



Optimization of Building Envelope parameters Design toward Energy Conservation (Contemporary Buildings in Tehran)

Reza Salimi Gargari

Department of Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Seyed Majid Mofidi Shemirani*

Department of Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Haniyeh Sanaeian

Department of Architecture, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Received: 2024/10/09

Accepted: 2024/11/26

Abstract

The building envelope serves as a critical protective barrier that significantly influences energy performance, making façade design a crucial consideration in architectural planning. This study addresses the limitations of conventional optimization approaches by developing a practical methodology for early-stage design decision-making. Focusing on both opaque and transparent components of building exteriors, the research investigates key parameters affecting thermal behavior and energy efficiency. The methodology combines a systematic literature review with empirical analysis of District 15's building stock, utilizing GIS mapping and field surveys to identify prevalent façade typologies.

A comprehensive evaluation of wall composition, insulation properties, and window-to-wall ratios reveals their collective impact on heating and cooling demands. Simulation results, validated through field measurements, demonstrate a clear correlation between wall thermal conductivity and energy consumption. Comparative analysis shows optimal façade configurations can achieve substantial energy savings - reducing heating demand by 38.43 kWh/m² and cooling load by 1.48 kWh/m² compared to inefficient designs. These findings are particularly significant for cooling-dominated climates, where electricity savings directly translate to operational cost reductions.

The study provides architects with evidence-based design guidelines for optimizing building envelopes during conceptual phases, bridging the gap between theoretical energy modeling and practical application. By quantifying the energy implications of various façade strategies, this research contributes to more sustainable building practices while establishing a replicable framework for performance-driven façade design in urban contexts.

Keywords:

Sustainable envelope,
Building Envelope,
Typology,
Energy Consumption,
Materials

© 2024 by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license .

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Citation: Salimi Gargari R, Mofidi S M, Sanaeian H. (2024). Optimization of Building Envelope parameters Design toward Energy Conservation (Contemporary Buildings in Tehran). *Journal of Researches in Islamic Architecture*, 12 (4): 107-125.

[10.61186/jria.12.4.6](https://doi.org/10.61186/jria.12.4.6)

* **Corresponding Author:** s_m_mofidi@iust.ac.ir

تبیین بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پوسته ساختمان در جهت کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی: بناهای مسکونی متداول شهر تهران)



رضا سلیمی گرگری

دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

سید مجید مفیدی شمیرانی*

استادیار، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

هانیه صنایع‌بان

استادیار، گروه معماری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

چکیده

با توجه به نقش حیاتی نمای ساختمان به‌عنوان پوسته‌ای محافظ و تأثیر آن بر مصرف انرژی، طراحی صحیح نما در فرآیند طراحی ساختمان‌ها اهمیت بسیاری دارد. با در نظر گرفتن مشکلات و زمان‌بر بودن روش‌های سنتی بهینه‌سازی، ارائه روشی مناسب برای استفاده طراحان در مراحل اولیه طراحی ضروری است. پوشش بیرونی ساختمان که شامل اجزای کدر و شفاف است، از فضای داخلی محافظت می‌کند و شرایط اقلیمی بیرونی را بهبود می‌بخشد. این پژوهش به بررسی پارامترهای مؤثر در نمای ساختمان‌ها بر رفتار حرارتی و مصرف انرژی پرداخته است. ابتدا با مرور سیستماتیک منابع و مطالعات مشابه، پارامترهای کلیدی نما شناسایی و سپس انواع نماهای موجود در منطقه ۱۵ بررسی می‌شوند. پس از انجام مطالعات، نقشه GIS منطقه به‌طور دقیق تحلیل و انواع نماهای متداول به‌روش میدانی استخراج شده‌اند. سپس میزان تأثیر پارامترهای ساختاری جداره ساختمان شامل لایه‌بندی دیوارها و ناماسازی و عایق‌کاری بر میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی بررسی و تجزیه و تحلیل می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مطالعات میدانی صحت‌سنجی و اعتباربخشی می‌شوند.

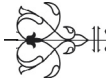
لایه‌بندی دیوارها بیشترین میزان تأثیر بر مصرف انرژی در ساختمان را بر عهده دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، رابطه مستقیمی بین ضریب هدایت حرارتی دیوار و میزان مصرف انرژی وجود دارد و در بهینه‌ترین حالت تا بدترین حالت حدود ۳۸،۴۳ کیلووات ساعت بر مترمربع در انرژی گرمایش و ۱،۴۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در مصرف انرژی سرمایشی اختلاف وجود دارد. با توجه به مصرف الکتریسته برای سرمایش، این میزان بسیار چشمگیر است.

واژگان کلیدی: نمای پایدار، پوسته ساختمان، تیپولوژی، مصرف انرژی، مصالح دیوار.

ارجاع به مقاله: سلیمی گرگری رضا، مفیدی شمیرانی سید مجید، صنایع‌بان هانیه. (۱۴۰۳). تبیین بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پوسته ساختمان در جهت کاهش مصرف

انرژی (نمونه موردی: بناهای مسکونی متداول شهر تهران). پژوهش‌های معماری اسلامی، ۱۲(۴): ۱۰۷-۱۲۵. doi: 10.61186/jria.12.4.6

* نویسنده مسئول s_m_mofidi@iust.ac.ir



۱. مقدمه

پوشش ساختمان به‌عنوان بخشی اساسی از ساختار بنا نقش کلیدی در حفاظت از محیط داخلی در برابر شرایط محیطی خارجی دارد (Iwano & Mwash, 2013). این پوشش نه‌تنها محیط داخلی را از عوامل مخرب خارجی مانند باد و باران و حرارت محافظت می‌کند، بلکه با بهینه‌سازی مصرف انرژی، نقشی حیاتی در کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها ایفا می‌کند (Acar et al., 2021; Al-Homoud, 2005; Al-Yasiri & Szabó, 2021). بهبود طراحی پوشش می‌تواند با افزایش عایق‌بندی و کاهش نشت هوا، مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش را کاهش دهد که این امر منجر به کاهش هزینه‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود (Heiselberg et al., 2009; Lee et al., 2013). از سوی دیگر، پوشش ساختمان باید با استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست و با در نظر گرفتن دوام و طول عمر مصالح طراحی شود. این امر نه‌تنها به کاهش ضایعات ساخت‌وساز کمک می‌کند، بلکه نیاز به تعمیر و نگهداری را در آینده به حداقل می‌رساند (Caldas & Norford, 2002). طراحی یکپارچه پوشش ساختمان از طریق روش‌های ارزیابی عملکردی مناسب، به بهبود کیفیت هوا و راحتی محیط داخلی نیز کمک می‌کند. این نوع طراحی می‌تواند منجر به ایجاد محیطی سالم‌تر و بهره‌ورتر برای ساکنان شود. برای دستیابی به پایداری، محققان مدل‌های مختلفی برای ارزیابی عملکرد پایدار پوشش ساختمان توسعه داده‌اند (Nematchoua et al., 2014). این مدل‌ها به ارزیابی میزان انرژی موردنیاز برای گرمایش و سرمایش ساختمان کمک و بهینه‌سازی طراحی پوشش ساختمان را تسهیل می‌کنند. با استفاده از این مدل‌ها، می‌توان به طراحی‌های بهینه‌ای دست‌یافت که مصرف انرژی را کاهش داده و بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهند (Mostavi et al., 2017).

پژوهش حاضر با توجه به افزایش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، به‌ویژه در شهر تهران، به بررسی راهکارهای بهینه‌سازی طراحی پوسته ساختمان به‌منظور کاهش مصرف انرژی می‌پردازد. با توجه به اینکه پوسته ساختمان اولین لایه حفاظتی در برابر تغییرات محیطی است، نقش مهمی در حفظ آسایش حرارتی داخلی و کاهش مصرف انرژی دارد. مسئله اصلی این پژوهش چگونگی بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پوسته به‌منظور دستیابی به کارایی انرژی بهتر و کاهش هزینه‌های مصرفی است. هدف اصلی پژوهش ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی تهران از طریق بهینه‌سازی طراحی پوسته است تا به این وسیله، به پایداری انرژی دست یابد.

این تحقیق در ابتدا با بررسی ادبیات موضوع و مطالعات پیشین مرتبط با طراحی پایدار و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها آغاز می‌شود. به‌منظور دستیابی به مبانی نظری قوی، پژوهش‌های گذشته در زمینه طراحی پوسته ساختمان و استفاده از مصالح نوین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین، مدل‌های شبیه‌سازی و ابزارهای تحلیل حرارتی به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای تحلیل و ارزیابی تأثیر تغییرات طراحی پوسته بر مصرف انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش‌شناسی این پژوهش شامل استفاده از رویکردهای تجربی و شبیه‌سازی است. در این پژوهش، متغیرهای مستقل شامل نوع مصالح و عایق‌بندی و متغیر وابسته میزان مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی تعریف شده است. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، داده‌های تجربی از طریق جمع‌آوری اطلاعات میدانی و داده‌های اقلیمی مربوط به منطقه ۱۵ تهران مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. چهارچوب نظری

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که طراحی پوسته ساختمان با توجه به آسایش حرارتی و مصرف انرژی، نقش بسزایی در بهینه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان‌ها دارد. بهینه‌سازی طراحی پوسته ساختمان شامل انتخاب مصالح مناسب و بهینه‌سازی عایق‌بندی و کنترل نشت هواست. همچنین، استفاده از فناوری‌های نوین مانند مصالح نورگذر و شفاف که می‌توانند به بهبود مصرف انرژی از طریق بهره‌گیری از نور طبیعی کمک کنند، مورد توجه قرار گرفته است.

درنهایت، روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی نیز به طراحان کمک می‌کنند تا کارآمدترین طراحی‌ها را برای پوشش ساختمان انتخاب کنند. این روش‌ها امکان ارزیابی دقیق تأثیر طراحی‌های مختلف بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی را فراهم می‌کنند و می‌توانند منجر به کاهش مصرف انرژی تا حدود قابل‌توجهی شوند. طراحی پوشش ساختمان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری ساختمان، نیازمند توجه ویژه به اصول طراحی پایدار است.

در مطالعات اخیر، تأکید زیادی بر فهم بهتر و کمی‌سازی تعامل میان آسایش حرارتی و عملکرد انرژی ساختمان‌ها شده است. محققانی مانند لوو، آرنز (Luo et al., 2018) و همکارانشان در سال ۲۰۱۸ و زهیری و الشارکاوی (Zahiri & Elsharkawy, 2018) در همان سال پژوهش‌هایی را به منظور بهینه‌سازی این تعامل انجام داده‌اند. هدف این مطالعات یافتن بهترین روش‌ها برای بهبود هم‌زمان آسایش حرارتی و کارایی انرژی در ساختمان‌ها بوده است.

یکی از نمونه‌های موفق در این زمینه تحقیق فن و شیا



دارند. باین حال، بهبود عملکرد پنجره‌ها لزوماً نمی‌تواند بهترین سود اقتصادی را به دست آورد.

رویه فعلی طراحی تمامی ساختمان‌های صفر/کم‌انرژی، از جمله پوسته ساختمان و سیستم‌های انرژی، به‌ندرت عدم‌قطعیت‌ها را در نظر می‌گیرد یا تقریباً عدم‌قطعیت‌ها را با استفاده از عوامل ایمنی در اندازه‌گیری سیستم در نظر می‌گیرد. در واقع، هزینه محاسباتی طراحی بهینه تمامی ساختمان‌های صفر/کم‌انرژی بالاست؛ زیرا گزینه‌ها و پارامترهای طراحی متعددی در آن دخیل‌اند و هر گزینه طراحی باید تحت تعداد زیادی از سناریوهای نامشخص ارزیابی شود. بنابراین، یک روش کارآمد مورد نیاز است (Butt et al., 2021). لی و وانگ (Li & Wang, 2020) روش طراحی بهینه قوی هماهنگ‌شده برای شناسایی مؤثر راه‌حل‌های طراحی بهینه جهانی برای کل ساختمان‌های صفر/کم‌انرژی تحت عدم‌قطعیت پیشنهاد کرده‌اند. فرآیند طراحی به دو مرحله تقسیم می‌شود، اول بهینه‌سازی طراحی پوسته‌های ساختمانی و مرحله دوم سیستم‌های انرژی با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت‌ها. این دو مرحله برای اطمینان از اینکه راه‌حل طراحی بهینه به دست آمده است، باید به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شوند. نتایج مطالعه موردی آن‌ها برای آزمایش و اعتبارسنجی روش پیشنهادی با استفاده از ساختمان کربن صفر نشان می‌دهد که روش پیشنهادی برای شناسایی راه‌حل‌های طراحی بهینه جهانی برای تمامی ساختمان تحت عدم‌قطعیت‌ها قوی و کارآمد است که می‌تواند طرح‌هایی با عملکرد بهتر با هزینه کمتر در مقایسه با روش‌های طراحی فعلی ارائه دهد. این نشان‌دهنده نیاز به توسعه یک رویکرد جامع و یکپارچه جدید است که می‌تواند عملکرد پایدار پوشش ساختمان را به‌عنوان گام مهمی در طراحی پوشش پایدار و دستیابی به پایداری ساختمان ارزیابی کند.

عبدالله اعظمی و همکاران (Azami & Sevinç, 2021) با هدف توسعه یک روش‌شناسی برای مطالعه پارامتریک تعیین توازن مربوطه میان شاخص مساحت کف عایق شده و مساحت مورد نیاز فوتولتیک‌ها در فرم اولیه بنا برای برآورد تقاضای انرژی اولیه مطابق استاندارد بین‌المللی خانه ایستا پژوهشی انجام گرفته داده‌اند. بنابراین، گونه‌های فرمی شامل اشکال مربع، مستطیل، T، L که از چهار مکعب مدولار استخراج شده‌اند، براساس فاکتور فرمی طبقه‌بندی شدند. انتخاب فرم بهینه در هر گروه از طریق ارزیابی بالقوه مساحت مورد نیاز فوتولتیک‌ها برای سطوح در معرض تابش در شش جهت‌گیری مختلف به‌طور جداگانه انجام شده است. پس از آن، سطح کارایی فوتولتیک‌ها برای فرم‌های بهینه‌شده با استفاده از ضریب بهره‌برداری سناریوهای شاخص پوشش

در سال ۲۰۱۷ است (Fan & Xia, 2017). این دو محقق روی بهینه‌سازی پوسته حرارتی یک ساختمان موجود کار کردند و تلاش نمودند تا بازده انرژی را افزایش دهند و در عین حال سودآوری را نیز بهبود بخشند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش‌های مقاوم‌سازی به نتایج چشمگیری دست یافتند. در مطالعه‌ای دیگر وانگ و وی روش بهینه‌سازی طراحی پوسته ساختمان‌های اداری را با استفاده از الگوریتم ژنتیک کوانتومی معرفی کردند. این روش نوآورانه به‌منظور حداقل‌سازی هزینه‌های ساخت‌وساز و بهینه‌سازی مصرف انرژی طراحی شده است. در این مطالعه ساختارهای مختلف پوسته ساختمان، از جمله دیوارها و پنجره‌ها و دیوارهای پرده شیشه‌ای به‌دقت بررسی و بهینه‌سازی شدند (Huang et al., 2021). نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که استفاده از الگوریتم ژنتیک کوانتومی در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک سنتی، مزایای قابل‌توجهی دارد. به‌عنوان مثال، افزایش ۱۳۰٫۸ درصدی مساحت کل پنجره‌ها باعث بهبود تهویه طبیعی و افزایش ۱۴ درصدی نسبت دیوارهای پرده شیشه‌ای بهبود نورپردازی داخلی را به دنبال داشت. همچنین، هزینه‌های ساخت‌وساز به‌میزان ۰٫۷ درصد کاهش یافت و تعداد دفعات تولید برای دستیابی به همگرایی، ۵۰ درصد کاهش پیدا کرد. به‌طور کلی، در مقایسه با طراحی اولیه، هزینه کلی ساختمان به‌میزان ۳۵٫۳ درصد کاهش یافت.

این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بهینه‌سازی طراحی پوسته ساختمان با استفاده از روش‌های پیشرفته می‌تواند به‌طور چشمگیری هزینه‌ها را کاهش دهد و هم‌زمان بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی را بهبود بخشد. این امر نه‌تنها به پایداری بیشتر ساختمان‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند تأثیرات مثبتی بر محیط زیست و اقتصاد داشته باشد. براساس تحقیقات انجام‌شده توسط هوانگ و همکاران (Huang et al., 2021) یک مدل بهینه‌سازی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان برای صرفه‌جویی در انرژی ساختمان‌های مسکونی موجود پیشنهاد گردید. فرمول‌های محاسبه ضخامت لایه عایق اقتصادی بام، دیوار خارجی و کف روی زیرزمین به‌صورت هم‌زمان محاسبه و رابطه بهینه عملکرد حرارتی میان واحدهای پوسته ساختمانی پیشنهاد گردید، به این معنی که مقدار U معادل هر واحد پوسته غیرشفاف ساختمانی باید مساوی باشند. علاوه بر این، روش‌های محاسبه نسبت صرفه‌جویی نهایی و بهینه‌سازی انرژی ارائه شده‌اند. برای نمونه، ساختمان مسکونی موجود در پکن انتخاب گردید و با سناریوهای نوسازی ذخیره انرژی مقدار محدود مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که نسبت ذخیره انرژی نهایی و بهینه به‌دست‌آمده با مقدار U پنجره‌ها نسبت معکوس

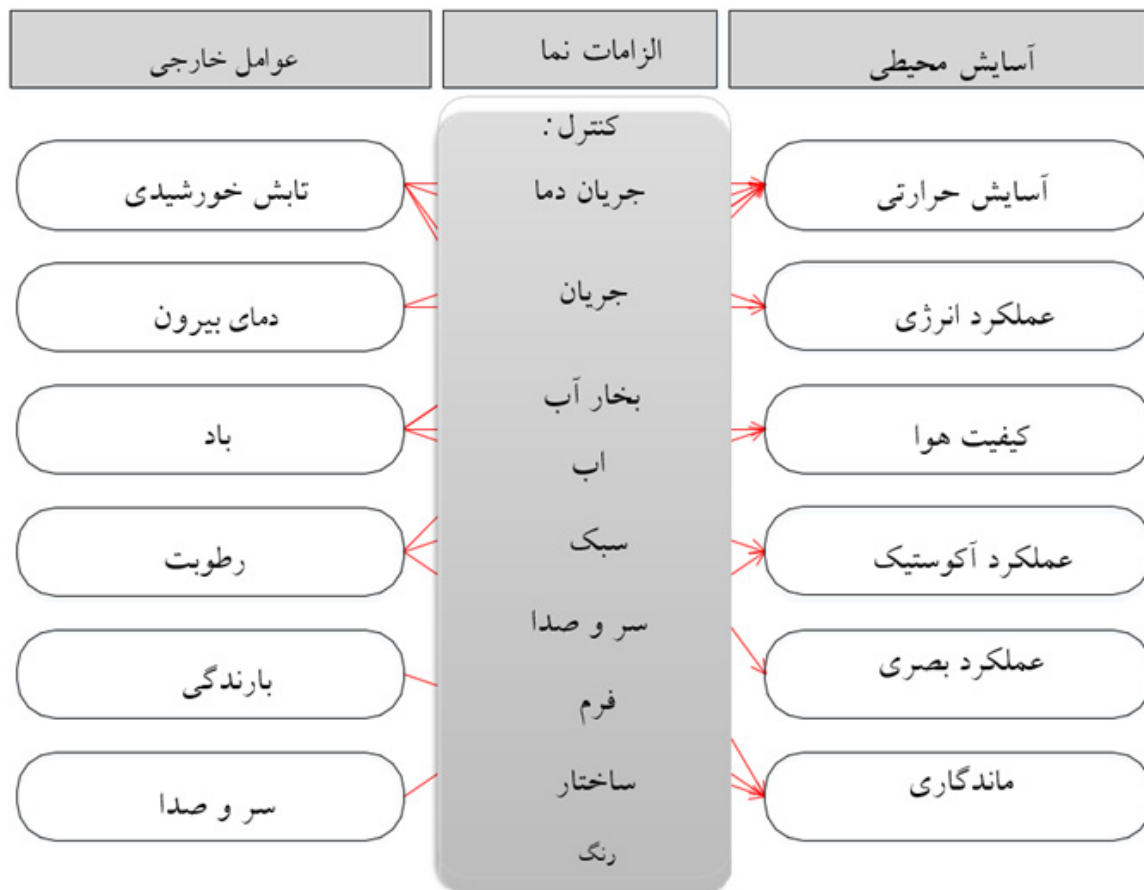


افزایش کارایی انرژی داخلی ساختمان و تأمین نیاز به نور روز و ارائه بالاترین سطح آسایش حرارتی اشاره کرد (Butt et al., 2021).

بر اساس مطالعات انجام‌شده، قبل از ارزیابی و آزمایش عملکرد نماهای تطبیقی، ابتدا باید آن‌ها را از نظر فناوری‌ها و اهداف مشخص کنیم. این دو پارامتر همراه با سایر پارامترهای کلیدی در شکل زیر خلاصه شده‌اند. همان‌طور که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود، ستون اول نشان‌دهنده هدف نماها یا اجزای دارای قابلیت تطبیق‌پذیری است که می‌تواند به راحتی حرارتی، عملکرد انرژی، کیفیت هوای داخلی (IAQ) و عملکرد بصری و صوتی و سایر نیازها مربوط باشد (Aelenei et al., 2016).

بر اساس اولویت‌های ترکیب نما و سقف بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که کفایت انرژی تولیدشده تحت تأثیر پیکربندی فرم و جهت‌گیری آن قرار دارد.

نماهای فعال به‌منظور ایجاد سیستمی پویا که محیط داخلی و خارجی را از یکدیگر جدا می‌کند و دارای قابلیت حرکت است، طراحی شده‌اند. هدف از طراحی این سیستم‌های حرکتی بهره‌گیری بهینه از شرایط محیط بیرونی برای ایجاد آسایش داخلی است. در تنظیم پارامترهای عملکردی، عوامل متعددی از جمله گرمایش، تهویه، جریان بخار، کنترل بارش، استفاده از نور خورشید، کنترل نویز، مقاومت در برابر آتش، پایداری بالا و اهداف زیبایی‌شناختی (اثر بصری) مورد توجه قرار می‌گیرند. از الزامات بسیار مهم طراحی نما می‌توان به



تصویر ۱. رابطه بین محیط بیرون و شرایط آسایش داخلی نماهای تطبیقی (Aelenei et al., 2016)

حرارتی ایفا می‌کند. انتخاب مصالح مناسب، بهینه‌سازی عایق‌بندی، و کنترل نشت هوا از جمله عوامل مؤثر در این زمینه‌اند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از مصالح نورگذر

با توجه به بررسی جامع مطالعات انجام‌شده در این زمینه، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که طراحی بهینه پوسته ساختمان نقشی کلیدی در بهبود عملکرد انرژی و افزایش آسایش

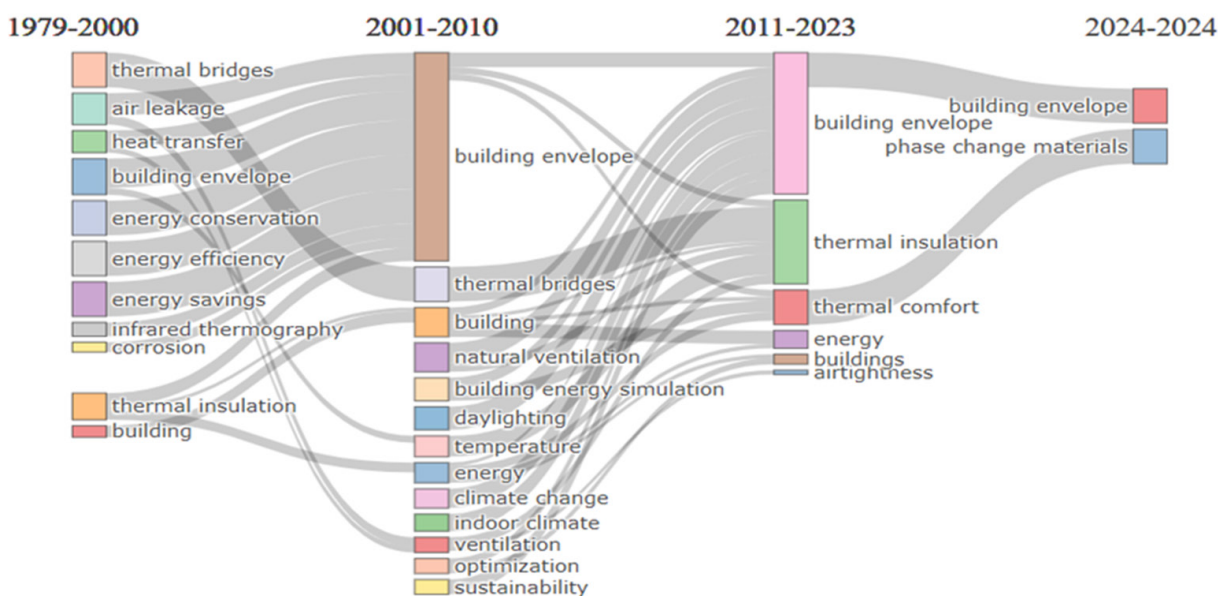


بر این، بیشتر تحقیقات بر مناطق خاص جغرافیایی تمرکز داشته‌اند و داده‌های کافی برای شرایط اقلیمی متنوع در دسترس نیستند. تأثیر تغییرات اقلیمی نیز از دیگر موضوعاتی است که کمتر در مطالعات موجود به آن پرداخته شده است، درحالی‌که این تغییرات می‌توانند به شکل قابل‌توجهی بر کارایی طراحی‌های پوسته اثر بگذارند.

روش‌های طراحی کنونی برای ساختمان‌های صفر یا کم‌انرژی، عدم قطعیت‌ها را به‌طور کافی در نظر نمی‌گیرند و همین موضوع باعث افزایش هزینه‌های طراحی و بهره‌برداری می‌شود. رویکردهای جدیدی مانند بهینه‌سازی هماهنگ شده می‌توانند ضمن مدیریت این عدم قطعیت‌ها، راه‌حل‌های اقتصادی‌تر و پایدارتری ارائه دهند. درنهایت، برای دستیابی به پایداری در طراحی پوسته ساختمان لازم است پژوهش‌ها درجهت توسعه راهکارهای جامع و انجام مطالعات منطقه‌ای و انطباق طراحی‌ها با تغییرات اقلیمی گسترش یابند.

و شفاف، با بهره‌گیری از نور طبیعی، می‌تواند مصرف انرژی را کاهش دهد و کیفیت روشنایی داخلی را بهبود بخشد. علاوه بر این، فناوری‌های نوین مانند الگوریتم‌های ژنتیک و سیستم‌های نمای فعال ابزارهایی قدرتمند برای دستیابی به بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز ارائه می‌دهند. شبیه‌سازی‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی نیز امکان ارزیابی دقیق طراحی‌های مختلف را فراهم می‌کنند و باعث کاهش مصرف انرژی تا حد قابل‌توجهی می‌شوند.

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته، هنوز چالش‌هایی در این حوزه وجود دارند. یکی از مهم‌ترین نقاط خلاء، فقدان چهارچوب‌های جامع و یکپارچه برای بهینه‌سازی هم‌زمان تمامی جنبه‌های طراحی پوسته ساختمان است. بسیاری از مطالعات به جنبه‌های مجزا پرداخته‌اند و نیاز به رویکردهای چندبعدی برای بررسی تعاملات بین آسایش حرارتی و بهره‌وری انرژی و الزامات اقتصادی احساس می‌شود. علاوه



تصویر ۲. فراوانی کلیدواژه‌های بررسی شده در ارتباط با رفتار حرارتی پوسته ساختمان براساس سال به کمک اسکوپوس

قسمت‌ها شامل مراحل مختلفی است که به‌تفصیل در تصویر ۳ قابل مشاهده است.

جمع‌آوری داده‌های اولیه موردنیاز پژوهش در چهار مرحله انجام شده است. قسمت اول: استخراج مدول پایه شبیه‌سازی؛ قسمت دوم: انتخاب بستر پژوهش؛ قسمت سوم: انتخاب نرم‌افزار و دستگاه‌های اندازه‌گیری؛ قسمت چهارم: انتخاب نمونه موردی برای اندازه‌گیری. هریک از این

**استخراج مدل شبیه سازی**

- جمع آوری اطلاعات مربوط به بافت های مختلف شهر تهران
- بررسی قطعه بندی زمین ها در بافت های انتخابی
- بدست آوردن نسبت میانگین طول به عرض قطعات زمین در بافت شهری انتخابی به کمک GIS
- بدست آوردن جهت گیری قطعات زمین در بافت شهری انتخابی به کمک GIS

استخراج بستر پژوهش

- شناسایی تقسیمات اقلیمی
- انتخاب بستر اقلیمی پژوهش
- جمع آوری فایل اقلیمی و محیطی بستر پژوهش

انتخاب نرم افزار و دستگاه

- شناسایی انواع نرم افزارهای موجود برای شبیه سازی رفتار حرارتی ساختمان
- انتخاب بهترین نرم افزار در ارتباط با موضوع پژوهش
- شناسایی انواع دستگاه های موجود برای اندازه گیری حرارتی ساختمان
- انتخاب بهترین دستگاه در ارتباط با موضوع پژوهش

انتخاب نمونه موردی برای اندازه گیری

- بررسی نمونه های موجود برای نصب دستگاه
- انتخاب نزدیکترین نمونه به مدول شبیه سازی
- اندازه گیری و بررسی ویژگی های کالبدی نمونه

تصویر ۳. مراحل چهارگانه جمع‌آوری داده‌های اولیه پژوهش

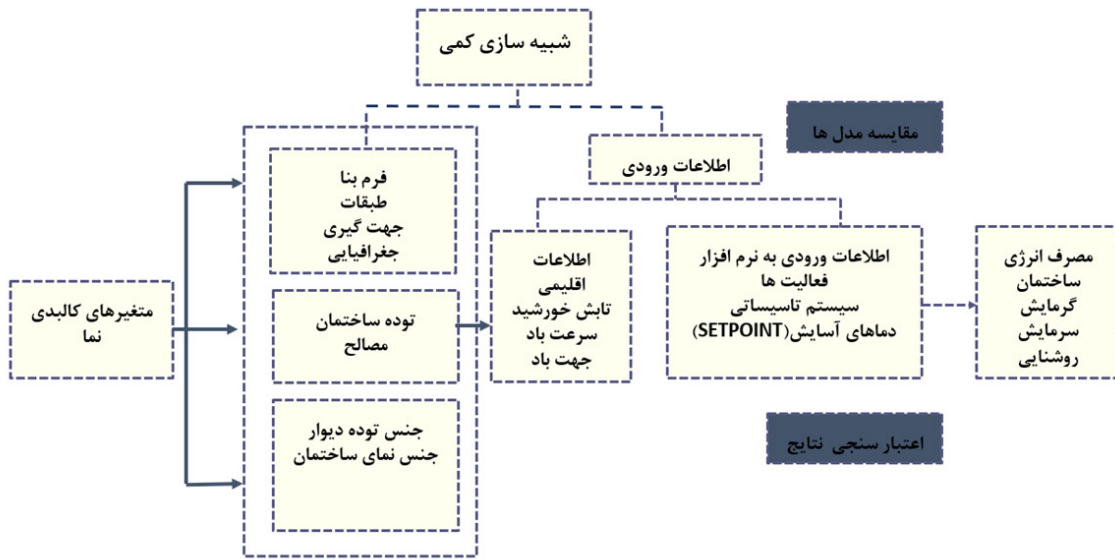
اولیه سرمایه‌ی و گرمایشی است که به‌میزان تأثیرگذاری از شاخص‌های فیزیکی نمای ساختمان به دست می‌آید. متغیرهای مستقل نیز شامل پارامترهای نمای ساختمان در مقیاس واحد همسایگی‌اند که با انتخاب شاخص‌های مناسب به‌منظور جلوگیری از پراکندگی بیش‌ازحد در استفاده از شاخص‌هایی انتخاب شده‌اند که تغییرات کمی دارند. به‌این ترتیب، مدل مفهومی این پژوهش یک چارچوب مفید برای درک عوامل مؤثر در مصرف انرژی ساختمان‌های مسکونی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی است (تصویر ۴). مصرف انرژی در ساختمان‌ها تحت‌تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد که شامل شرایط فیزیکی نمای ساختمان، نوع کاربری، تعداد و فعالیت افراد، مصالح ساختمانی، سیستم‌های گرمایش و سرمایه‌ی و نوع روشنایی مصنوعی است. این عوامل مداخله‌گر باید در تمام مدل‌های محاسبه مصرف انرژی ساختمان مدنظر قرار گیرند.

مدل مفهومی پژوهش حاضر نشان‌دهنده رابطه میان عوامل مداخله‌گر و شاخص‌های تأثیرگذار بر میزان مصرف انرژی سرمایه‌ی و گرمایشی و روشنایی در بخش مسکونی است. این مدل براساس فهمی عمیق از تأثیرات پارامترهای اقلیمی و شاخص‌های فیزیکی نمای ساختمان بر میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها ساخته شده است.

در این مدل، شاخص‌های فیزیکی نمای ساختمان، با توجه به اثراتی که بر پارامترهای اقلیمی دارند، قادرند سطح مصرف انرژی سرمایه‌ی و گرمایشی و روشنایی ساختمان‌ها را تغییر دهند. به‌عبارت دیگر، ویژگی‌های فیزیکی مانند جنس و ضخامت جداره‌ها، اندازه و موقعیت پنجره‌ها و دیگر شاخص‌های ساختمانی تأثیر زیادی بر مصرف انرژی دارند و با توجه به شرایط اقلیمی، می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان کمک کنند.

متغیر وابسته در این پژوهش، میزان مصرف انرژی



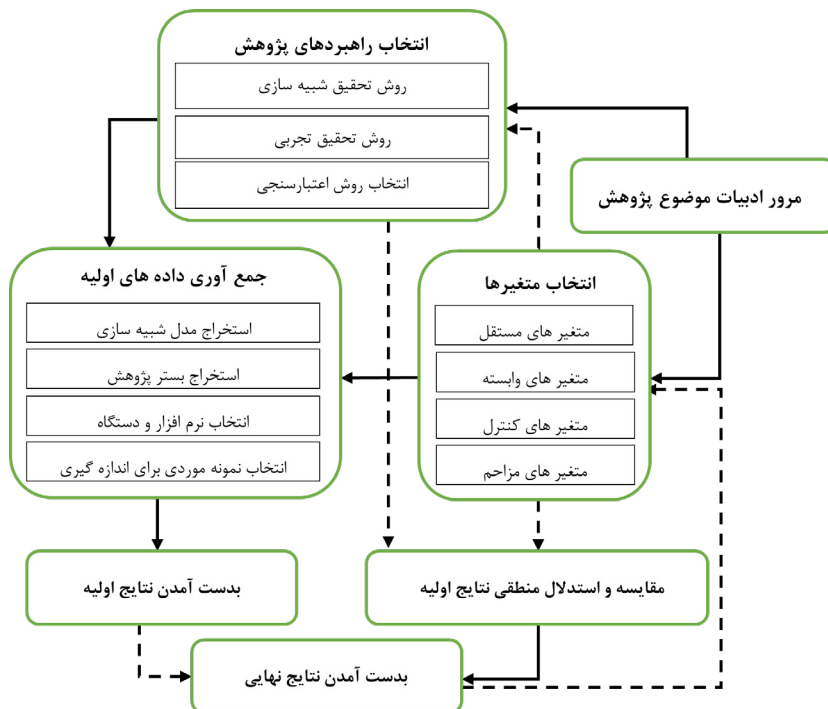


تصویر ۴. مدل مفهومی پژوهش نگارنده

۳. روش تحقیق

روش تحقیق تجربی و شبیه‌سازی به‌عنوان روش‌های مورد استفاده برای انجام پژوهش مطرح شدند. شبیه‌سازی به‌عنوان ابزاری موثر برای تحلیل وابستگی متغیرهای مستقل و وابسته به کار گرفته شد. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی از روش تحقیق تجربی استفاده شد و تطابق نتایج حاصل از

شبیه‌سازی با داده‌های واقعی و تحلیل منطقی اطلاعات انجام شد. یکی از مراحل مهم در روند کارهای پژوهشی طراحی روش تحقیق است. این مرحله شامل بخش‌های مختلفی چون انتخاب راهبردهای پژوهش و انتخاب متغیرها و روش اعتبارسنجی (مطابق تصویر ۵) است.



تصویر ۵. مراحل مختلف در طراحی روش تحقیق



براساس این اطلاعات می‌توان تحلیل‌های مختلفی ارائه کرد، از جمله:

- رابطه بین مساحت و تعداد واحدهای مسکونی؛
- تأثیر جهت‌گیری محله بر میانگین مساحت یا تعداد واحدهای مسکونی؛
- مقایسه فراوانی قطعات زمین در نواحی مختلف؛
- بررسی رابطه نسبت طول به سایر متغیرها و مشاهده الگوهای ممکن.



تصویر ۷. بررسی فایل GIS منطقه ۱۵

۲-۳. تنظیمات نرم‌افزار

برای مطالعه و تحلیل این مسئله، نرم‌افزار شبیه‌سازی حرارتی دیزاین بیلدر به کار گرفته شده است. این ابزار قادر است رفتار ساختمان را در شرایط غیرپایدار محیطی، به‌خصوص در اقلیم‌های مختلف شبیه‌سازی کند. بسیاری از طراحان از این نرم‌افزار برای این منظور استفاده می‌کنند. با استفاده از دیزاین بیلدر می‌توان به‌طور دقیق‌تر رفتار ساختمان‌ها را در مقابل شرایط متغیر آب‌وهوایی بررسی کرد و تأثیرات مختلف ساختارهای دیواری را بر ضرایب هدایتی و سایر ویژگی‌های حرارتی بررسی نمود (DesignBuilder, 2009).

پارامترهای ثابت در شبیه‌سازی

برای لحاظ کردن این عوامل تأثیرگذار اقلیمی، فایل اقلیمی شهر تهران از سایت One Building استخراج شد. این داده‌ها شامل اطلاعاتی مانند دما، رطوبت، سرعت باد و سایر شرایط اقلیمی است که تأثیر زیادی بر مصرف انرژی ساختمان دارند. شهر تهران در اقلیم نیمه‌گرم‌وخشک قرار گرفته است؛ ولی با توجه به وسعت منطقه، این اقلیم به تعدادی زیرگروه اقلیمی تقسیم می‌شود. بر این اساس، کلان‌شهر تهران در زیر گروه BSks قرار می‌گیرد (جدول ۲).

۳-۱. انتخاب بستر پژوهش

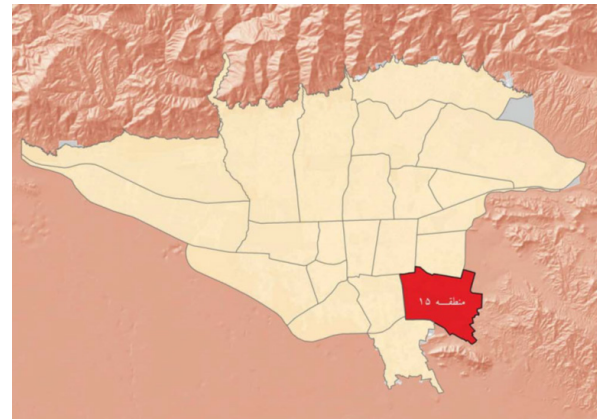
در مطالعاتی که تاکنون روی موضوع پژوهش حاضر انجام شده‌اند، شکل‌های مورد مطالعه به‌طور معمول به‌صورت فرضی و به‌دور از واقعیت انتخاب گردیده‌اند. برای جلوگیری از این موضوع و قابل استفاده بودن نتایج، یکی از بلوک‌های شهر تهران به‌عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب گردید.

منطقه ۱۵ به‌عنوان محدوده مورد مطالعه

میان مناطق مختلف شهر تهران، منطقه ۱۵ به‌دلایل زیر به‌عنوان گزینه مناسب بررسی شد:

- سابقه سکونت شهری طولانی و ثبیت ساختار شهری؛
- بافت فرسوده و تمایل ساکنین برای بازسازی.

برای به دست آوردن مدل پایه، فایل GIS منطقه ۱۵ بررسی و تجزیه و تحلیل شد (تصویر ۶). برای این منظور، در تمامی نواحی نسبت طول به عرض، جهت‌گیری، میانگین مساحت و فراوانی قطعات استخراج گردیدند که در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



تصویر ۶. موقعیت منطقه ۱۵ در شهر تهران

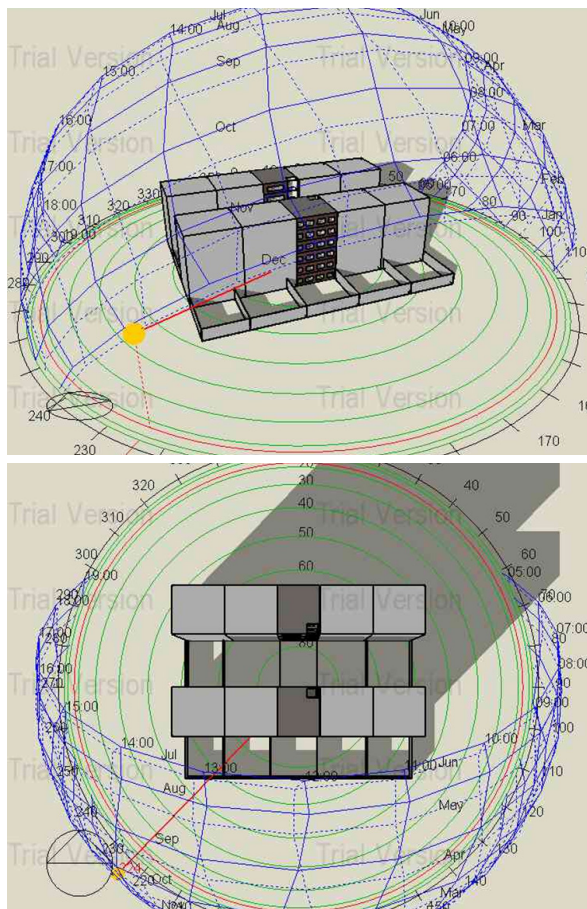
جدول ۱. اطلاعات به‌دست‌آمده از نقشه GIS منطقه ۱۵

ناحیه	میانگین مساحت	جهت گیری (شمالی جنوبی عقربه ساعت)	نسبت طول به	میانگین مساحت مسکونی	فراوانی قطعات
۱	۱۲۸,۶۳	۹۰,۵۵	۲,۲	۷۳,۰۵	۵۵
۲	۲۴۵,۰۴	۲۵,۰۸۵	۲,۴	۱۴۴	۹۸
۳	۵۵۰,۷۹	۹,۳۵۰	۱,۶	۲۳۸,۴	۱۰۷
۴	۴۸۴,۲۷	۵۳	۲,۸	۱۳۵,۵	۱۱۸
۵	۱۳۸,۸۸	۱۱,۴	۳,۱	۱۲۳,۲	۱۲۲
۶	۱۸۷,۹۱	۷,۵۰	۳,۳	۱۲۵,۵	۱۲۲

روشنایی مصنوعی از طریق جمع‌آوری داده‌های مشاهده‌ای و پرسشنامه‌ها در خصوص کاربری ساختمان، مصالح ساختمانی و ویژگی‌های بازشوها بررسی و در تحلیل‌ها استفاده شده‌اند. این اطلاعات برای اندازه‌گیری و تحلیل مصرف انرژی به دقت بیشتری منجر می‌شود و برای ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها بسیار ارزشمندند.

۳-۳. مدل‌سازی ساختمان در نرم‌افزار

براساس مطالعات انجام‌شده توسط نرم افزار GIS قطعه‌بندی بلوک‌ها $12 \times 22,4$ و با کشیدگی شمالی و جنوبی در نظر گرفته شده‌اند و از ضلع شمال و جنوب دسترسی به نور روز دارند. با توجه به اینکه ساختمان به‌تنهایی در خیابان قرار ندارد، در حد چند بلوک همسایگی مدل گردید. در هر ردیف بلوک ساختمانی پنج بلوک در نظر گرفته شده‌اند که تنها دو بلوک میانی که روبه‌روی یکدیگر واقع شده‌اند، مصرف انرژی آن‌ها تجزیه و تحلیل شده‌اند. مساحت زیربنای ساخته‌شده در همه شکل‌ها یکسان است و پنج طبقه روی پیلوت، براساس ساخت‌وساز در منطقه ۱۵ دارد.



شکل ۸. نمونه ساختمان با عرض ۱۲ متر در منطقه ۱۵

جدول ۲. اطلاعات جغرافیایی شهر تهران

روز درجه سرمایشی	روز درجه گرمایشی	ارتفاع از سطح دریا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱۳۷۸	۱۴۹۵	۱۱۹۱	۶۸.۳۵	۳۲.۵۱

در این شبیه‌سازی، عواملی که مستقیماً بر رفتار حرارتی خالص پوسته ساختمان اثر می‌گذارند بررسی نشده‌اند. این عوامل شامل منابع داخلی تولید حرارت، مانند سیستم‌های گرمایشی، لوازم برقی، اجاق‌ها و سایر وسایل تولیدکننده حرارت می‌شوند. همچنین، تأثیرات تهویه طبیعی و جریان‌های همرفتی خنک‌کننده نیز از مدل‌سازی حذف شده‌اند. به همین دلیل، اطلاعات مربوط به سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی و الگوهای مصرف انرژی ساکنان، از جمله تعداد و الگوی روشن و خاموش شدن وسایل و لامپ‌ها، در نرم‌افزار ثابت فرض شده‌اند و در تحلیل گنجانده نشده‌اند. همچنین، پروفایلی برای بازوبسته شدن پنجره‌ها جهت تهویه طبیعی در نظر گرفته نشده است.

جدول ۳. دیتاهای ورودی نرم‌افزار

کاربری	ساختمان مسکونی
تعداد طبقات	۵ طبقه
سوخت سیستم تاسیسات	برق برای سرمایش و گاز برای گرمایش
دمای آسایش	۲۳-۲۷ درجه سانتیگراد
درصد بازشو	۴۰ درصد سطح نما

هدف از این کار تمرکز بر ارزیابی دقیق و خالص رفتار سیستم انرژی پوسته ساختمان تحت شرایط متغیر آب‌وهوایی، بدون در نظر گرفتن تأثیرات مستقیم سیستم‌های تهویه و سایر عوامل ناپایدار است. مصالح و سیستم‌های ساختمانی از نظر ویژگی‌های حرارتی اولیه مانند چگالی (ρ) و ظرفیت حرارتی ویژه (c) و ضریب هدایت حرارتی (λ) تحلیل می‌شوند. علاوه بر این، دمای داخلی به‌همراه دمای آسایش مردم تهران براساس نظرات متخصصین این حوزه در نظر گرفته شده است. دماهای شروع گرمایش و سرمایش ساختمان که به ترتیب ۲۳ و ۲۷ درجه سانتیگراد می‌شوند، براساس مطالعات انجام‌شده روی آسایش حرارتی افراد در تهران برای روند شبیه‌سازی استفاده شده‌اند (Sanaieian et al., 2014). با توجه به اطلاعات ارائه‌شده، ۴۰ درصد از مساحت پوسته نمای ساختمان با شیشه پوشیده شده است که در منطقه مورد مطالعه معمول است. همچنین، نحوه حضور افراد، استفاده از تجهیزات، سیستم‌های گرمایش و سرمایش و نوع

حالات مدل‌سازی شده براساس ساخت‌وساز رایج در منطقه ثابت فرض شده است و تنها جداره‌های خارجی بر اساس نوع ساختار فیزیکی مصالح با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تمام

هرآنچه که مربوط به فرم ساختمان است در مدل‌ها ۱۵ تغییر یافته‌اند که جدول ۴ با تمام ویژگی‌های ترموفیزیکی و ساختاری آورده شده‌اند.

جدول ۴. جزئیات سازه‌ای و لایه‌های دیوارهای متداول در ساختمان‌های مسکونی منطقه ۱۵

n.	لایه‌ها از بیرونی‌ترین تا داخلی‌ترین لایه	U-value (W/m ² K)	R-value (m ² K /W)	ضخامت دیوار (cm)	تصاویر
W1	سنگ نما ۲۰ mm	۱،۱۷	۰،۸۵	۲۳	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	بلوک سفالی ۱۵۰ mm				
	گچ و خاک 30mm				
W2	سنگ نما ۲۰ mm	۰،۸۷	۱،۱۴	۲۸	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	بلوک لیکا ۲۰۰ mm				
	گچ و خاک 30mm				
W3	سنگ نما ۲۰ mm	۰،۴	۲،۱۲	۲۸	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	بلوک AAC 200 mm				
	گچ و خاک 30mm				
W4	سنگ نما ۲۰ mm	۱،۷۴	۰،۵۷	۳۰	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	آجر فشاری ۲۲۰ mm				
	گچ و خاک 30mm				
W5	سنگ نما ۲۰ mm	۰،۸	۱،۲۵	۲۱	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	بلوک سفالی و فضای خالی پر شده با پلی استایرن ۱۵۰ mm				
	گچ و خاک 30mm				
W6	سنگ نما ۲۰ mm	۰،۳۷	۲،۷	۳۳	
	مالات ماسه سیمان 30mm				
	بلوک AAC 100 mm				
	۵۰ mm فضای خالی پر شده با پلی استایرن				
	بلوک AAC 100 mm				
گچ و خاک 30mm					

۴. یافته‌های پژوهش

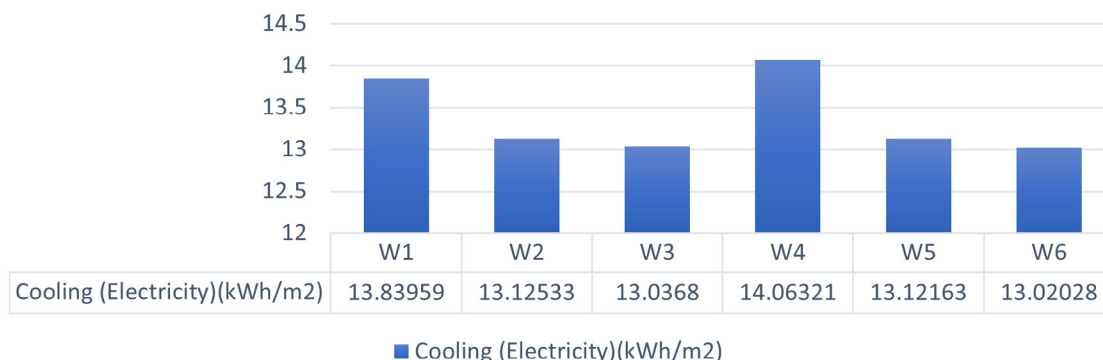
بررسی می‌شود. سپس برای تحلیل دقیق‌تر نمودارهای مصرف انرژی، میزان هدررفت حرارتی از دیوارهای خارجی در فصول گرم و سرد مقایسه می‌شود.

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده روی شش نوع مختلف دیوارچینی در ساختمان‌های متداول از لحاظ مصرف انرژی برای سرمایه‌شتابستانی و گرمایش زمستانی

میزان مصرف انرژی را برای خنک کردن ساختمان‌ها دارند که این ناشی از تبادل حرارت از پوسته ساختمان و افزایش دمای درون ساختمان است. سپس دو دیوار W5 و W2 با اختلاف ۰۰۱۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع بیشترین سهم در مصرف انرژی سرمایشی را دارند. بیشترین اختلاف میزان مصرف انرژی برق برای سرمایش، ۱۰۰۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است که بین دیوارهای W4 و W6 مشاهده می‌شود.

۴-۱. نتایج شبیه‌سازی

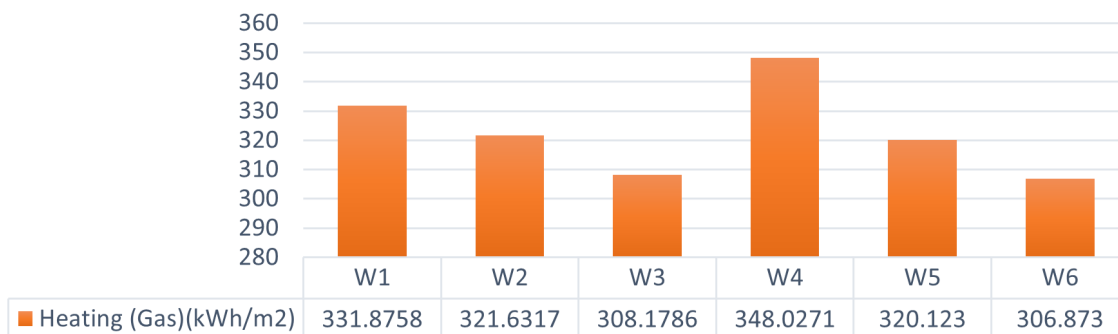
شکل ۹ به میزان انرژی مصرفی برای سرمایش ساختمان‌ها از اول آوریل تا پایان سپتامبر و به مصرف انرژی برای گرمایش از اول اکتبر تا پایان مارس اشاره دارد. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، در فصل تابستان دیوار W6 کمترین مصرف انرژی را دارد و بعد از آن دیوار W3 با تفاوت اندک در رتبه دوم قرار می‌گیرد. دیوار W4 بیشترین مصرف انرژی را در این فصل دارد. دو دیوار W4 و W1 بیشترین



تصویر ۹. مصرف انرژی سرمایشی در تابستان

مشاهده می‌شود که حدود ۴۱۰۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. همان‌طور که دیده می‌شود، تفاوت مصرف انرژی گاز در دیوارچینی‌های مختلف نسبت به انرژی سرمایشی بیشتر است.

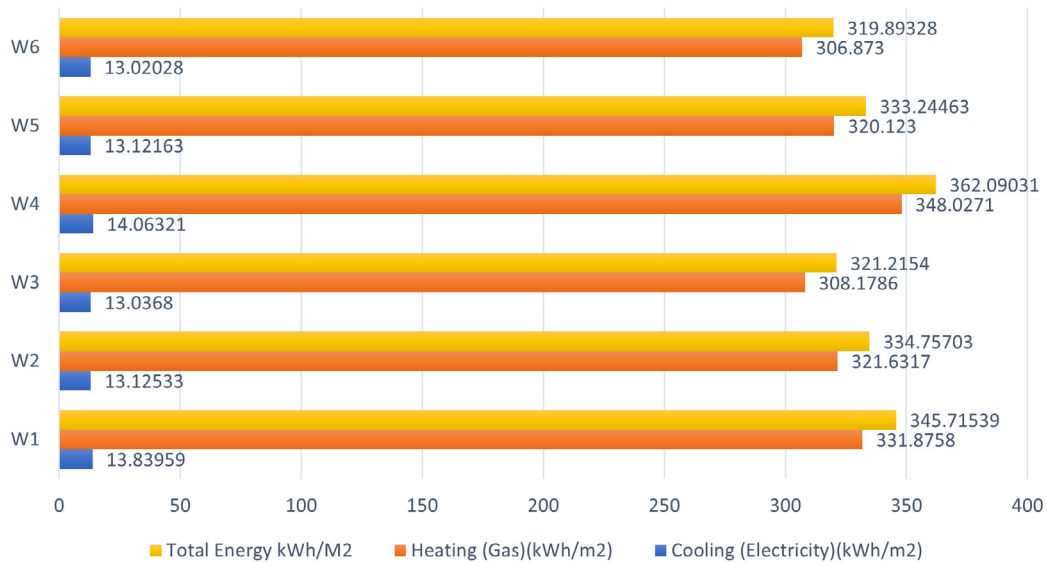
در فصل زمستان، تفاوت در میزان مصرف انرژی گاز برای گرمایش در دیوارهای مختلف بیشتر به چشم می‌خورد. اختلاف مصرف انرژی در دو دیوار W6 و W3 در زمستان کم و حدود ۲ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. بیشترین اختلاف در مصرف انرژی گاز بین دیوارهای W4 و W6



تصویر ۱۰. مصرف انرژی گرمایشی در زمستان

در حالی که دیوارهای W4 و W1 به ترتیب بیشترین مصرف انرژی را دارند. بیشترین اختلاف مصرف انرژی در طول سال، مطابق با شکل ۱۱ بین دیوارهای W6 و W4 و برابر با ۴۲۰۲ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. این تفاوت در میزان مصرف انرژی اهمیت جنس دیوارها را نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ مجموع انرژی مصرفی برای سرمایش و گرمایش را در طول یک سال برای دیوارهای بررسی شده در این پژوهش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طول سال دیوارهای W6 و W3 از نظر مصرف انرژی بهینه‌اند و پس از آن دیوارهای W5 و W2 قرار می‌گیرند،



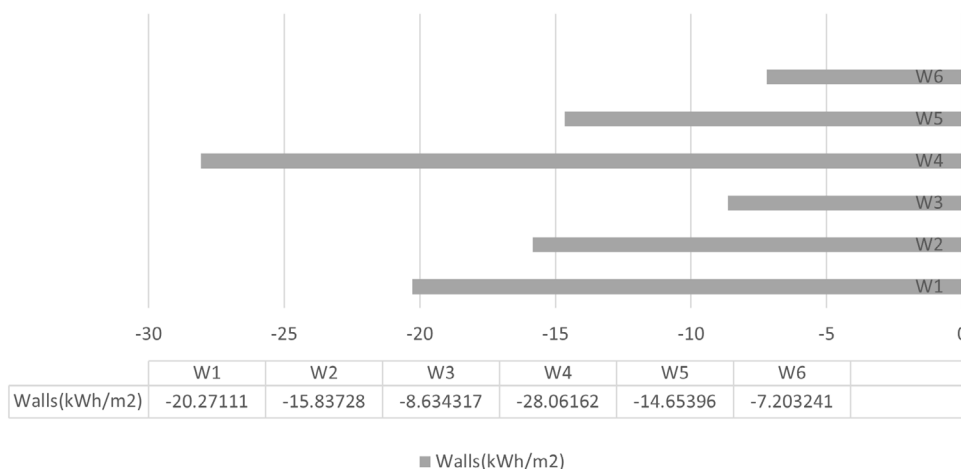
تصویر ۱۱. مجموع مصرف انرژی برای سرمایش و گرمایش

پراکندگی قابل توجهی بین دیوارهای مختلف است. همانگونه که در نمودار دیده می شود میزان اتلاف حرارت از دیوارها بین بهترین و بدترین حالت نزدیک ۴.۵ برابر است که این مقدار بسیار میتواند در میزان مصرف انرژی تاثیر گذار باشد.

با توجه به مشخصات فیزیکی هر دیوار، رابطه مستقیمی بین مقاومت حرارتی دیوارها و اتلاف انرژی دیده می شود. این موضوع نشان دهنده این نکته است که توجه به مقاومت حرارتی جدارها در مرحله اول به میزان خیلی زیادی می تواند در مصرف انرژی صرفه جویی کند.

تصویر ۱۲ انتقال حرارت از دیوارها را به ازای هر مترمربع (kWh/m2) برای شش نوع دیوار مختلف (W6 تا W1) نمایش می دهد. با توجه به داده های ارائه شده، مشاهده می شود که دیوارهای مختلف (W6 تا W1) انتقال حرارت متفاوتی دارند که مستقیماً بر مصرف انرژی گرمایشی تأثیر می گذارند. به طور کلی، دیوارهایی با انتقال حرارت کمتر (عدد منفی کمتر) بهتر عایق بندی شده اند و نیاز به مصرف انرژی کمتری برای حفظ گرما در داخل ساختمان دارند. در ادامه، تحلیل دقیق تر داده های موجود در نمودار ارائه می شود: میانگین انتقال حرارت از دیوارها حدود $-22,309,39$ کیلووات ساعت/مترمربع است و انحراف معیار $12,251$ کیلووات ساعت/مترمربع نشان دهنده

Heat Transfer from Walls(kWh/m2)



تصویر ۱۲. اتلاف انرژی از دیوارها

استخراج نمودارهای مربوطه، مصرف انرژی در فصل‌های مختلف مقایسه می‌گردد (جدول ۵). هدررفت حرارتی از دیوارهای خارجی در فصول گرم و سرد با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا نتایج دقیق‌تری به دست آید.

با توجه به اینکه بلوک سفالی و فضای خالی پر شده با پلی‌استایرن متداول‌ترین دیوار در ساخت‌وساز در تهران و منطقه ۱۵ است، به‌عنوان مدل پایه برای مطالعه‌ی ناماسازی‌های مختلف انتخاب گردید.

جدول ۵ نمای ساختمان از بیرونی‌ترین تا داخلی‌ترین لایه

لایه‌ها	n
سنگ	F1
آجری	F2
پانل‌های بتنی	F3
سرامیک	F4
کامپوزیت فلزی	F5
سیمانی	F6

تصویر ۱۳ به میزان انرژی مصرفی برای سرمایش ساختمان‌ها از اول آوریل تا پایان سپتامبر و تصویر ۱۲ به مصرف انرژی برای گرمایش از اول اکتبر تا پایان مارس اشاره دارند. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، در فصل تابستان دیوار F2 به‌عنوان دیواری که کمترین مصرف انرژی برای سرمایش را دارد، نشان‌دهنده این است که این دیوار خواص حرارتی مناسبی دارد که از انتقال حرارت از محیط خارجی به داخل ساختمان جلوگیری می‌کند. در عین حال، دیوار F6 بیشترین مصرف انرژی را برای سرمایش دارد که به دلیل نقص در ویژگی‌های حرارتی آن است و انتقال حرارت اضافی از بیرون به داخل ساختمان را تسهیل می‌دهد.

دیوار W4: بیشترین میزان انتقال حرارت را با ۲۸،۰۰۳ کیلووات‌ساعت بر مترمربع دارد که نشان‌دهنده تلفات حرارتی بالای این دیوار است.

دیوار W6: کمترین میزان انتقال حرارت را با ۷،۲۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع دارد که نشان می‌دهد این دیوار تلفات حرارتی کمتری نسبت به سایر دیوارها دارد.

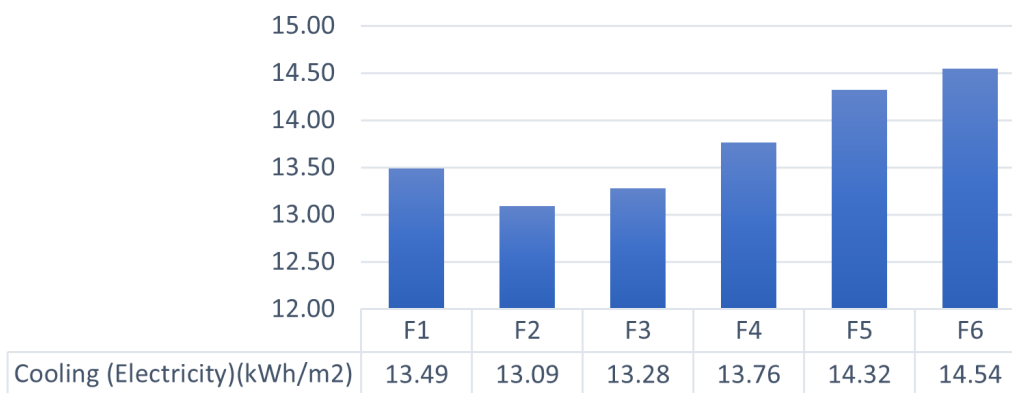
دیوار W5: میزان انتقال حرارت نسبتاً بالا با ۱۴،۶۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع دارد که به عملکرد متوسط در عایق‌بندی حرارتی اشاره دارد.

دیوار W1، W4: انتقال حرارت در این دیوارها به ترتیب ۲۰،۲۷ و ۲۸،۰۰۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است. این مقادیر نشان می‌دهد که این دیوارها تلفات حرارتی بیشتری نسبت به W2 و W5 دارند.

در نتیجه دیوار W4 بالاترین میزان تلفات حرارتی را دارد که نشان‌دهنده نیاز به بهبود در عایق‌بندی حرارتی این دیوار است. دیوار W6 بهترین عملکرد را از نظر کاهش تلفات حرارتی دارد که می‌تواند به‌عنوان یک انتخاب بهینه برای کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته شود. تفاوت‌های موجود در میزان انتقال حرارت بین دیوارهای مختلف، اهمیت انتخاب مواد و طراحی مناسب دیوارها را در بهینه‌سازی مصرف انرژی نشان می‌دهد. این داده‌ها می‌توانند به مهندسان و طراحان کمک کنند تا با انتخاب و بهبود طراحی دیوارها، بهره‌وری انرژی ساختمان‌ها را افزایش دهند.

۴-۲. بررسی انواع نماها

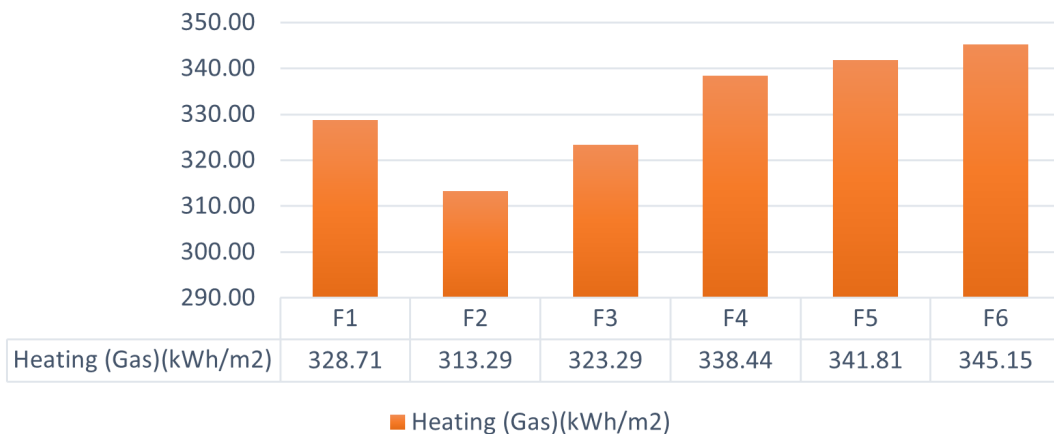
در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف، مصرف انرژی برای سرمایش تابستانی و گرمایش زمستانی در ساختمان‌ها براساس شش نوع مختلف ناماسازی بررسی می‌شود. سپس با تحلیل دقیق داده‌های شبیه‌سازی و

■ Cooling (Electricity)(kWh/m²)

تصویر ۱۳. مصرف انرژی سرمایشی در تابستان

سرمایش است. مصرف گاز برای گرمایش در بین مصالح مختلف از ۱۳۰۰۹ کیلووات‌ساعت/مترمربع (مصالح F2) تا ۳۴۵۰۱۵ کیلووات‌ساعت/مترمربع (مصالح F۶) متغیر است. پس از آن دیوارهای F5 و F4 بیشترین میزان مصرف انرژی را دارند. دو دیوار F1 و F3 مصرف انرژی نزدیک به یکدیگر دارند. تفاوت بین کمترین و بیشترین مصرف انرژی گرمایشی حدود ۳۱۰۸۶ کیلووات‌ساعت/مترمربع است.

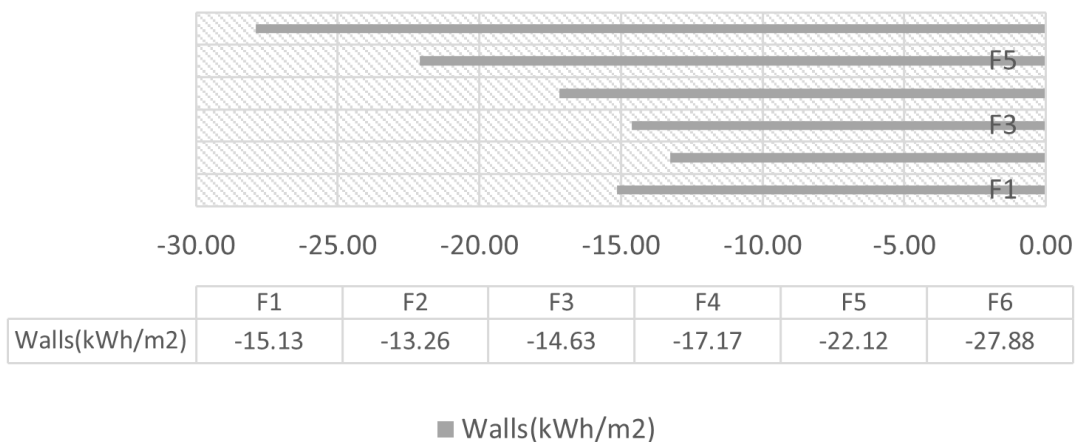
در فصل گرم، دیوارهای F6 و F5 بیشترین میزان مصرف انرژی را برای سرمایش دارند و نیاز دارند به افزایش دمای داخلی. دیوارهای F1 و F4 نیز با اختلاف کمی در میزان مصرف انرژی، سهم بعدی را دارند. بیشترین اختلاف در میزان مصرف انرژی برای سرمایش، ۱۰۴۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع است که بین دیوارهای F2 و F6 مشاهده می‌شود. این تفاوت نشان‌دهنده اهمیت تفاوت در ویژگی‌های حرارتی بین این دیوارها در ارتقای کارایی انرژی و کاهش مصرف انرژی برای



تصویر ۱۴. مصرف انرژی گرمایشی در زمستان

کیلووات‌ساعت/مترمربع نشان‌دهنده پراکندگی قابل توجهی در بین مصالح مختلف است. با توجه به این تحلیل‌ها، انتخاب مصالح ناماسازی با توجه به کمترین انتقال حرارت از دیوارها (مثل F2) می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک کند.

مصالح F2 به‌عنوان مصالحی با کمترین انتقال حرارت از دیوارها و همچنین کمترین مصرف انرژی گرمایشی مشخص شده‌اند که آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاهش هزینه‌های انرژی گرمایشی و افزایش بهره‌وری انرژی تبدیل می‌کند. میانگین انتقال حرارت از دیوارها حدود -۳۴۰۷۶۹۴۸- کیلووات‌ساعت/مترمربع است و انحراف معیار ۹۰۴۷۷۴



تصویر ۱۵. اتلاف انرژی از دیوارها

۵. اعتبارسنجی: مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی

و اندازه‌گیری

در این مطالعه، ساختمان موردنظر با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی جمع‌آوری شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری مقایسه شده‌اند. تمامی ویژگی‌های فیزیکی ساختمان، شامل مصالح ساختمانی، نقشه داخلی، ابعاد و اندازه‌های فضاها و شرایط همسایگی ساختمان به‌دقت در نرم‌افزار وارد شده‌اند.



تصویر ۱۶. موقعیت ساختمان برداشت‌شده

۵-۱. معرفی ساختمان مطالعه‌شده

در طبقه میانی ساختمان یک دستگاه نصب گردید و دمای فضا از این طریق اندازه‌گیری شد. دما توسط دستگاه در ماه‌های بهمن، اردیبهشت، مرداد و آبان از ۱۵ تا ۳۰ ماه (هر یک ساعت یک بار) ثبت خواهد شد و به این طریق، میانه هر فصل به‌عنوان نماینده کل فصل ارزیابی و تجزیه و تحلیل خواهد شد. برای حذف عوامل مداخله‌گر، تمامی سیستم تأسیساتی ساختمان در زمان‌های برداشت خاموش‌اند.

لایه‌های دیوار دقیقاً همانند مورد اجرا شده در نرم‌افزار مدل گردیدند که در جدول زیر مشاهده می‌شوند. برای شبیه‌سازی اقلیمی، فایل اقلیمی مربوط به ایستگاه مهرآباد تهران به نرم‌افزار وارد شده است. با توجه به اینکه اقلیم منطقه ۱۵ تهران با اقلیم مهرآباد متفاوت است، اطلاعات اقلیمی دقیق‌تری که توسط اداره هواشناسی در زمان نصب دستگاه‌ها برای محیط خارجی ثبت شده بودند، از این سازمان دریافت شده‌اند. این اطلاعات با فایل اقلیمی ایستگاه مهرآباد مقایسه شده‌اند تا دقت شبیه‌سازی بهبود یابد و نتایج به شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه نزدیک‌تر شوند. مقایسه این داده‌ها و فایل‌های اقلیمی در شکل زیر نشان داده شده است.

جدول ۷. خواص ترموفیزیکی نمای خارجی ساختمان

جنس مصالح	ضخامت مصالح (d)	چگالی (ρ)	گرمای ویژه (cp)	ضریب تبادل حرارت (U)	مقاومت (R)	ضریب هدایت حرارتی (λ)
	mm	Kg/m ³	J/kg.k	W/ m2.k	m ² .k/W	W/m.k
سنگ تراورتن	۲۰ میلی متر	2243	837	0.01	10	2
ملات ماسه سیمان	۵۰ میلی متر	1800	1000	20	0.05	1
بلوک سفالی	۱۵۰ میلی متر	1650	840	2.5	0.40	0.37
گچ و خاک	۳۰ میلی متر	1200	940	33.34	0.03	0.57

جدول ۸. خواص ترموفیزیکی سایر عناصر ساختمان

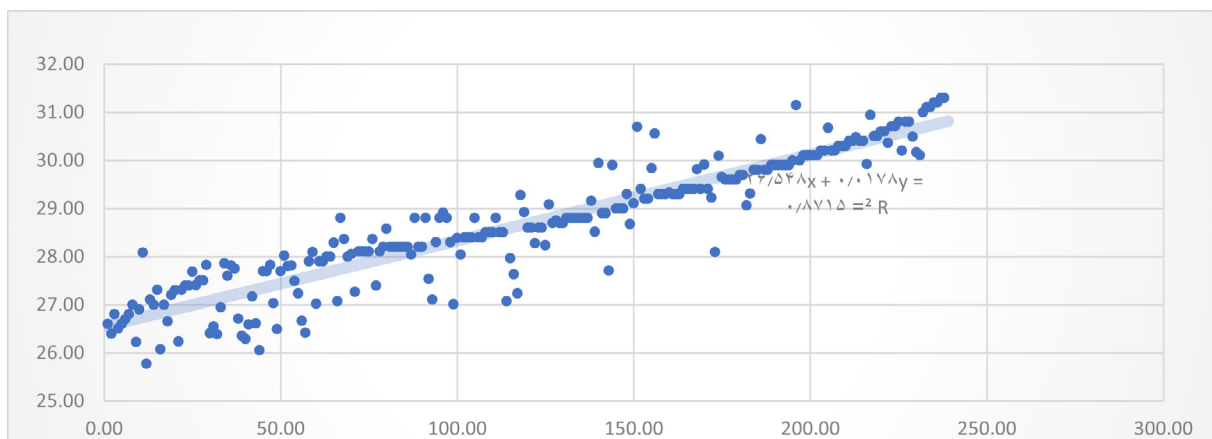
بخش‌های مختلف ساختمان	لایه	ضخامت (m)	k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c _p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	U (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
دیوارهای شرقی و غربی	سیمان کاری	0.200	0.500	1300	800	1.949
	سفال	0.030	0.700	840.0	800.0	
	کچکاری	0.030	1.100	1400	837.0	
کف	گچکاری	0.030	1.100	1400	837.0	1.027
	سازه سقف	0.300	0.379	25.00	1300	
	بتن سبک	0.050	0.530	1280	840.0	
	نازک کاری	0.030	0.700	840.0	800.0	

بخش‌های مختلف ساختمان	لایه	ضخامت. (m)	k (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	ρ (kg·m ⁻³)	c _p (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	U (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
سقف	موزاییک	0.025	1.400			0.907
	آسفالت	0.030	0.200	1050	900.0	
	ملات	0.045	1.150	2000	800	
	بتن سبک	0.050	0.530	1280	840.0	
	سازه سقف	0.300	0.379	25.00	1300	
	گچکاری	0.030	1.100	1400	837.0	
پنجره	شیشه شفاف	0.006	0.900			2.685
	هوا(گاز)	0.012				
	شیشه شفاف	0.006	0.900			

برای مقایسه نتایج، از تحلیل رگرسیون و ضرایب همبستگی استفاده شد. همان طور که در شکل‌های زیر نشان داده شده است، نتایج تحلیل رگرسیون خطی نشان می‌دهد که مقدار R برای همبستگی بین اندازه‌گیری‌های واقعی و شبیه‌سازی توسط دیزاین بیلدر برابر با ۰.۸۷ است. این مقدار نشان‌دهنده قابلیت اعتماد زیاد است و استفاده از نرم‌افزار را تأیید می‌کند.

۲-۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و برداشت در فصل تابستان

در تابستان، میانگین اختلاف دما بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های میدانی کمتر از یک درجه سانتیگراد است که قابل قبول است. تفاوت دمای بین فایل اقلیمی استفاده‌شده در شبیه‌سازی و دمای ثبت‌شده توسط ایستگاه هواشناسی حدود ۱.۳۵ درجه سانتیگراد است که تأثیر قابل توجهی بر دمای داخلی ندارد.

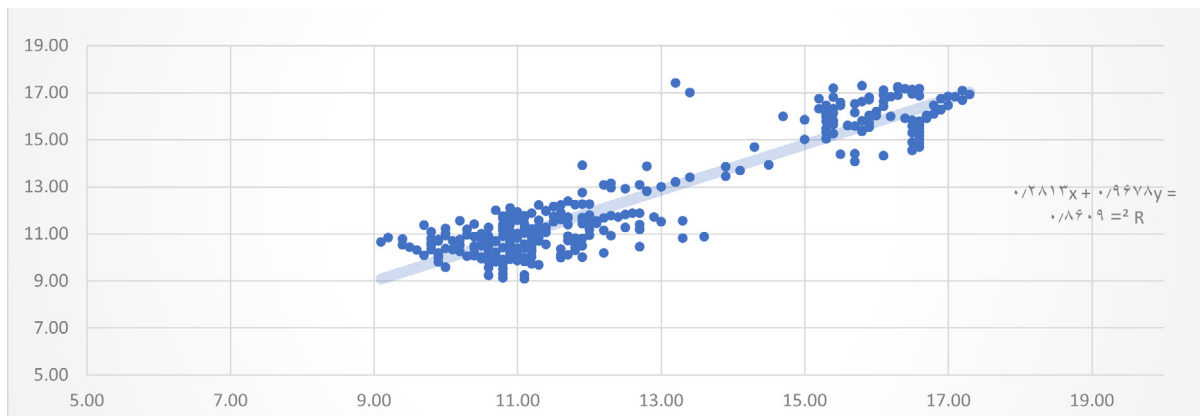


تصویر ۱۷. تحلیل رگرسیون همبستگی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده $R^2 = 0.2314$

ریتیم مشاهده‌شده در فایل اقلیمی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده هم‌خوانی دارد. به‌طور میانگین، کمتر از ۱ درجه اختلاف میان داده‌های برداشته‌شده و نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. این اختلاف بیشتر در زمان‌هایی ملاحظه می‌شود که میان فایل اقلیمی واردشده در نرم‌افزار و فایل اقلیمی اندازه‌گیری‌شده توسط ایستگاه مهرآباد انجام شده است. در نتیجه، نتایج بسیار به یکدیگر نزدیک و اعتبار نتایج شبیه‌سازی قابل تأیید است.

۳-۵. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و برداشت در فصل زمستان

در زمستان، میانگین اختلاف دمای ۱.۵۲ درجه سانتیگراد بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها مشاهده می‌شود. متأسفانه فایل اقلیمی به‌دست‌آمده از ایستگاه هواشناسی تهران برای روزهای زمستان به‌طور کامل در دسترس نبود و تنها در ساعات محدودی از روز دمای هوا ثبت شده است. باین‌حال،



تصویر ۱۸. تحلیل رگرسیون همبستگی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده $R^2 = 0.86$

به دست آمده‌اند: در شرایط پایدار، دیوار نوع W6 با کمترین ضریب هدایت حرارتی ($U\text{-value}=0.37$) مناسب‌ترین رفتار حرارتی را نشان می‌دهد و به دلیل ضریب کاهش پایین، بالاترین قابلیت را در تعدیل نوسانات دمایی داخلی نسبت به نوسانات دمایی بیرونی دارد. از طرف دیگر، دیوار F2 با عایق ۷ سانتی‌متری کمترین میزان مقاومت حرارتی بیشترین میزان مصرف را دارد. از آنجاکه این پارامتر با در نظر گرفتن مجموع ویژگی‌های حرارتی و فیزیکی محاسبه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که معیار مناسب‌تری برای تعیین میزان مؤثر بودن یک ماده ساختمانی از دیدگاه رفتار حرارتی است.

معماران و طراحان ساختمان می‌توانند از این نتایج برای انتخاب مصالح مناسب در مراحل اولیه طراحی استفاده کنند. همچنین سیاست‌گذاران شهری می‌توانند از این اطلاعات برای تدوین دستورالعمل‌های ساخت‌وساز پایدار بهره بگیرند. سازندگان مصالح ساختمانی می‌توانند محصولات جدیدی براساس مقاومت حرارتی و ویژگی‌های محیطی توسعه دهند. پیشنهادات برای تحقیقات آینده:

- بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد حرارتی پوسته‌های ساختمانی در طولانی‌مدت؛
 - مطالعه روی مصالح نوین و فناوری‌های پیشرفته، مانند نماهای هوشمند و مواد تغییرفازدهنده؛
 - تحلیل هزینه-فایده بهینه‌سازی پوسته ساختمان در مقیاس کلان، به‌ویژه در مناطق با اقلیم‌های متنوع؛
 - ایجاد مدل‌های جامع که تأثیر جنبه‌های مختلف طراحی، مانند تهویه طبیعی و روشنایی روز را به‌طور هم‌زمان بررسی کنند.
- این یافته‌ها می‌توانند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها کمک شایانی کنند.

۶. نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که طراحی و انتخاب بهینه پوسته‌های ساختمانی تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها دارد. لایه‌بندی دیوارها و نوع مصالح مورد استفاده از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار حرارتی و مصرف انرژی‌اند. دیوارهای با مقاومت حرارتی بالا، مانند W6 توانستند مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش را به‌میزان قابل‌توجهی کاهش دهند. این در حالی است که دیوارهای با ضریب انتقال حرارت بالا، مانند W4 بیشترین تلفات حرارتی و مصرف انرژی را داشتند.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رفتار دیوارهای ارائه‌شده با آنچه که براساس ضریب هدایت حرارتی آن‌ها انتظار می‌رود، یکسان است. جرم حرارتی نقش کلیدی در رفتار حرارتی در شرایط غیرپایدار دارد و وابسته به سه ویژگی اصلی مصالح ساختمانی است: چگالی (ρ)؛ ظرفیت حرارتی (c)؛ ضریب هدایت حرارتی (λ). این ویژگی‌ها به شرح زیرند: ظرفیت حرارتی بالاتر باعث افزایش مقدار حرارت قابل‌جذب در هر کیلوگرم ماده می‌شود. مصالح با چگالی بیشتر حرارت بیشتری جذب می‌کنند. ضریب هدایت حرارتی متوسط کمک می‌کند تا ظرفیت حرارتی یک ماده به‌صورت کارآمد عمل کند. ضریب هدایت حرارتی متوسط به یک ماده امکان می‌دهد تا با محیطش به‌سرعت مناسبی تبادل گرما انجام دهد. بنابراین، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که با هندسه و ساختار یکسان، مصالحی مانند لیکا و هبلکس رفتار حرارتی بهتری نسبت به بلوک‌های سفالی نشان می‌دهند. بدیهی است که شکل و ساختار محصول نهایی، از جمله توپر یا توخالی بودن بلوک‌ها، تأثیر زیادی بر رفتار حرارتی کل سازه دارد. مقادیر ویژگی‌های حرارتی هر یک از تیپ‌های دیوار که با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر و روش محاسباتی CIBSE



References

1. Acar, U., Kaska, O., & Tokgoz, N. 2021. Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey. *Journal of Building Engineering*, 42, 102499.
2. Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. 2016. Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions. *Energy Procedia*, 91, 269-275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.218>
3. Al-Homoud, M. S. 2005. A Systematic Approach for the Thermal Design Optimization of Building Envelopes. *Journal of Building Physics*, 29(2), 95-119. <https://doi.org/10.1177/1744259105056267>
4. Al-Yasiri, Q., & Szabó, M. 2021. Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*, 36, 102122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102122>
5. Azami, A., & Sevinç, H. 2021. The energy performance of building integrated photovoltaics (BIPV) by determination of optimal building envelope. *Building and Environment*, 199, 107856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107856>
6. Butt, A. A., de Vries, S. B., Loonen, R. C. G. M., Hensen, J. L. M., Stuiiver, A., van den Ham, J. E. J., & Erich, B. S. J. F. 2021. Investigating the energy saving potential of thermochromic coatings on building envelopes. *Applied Energy*, 291, 116788. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116788>
7. Caldas, L. G., & Norford, L. K. 2002. A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11(2), 173-184. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(00\)00096-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0926-5805(00)00096-0)
8. DesignBuilder. 2009. DesignBuilder software User manual. In.
9. Fan, Y., & Xia, X. 2017. A multi-objective optimization model for energy-efficiency building envelope retrofitting plan with rooftop PV system installation and maintenance. *Applied Energy*, 189, 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.077>
10. Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., & Thomas, S. 2009. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. *Renewable Energy*, 34(9), 2030-2036. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.016>
11. Huang, J., Wang, S., Teng, F., & Feng, W. 2021. Thermal performance optimization of envelope in the energy-saving renovation of existing residential buildings. *Energy and Buildings*, 247, 111103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111103>
12. Iwano, J., & Mwasha, A. 2013. The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 153-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.03.002>
13. Lee, J. W., Jung, H. J., Park, J. Y., Lee, J. B., & Yoon, Y. 2013. Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable Energy*, 50, 522-531. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.029>
14. Li, H., & Wang, S. 2020. Coordinated robust optimal design of building envelope and energy systems for zero/low energy buildings considering uncertainties. *Applied Energy*, 265, 114779. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114779>
15. Luo, M., Arens, E., Zhang, H., Ghahramani, A., & Wang, Z. 2018. Thermal comfort evaluated for combinations of energy-efficient personal heating and cooling devices. *Building and Environment*, 143, 206-216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.008>
16. Mostavi, E., Asadi, S., & Boussaa, D. 2017. Development of a new methodology to optimize building life cycle cost, environmental impacts, and occupant satisfaction. *Energy*, 121, 606-615. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.049>
17. Nematshoua, M. K., Tchinda, R., & Orosa, J. A. 2014. Thermal comfort and energy consumption in modern versus traditional buildings in Cameroon: A questionnaire-based statistical study. *Applied Energy*, 114, 687-699.
18. Sanaieian, H., Tenpierik, M., Linden, K. v. d., Mehdizadeh Seraj, F., & Mofidi Shemrani, S. M. 2014. Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 551-560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.007>
19. Zahir, S., & Elsharkawy, H. 2018. Towards energy-efficient retrofit of council housing in London: Assessing the impact of occupancy and energy-use patterns on building performance. *Energy and Buildings*, 174, 672-681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.010>

