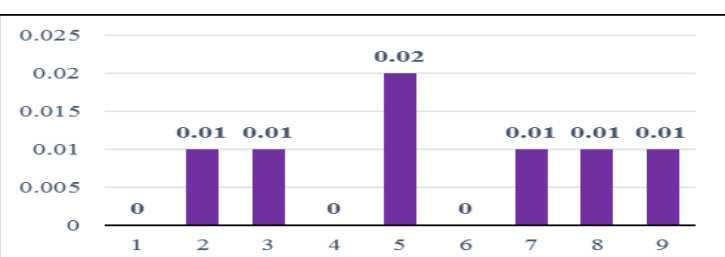
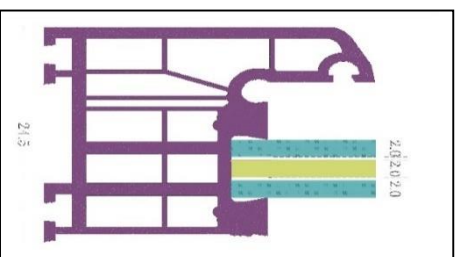
چهارچوب ساختار شماره ۷. نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع هفتم (ماخذ: نگارندگان)



چهارچوب ساختار شماره ۸. ماتریس، نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع هشتم (ماخذ: نگارندگان)



چهارچوب ساختار شماره ۹. ماتریس، نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع نهم (ماخذ: نگارندگان)



چهارچوب ساختار شماره ۱۰. ماتریس، نمودار و جزئیات فنی پنجره نوع دهم (ماخذ: نگارندگان)

10	2	-1.68	8	2	-1.69	6	2	-1.73	4	2	-1.71	2	2	-1.72
10	4	-1.66	8	4	-1.67	6	4	-1.71	4	4	-1.70	2	4	-1.71
10	6	-1.68	8	6	-1.69	6	6	-1.73	4	6	-1.72	2	6	-1.73
10	8	-1.64	8	8	-1.65	6	8	-1.69	4	8	-1.67	2	8	-1.68
10	10	-1.63	8	10	-1.64	6	10	-1.68	4	10	-1.66	2	10	-1.67
10	12	-1.41	8	12	-1.42	6	12	-1.43	4	12	-1.43	2	12	-1.44
10	14	-1.40	8	14	-1.41	6	14	-1.43	4	14	-1.43	2	14	-1.43
10	16	-1.40	8	16	-1.40	6	16	-1.41	4	16	-1.42	2	16	-1.43
10	18	-1.39	8	18	-1.40	6	18	-1.40	4	18	-1.41	2	18	-1.42
10	20	-1.38	8	20	-1.39	6	20	-1.40	4	20	-1.40	2	20	-1.41
20	2	-1.42	18	2	-1.42	16	2	-1.43	14	2	-1.44	12	2	-1.45
20	4	-1.41	18	4	-1.42	16	4	-1.42	14	4	-1.43	12	4	-1.44
20	6	-1.40	18	6	-1.41	16	6	-1.41	14	6	-1.42	12	6	-1.43
20	8	-1.39	18	8	-1.40	16	8	-1.41	14	8	-1.41	12	8	-1.42
20	10	-1.39	18	10	-1.40	16	10	-1.40	14	10	-1.41	12	10	-1.42
20	12	-1.38	18	12	-1.38	16	12	-1.39	14	12	-1.40	12	12	-1.41
20	14	-1.37	18	14	-1.38	16	14	-1.38	14	14	-1.39	12	14	-1.40
20	16	-1.36	18	16	-1.37	16	16	-1.38	14	16	-1.38	12	16	-1.39
20	18	-1.36	18	18	-1.36	16	18	-1.37	14	18	-1.38	12	18	-1.38
20	20	-1.35	18	20	-1.35	16	20	-1.36	14	20	-1.37	12	20	-1.38

محاسبات ۱ - چهارچوب ماتریسی محاسبه شده

نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده نشان داد که افزایش ضخامت شیشه خارجی در پنجره‌های دوجداره، به‌ویژه در بازه ۲ تا ۱۰ میلی‌متر، موجب کاهش محسوس تلفات حرارتی می‌شود و با افزایش بیشتر ضخامت تا حدود ۱۲ تا ۱۶ میلی‌متر، بهترین تعادل میان عملکرد حرارتی و هزینه‌های اجرایی حاصل می‌گردد. با این حال، پس از این محدوده، روند کاهش انتقال حرارت به حالت اشباع نزدیک می‌شود و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. همچنین یافته‌ها تأیید کردند که وجود لایه هوایی میان دو جداره نقشی کلیدی در کاهش انتقال حرارت دارد و این امر در اقلیم گرم و خشک تهران که نیاز هم‌زمان به سرمایش و گرمایش وجود دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که یافته‌ها از نظر روند کلی با پژوهش‌های پیشین همسو هستند، اما نوآوری‌های مهمی نیز ارائه کرده‌اند. برای نمونه، نتایج Perumal et al. (2020) و Abdelhameed & Alharari (2020) در خصوص اثر لایه هوایی و بازدهی کاهشی آن با یافته‌های حاضر همخوانی دارد، در حالی که این پژوهش با تأکید بر ضخامت شیشه و اقلیم تهران، چارچوب تحلیلی و ریاضی دقیق‌تری ارائه می‌دهد. علاوه بر این، تفاوت اصلی مطالعه حاضر با تحقیقات مشابه در ارائه جزئیات عددی و طراحی یک ماتریس تحلیلی است که می‌تواند در عمل به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای طراحان و معماران مورد استفاده قرار گیرد.

با وجود این دستاوردها، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد؛ از جمله اتکا به شبیه‌سازی نرم‌افزاری و تمرکز بر یک اقلیم خاص که قابلیت تعمیم نتایج به سایر شرایط جغرافیایی را محدود می‌کند. در همین راستا، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی و نیز بررسی اقلیم‌های مختلف کشور انجام شوند. همچنین توجه به عواملی همچون جنس و طراحی فریم‌ها، کارایی پوشش‌های نوین مانند شیشه‌های کم‌گسیل (Low-E)، ارزیابی فناوری‌های نوین نظیر شیشه‌های هوشمند، و تحلیل دوام بلندمدت مصالح در شرایط واقعی می‌تواند موجب افزایش دقت و کاربردی‌پذیری نتایج گردد. به این ترتیب، توسعه مطالعات میان‌رشته‌ای که ترکیبی از مدل‌سازی انرژی، آزمایش‌های میدانی و تحلیل‌های اقتصادی باشند، مسیر ارزشمندی برای ارتقای کارایی پنجره‌های دوجداره و دستیابی به معماری پایدار در ایران فراهم خواهد کرد.

منابع

1. Abdelhameed, A. T., & Alharari, A. A. (2020). Numerical Analysis of the Effect of Various Window Parameters on the Thermal Performance of a Double Glaze Window in the Climatic Region of Libya.
2. Aguilar-Santana, J., Velasco-Carrasco, M., & Riffat, S. (2020). Thermal Transmittance (U-value) Evaluation of Innovative Window Technologies. *Future Cities and Environment*, 6. <https://doi.org/10.5334/fce.99>

3. Bae, M., Lee, Y., Choi, G., Kim, S., & Kang, J. (2020). Analysis of the Calculation Method for the Thermal Transmittance of Double Windows Considering the Thermal Properties of the Air Cavity. *Sustainability*, 12(24).
4. Banionis, K., Kumžienė, J., Burlingis, A., Ramanauskas, J., & Paukštys, V. (2021). The Changes in Thermal Transmittance of Window Insulating Glass Units Depending on Outdoor Temperatures in Cold Climate Countries. *Energies*, 14(6).
5. Berardi, U., Kisilewicz, T., Kim, S., Lechowska, A., Paulos, J., & Schnotale, J. (2020). Experimental and numerical investigation of the thermal transmittance of PVC window frames with silica aerogel. *Journal of Building Engineering*, 32, 101665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101665>
6. Danesh, M., Escamilla, E., Pariafsai, F., & Ostadalimakhmalbaf, M. (2019). *Characteristics of Glazing Layers of Double-Skin Facades and Energy Consumption: A Case Study in Arid Climate of Tehran*.
7. Ebadati, M., Lork, A., & Alizade Elizei, M. H. (2023). Energy efficiency of residential buildings in Tehran climate by saving energy. *International Journal of Ambient Energy*, 44(1), 177-185. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2125438>
8. Heydari, A., Sadati, S. E., & Gharib, M. R. (2021). Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 35, 102099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102099>
9. Hoseinzadeh, S. (2019). Thermal Performance of Electrochromic Smart Window with Nanocomposite Structure Under Different Climates In Iran. *Micro and Nanosystems*, 11, 154-164. <https://doi.org/10.2174/1876402911666190218145433>
10. Khatibi, A., Jahangir, M. H., & Astaraei, F. R. (2023). Developing an IoT-based electrochromic windows for smart buildings. *Advances in Building Energy Research*, 17(2), 193-222. <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2175371>
11. Kirankumar, G., Saboor, S., Vali, S. S., Mahapatra, D., Talanki Puttaranga Setty, A. B., & Kim, K.-H. (2020). Thermal and cost analysis of various air filled double glazed reflective windows for energy efficient buildings. *Journal of Building Engineering*, 28, 101055. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101055>
12. Lechowska, A. A., Schnotale, J. A., & Baldinelli, G. (2017). Window frame thermal transmittance improvements without frame geometry variations: An experimentally validated CFD analysis. *Energy and Buildings*, 145, 188-199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.002>
13. Li, D., Zhang, C., Li, Q., Liu, C., Arici, M., & Wu, Y. (2020). Thermal performance evaluation of glass window combining silica aerogels and phase change materials for cold climate of China. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114547>
14. Paulos, J., & Berardi, U. (2020). Optimizing the thermal performance of window frames through aerogel-enhancements. *Applied Energy*, 266, 114776. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114776>
15. Perumal, S., Rajendrian, S., Vijayan, V., Dinesh, s., & Pandiyan, L. (2020). Experimental study about thermal resistance and heat transfer analysis regarding air gap between two glasses on window for the domestic use. *Thermal Science*, 24, 31-31. <https://doi.org/10.2298/TSCI190411031P>
16. Saadatian, S., Simões, N., & Freire, F. (2021). Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components. *Building and Environment*, 188, 107516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107516>
17. Shaik, S., Kirankumar, G., Ghosh, A., Arumugam, C., & Ramana, M. (2021). Energy Savings and Carbon Emission Mitigation Prospective of Building's Glazing Variety, Window-to-Wall Ratio and Wall Thickness. *Energies*, 14, 1-19. <https://doi.org/10.3390/en14238020>
18. Sourav Kumar, S. A., Harpreet Singh, Kaustuv Shandilya, Pema, Sunny Kaura. REVIEW ON WINDOWS OPTIMIZATION FOR ENERGY EFFICIENT BUILDINGS. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org)*, 8(4), 20-27.
19. Takada, K., Hayama, H., Mori, T., & Kikuta, K. (2021). Thermal insulated PVC windows for residential buildings: feasibility of insulation performance improvement by various elemental technologies. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(3), 340-355. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1798773>
20. Van Den Bossche, N., Buffel, L., & Janssens, A. (2015). Thermal Optimization of Window Frames. *Energy Procedia*, 78, 2500-2505. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.251>
21. Xu, X., Xie, J., Zhang, X., Gao, S., Cao, Y., & Liu, J. (2023). Optimal selection of window components in China based on energy performance modeling. *Energy and Buildings*, 297, 113400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113400>