



The University of Tehran Press

Analysis of Balcony Variables Aimed at Optimizing Energy Consumption and Daylight in Mid-Rise Residential Apartments in Tehran

Maryam Imani Emadi^{1*} | Farshad Nasrollahi² | Mahmood Reza Saghafi³

1. Corresponding Author, Ph.D. Candidate, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Isfahan, Iran. Email: maryamimaniemadi@gmail.com

2. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Isfahan, Iran. Email: f.nasrollahi@au.ac.ir

3. Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Art, Isfahan, Iran. Email: saghafi@au.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:

Received: 23 May 2025

Revised: 20 July 2025

Accepted: 22 September 2025

Published Online: 15 January 2025

Keywords:

Mid-rise apartment,
Balcony,
Multi-objective optimization,
Energy saving.

ABSTRACT

With the rapid growth of population and the increasing demand for housing, along with rising land prices, vertical construction in large cities has become inevitable. In this process, traditional open and semi-open spaces such as courtyards and verandas—which played a key role in enhancing the quality of life—have gradually diminished, being replaced by small and less functional balconies. Nevertheless, balconies, as transitional spaces between the indoors and outdoors, still hold considerable potential for reducing building energy consumption while providing access to natural daylight. This study aims to optimize balcony design in mid-rise residential apartments in the climate of Tehran, examining the simultaneous impact of five variables: balcony length, projection depth, recess depth, type of parapet, and window-to-wall ratio. Energy simulation and analysis were conducted using the Ladybug Tools plugin in Rhino 8, while a genetic algorithm was applied through the Wallacei add-in. The results indicate that the optimal Model 1, with a projection depth of 1.2 m, a recess depth of 0.4 m, a railing-type parapet, and a high window-to-wall ratio, reduced energy consumption by up to 3.9 kWh/m² compared to the baseline model. Moreover, daylight sufficiency in this model increased by more than 5.1%, while the annual indoor solar exposure decreased by about 4.9%. These findings highlight the significance of selecting optimal balcony design parameters and can serve as practical guidance for designing energy-efficient balconies in mid-rise residential buildings.

Cite this article: Imani Emadi, M.; Nasrollahi, F. & Saghafi, M. R. (2026). Analysis of Balcony Variables Aimed at Optimizing Energy Consumption and Daylight in Mid-Rise Residential Apartments in Tehran. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 5 (1), 19-38. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396333.1159>



© Maryam Imani Emadi, Farshad Nasrollahi, Mahmood Reza Saghafi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396333.1159>

Introduction

Balconies, as one of the few dedicated semi-open spaces in modern apartment buildings, offer substantial potential to improve residents' quality of life and reduce energy consumption. However, their size and function have diminished over time, often reduced to shallow recesses with minimal shading value. Climate-responsive balcony designs can enhance building performance by providing solar protection and lowering cooling demand. Although previous studies have explored balconies' effects on energy use, daylight, or annual sun light exposure, few have quantitatively examined multiple design parameters in a climate-specific, multi-objective framework. For example, Yang and Li analyzed balcony depth and window-to-wall ratio (WWR) without parametric optimization, while others like Sabatelle and Grozinska focused on materials or glazing. This study fills the gap by

conceptualizing balconies as active environmental design elements and evaluating their impact using a parametric, simulation-based approach tailored to Tehran's hot-dry climate.

Methodology

A mixed-methods, developmental-applied approach was used. The qualitative phase involved a literature review and typological analysis to identify five key geometric variables: balcony length, projection depth, recess depth, parapet type, and window-to-wall ratio. In the quantitative phase, Rhino/Grasshopper with Ladybug Tools and Wallacei plugin was used to simulate energy and daylight performance. Optimization was conducted via a multi-objective genetic algorithm based on three metrics: annual energy use (kWh/m²), spatial daylight autonomy (sDA), and annual direct solar radiation. Results were evaluated through comparative analysis and consistency with prior findings.

Conclusion

This study sought to parametrically optimize balcony geometry in mid-rise residential buildings in Tehran's hot-dry climate. Results revealed that recess depth, parapet type, and WWR are critical to both energy performance and daylight quality. Optimized configurations with recess depths of 0.4–0.8 m, open rail parapets, and 80% WWR achieved up to 3.9 kWh/m² energy reduction over the base model and sDA improvements up to 59.8%. These results align with Yang et al. (6.7–12.3% cooling savings from optimized balconies) and with Ji, Luche, and others on the daylight benefits of increased WWR and well-proportioned forms. Conversely, large recesses combined with solid parapets negatively impacted both performance metrics confirming findings by Bagheri, Nik-Ghadam, Eskandari, and Ribeiro regarding the drawbacks of poor balcony form in hot climates. Despite climatic differences, outcomes also resonated with studies like Sabaté et al. in Spain's Mediterranean context, emphasizing the value of balconies as passive cooling strategies.

Component / Variable	Present Study (Tehran)	Related Studies	Alignment
Recess depth (0.4–0.8 m)	Energy savings up to 3.9 kWh/m ²	Yang et al. (China)	6.7–12.3% cooling energy reduction
WWR (80%)	sDA up to 59.8%	Ji, Luche, etc.	Enhanced daylight with large window area
Open rail parapet	Better energy and daylight	Bagheri, Ribeiro	Supports airflow/light benefits
Deep recess + solid parapet	Negative impact on both metrics	Same sources	Confirms form-related disadvantages
Climate comparison	Hot-dry Tehran	Sabaté et al. (Spain)	Supports balcony as passive cooling

A key finding is that no single configuration is optimal across all metrics. For example, while 1.2 m projection with 0.4 m recess maximizes energy savings, shallower recesses perform better in sDA. This highlights the need for balanced, priority-driven design decisions. Moreover, the parapet design proved vital: open railings consistently outperformed solid types in both daylight and energy efficiency. However, implementation may be constrained by safety codes and building regulations, especially on upper floors necessitating further study. The primary contribution of this research is its multi-objective, parametric optimization approach, allowing simultaneous analysis of geometric variables across key performance domains. Unlike single-criteria studies, this method facilitates understanding of design trade-offs and supports climate-specific design strategies. Cross-validation with international literature further reinforces the credibility and applicability of findings. Limitations include reliance on a typical mid-rise model, fixed material assumptions, and exclusion of contextual elements like greenery, movable shading, or reflected light. The absence of field validation also limits generalizability. Future research should incorporate hybrid methods combining simulation, behavioral modeling, and empirical studies to support more holistic balcony design.

In conclusion, integrating parametric modeling with multi-objective optimization during early design stages can significantly enhance building performance in hot-dry regions. When combined with economic, technical, and environmental assessments, this method can lead to realistic, actionable solutions for improving the energy and environmental quality of residential buildings.



انتشارات دانشگاه تهران

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

شاپا الکترونیکی: ۸۶۹۳-۲۹۸۰

تحلیل متغیرهای بالکن با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و نور روز در آپارتمان‌های مسکونی میان مرتبه تهران

مریم ایمانی عمادی^{۱*} | فرشاد نصراللهی^۲ | محمود رضا ثقفی^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: maryamimaniemadi@gmail.com
۲. دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: f.nasrollahi@aui.ac.ir
۳. استاد، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: saghafi@aui.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۲۵

کلیدواژه:

آپارتمان میان مرتبه،

بالکن،

بهینه‌یابی چندهدفه،

صرفه‌جویی انرژی.

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به تأمین مسکن، افزایش قیمت زمین و گسترش ساخت‌وسازهای عمودی در شهرهای بزرگ به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. در این روند، فضاهای باز و نیمه‌باز سنتی نظیر حیاط و ایوان که نقشی کلیدی در بهبود کیفیت زندگی داشتند، کمرنگ شده و جای خود را به بالکن‌هایی کوچک و کم‌کاربرد داده‌اند. این در حالی است که بالکن‌ها به عنوان رابط میان فضای داخلی و محیط بیرون، همچنان پتانسیل قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی ساختمان همراه با بهره‌مندی از نور طبیعی را دارند. این پژوهش با هدف بهینه‌سازی طراحی بالکن در آپارتمان‌های مسکونی میان‌مرتبه اقلیم تهران انجام شده و در آن، تأثیر پنج متغیر شامل طول بالکن، عمق بیرون‌زدگی، عمق فرورفتگی، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی انرژی و تحلیل نتایج از پلاگین لیدی باگ تولز در نرم‌افزار راینو نسخه ۸ و الگوریتم ژنتیک از طریق افزونه والاسی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل بهینه ۱ با عمق بیرون‌زدگی ۱/۲ متر، فرورفتگی ۰/۴ متر، جان‌پناه نرده‌ای و نسبت بالای پنجره به دیوار، مصرف انرژی را نسبت به مدل پایه تا ۳/۹ کیلووات ساعت بر مترمربع کاهش داده است. افزون بر این، کفایت نور روز در این مدل بیش از ۵/۱ درصد افزایش و شدت تابش مستقیم سالانه خورشید در فضای داخلی حدود ۴/۹ درصد کاهش یافته است. این نتایج اهمیت انتخاب بهینه پارامترهای طراحی بالکن را نشان می‌دهد و می‌تواند راهنمایی کاربردی برای طراحی بالکن‌های بهینه در ساختمان‌های مسکونی میان‌مرتبه باشد.

استناد: ایمانی عمادی، مریم؛ نصراللهی، فرشاد و ثقفی، محمود رضا (۱۴۰۴). تحلیل متغیرهای بالکن با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی و نور روز در آپارتمان‌های مسکونی میان مرتبه تهران. *فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار*، ۵ (۱)، ۳۸-۱۹.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396333.1159>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© مریم ایمانی عمادی، فرشاد نصراللهی، محمود رضا ثقفی

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.396333.1159>



۱. مقدمه

در شرایط کنونی که مصرف انرژی در ساختمان‌ها و در پی آن، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای رو به افزایش است، توجه به راهکارهای معماری پایدار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. معماری سنتی ایران، با بهره‌گیری از عناصر طراحی هوشمندانه و تکنولوژی‌های ایستا، توانسته بود پاسخ‌گوی نیازهای حرارتی باشد و از مصرف بی‌رویه انرژی جلوگیری کند [۱]. این عناصر، اگر به طور صحیح و متناسب با نیازهای معاصر بازطراحی شوند، قابلیت بهره‌گیری در معماری امروز را نیز دارند. با این حال، در سال‌های اخیر تمرکز بیش از حد بر سیستم‌های تهویه مطبوع و غفلت از ظرفیت‌های معماری اقلیمی، موجب افزایش مصرف انرژی و تشدید مشکلات زیست‌محیطی شده است.

در این میان، بالکن‌ها به عنوان یکی از محدود فضاهای نیمه‌باز اختصاصی در آپارتمان‌های امروزی، می‌توانند نقشی مؤثر در ارتقای کیفیت زندگی و نیز کاهش نیاز به انرژی ایفا کنند. با وجود این پتانسیل، ابعاد بالکن‌ها در گذر زمان کوچک‌تر شده و گاه به پنجره‌ای با نرده تقلیل یافته‌اند. طراحی نامناسب و مساحت اندک باعث شده این فضاها بیشتر برای خشک کردن لباس یا انبار وسایل به کار روند و موجب اختلال در منظر شهری شوند [۲]. در حالی که با طراحی علمی، بهینه‌سازی ابعاد و توجه به ارتباط مناسب بالکن با فضای داخلی، می‌توان از این فضا در راستای افزایش آسایش حرارتی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای کیفیت معماری بهره گرفت. از این رو، انجام بررسی‌های دقیق‌تر و علمی‌تر روی این عناصر می‌تواند راهگشای کاهش مشکلات موجود باشد [۳].

به طور کلی، سیستم‌های پسیو در ساختمان‌ها با استفاده از اصول طبیعی برای کنترل دما، نقش مهمی در کاهش نیاز به سیستم‌های سرمایشی فعال مانند کولرهای برقی دارند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های معماری و طراحی، مانند بازشوها و بالکن‌ها، به جریان هوا و تهویه طبیعی و کنترل نور و گرمای خورشید کمک می‌کنند [۳].

در تعاریف، بالکن‌ها به عنوان یک عنصر الحاقی به ساختمان است که حداقل از یک طرف باز است. بالکن‌ها می‌توانند از دو طرف و یا سه طرف باز در نظر گرفته شوند و دارای جان‌پناهی از جنس نرده یا نیم‌دیوار و یا ترکیب هر دو باشند که به سه دسته صلب، نیمه‌صلب و نرده‌ای تقسیم می‌شوند [۴]. از نظر ساکنان، بالکن یک فضای خصوصی باز است که در تأمین هوای تازه نقش مؤثری دارد [۵].

طراحی بالکن و ایوان با توجه به ویژگی‌های اقلیمی می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها ایفا کند. بالکن‌ها به عنوان فضاهای نیمه‌باز نقش بینابینی بین فضای داخلی و خارجی ساختمان دارند و می‌توانند به عنوان یک فضای تعدیل‌کننده دما عمل کنند. این فضاها با ایجاد سایه و کاهش تابش مستقیم نور خورشید به داخل ساختمان، می‌توانند دمای داخلی را کاهش دهند و نیاز به استفاده از سیستم‌های سرمایشی را کمتر کنند. همچنین، بالکن‌ها می‌توانند مسیرهای جریان هوای طبیعی را تقویت کرده و به تهویه مناسب ساختمان کمک کنند که نتیجه آن، کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های سرمایشی است؛ بنابراین، استفاده بهینه از این عناصر معماری در طراحی ساختمان‌ها می‌تواند به بهبود کارایی انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به مصرف برق منجر شود [۴].

با وجود این اهمیت، مرور منابع نشان می‌دهد بیشتر مطالعات پیشین به طور محدود به بررسی یک یا دو مؤلفه کالبدی بالکن پرداخته‌اند، بدون آنکه تحلیل هم‌زمان چند متغیر در قالب چارچوب اقلیمی را مد نظر قرار دهند. همچنین، پژوهش‌های اندکی از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مانند الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه بالکن در شرایط خاص اقلیم گرم و خشک تهران بهره برده‌اند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از محیط پارامتریک راینو/گرس هاپر^۱، شبیه‌سازی انرژی و نور روز با استفاده از افزونه لیدی باگ تولز^۲ انجام گرفته و بهینه‌سازی چندهدفه متغیرهای طراحی با استفاده از الگوریتم ژنتیک والاسی^۳ صورت پذیرفته است... به این ترتیب، پژوهش حاضر با هدف ارائه مدلی بهینه برای طراحی بالکن‌های اقلیم‌محور در آپارتمان‌های میان‌مرتبه تهران، گامی نوآورانه به منظور ارتقای بهره‌وری انرژی و بهبود نور روز فضای داخل ساختمان برداشته است.

1. Rhino/Grasshopper
2. Ladybug Tools
3. Wallacei

۲. پیشینه و مبانی نظری پژوهش

مطالعات زیادی در مورد تأثیر جزئیات مربوط به نمای ساختمان و بالکن‌ها بر عواملی مانند آسایش حرارتی، جریان هوا، تهویه طبیعی، نور روز، تابش مستقیم سالیانه خورشید انجام شده است.

در پژوهش انجام شده توسط ساباتل و همکاران به بررسی نقش بالکن شیشه‌ای در کاهش مصرف انرژی ساختمان به عنوان یک راهکار غیرفعال در آب‌وهوای خشک مدیترانه‌ای جنوب شرقی اسپانیا پرداخته شد. در نتایج به دست آمده مشخص شد که بالکن شیشه‌ای در ساختمان به کاهش بیش از ۵۸ درصدی در تقاضای انرژی و مصرف انرژی سالانه منجر می‌شود و راهکاری مناسب برای بهبود بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی خانه، خواهد بود [۶].

باقری، نیک‌قدم و اسکندری در مطالعات خود نشان داده‌اند عواملی مانند عمق، فرم و جان‌پناه بالکن می‌توانند به طور مستقیم بر کارایی تهویه طبیعی و در نتیجه، کاهش مصرف انرژی تأثیر بگذارند. این موضوع به خوبی اهمیت توجه به اقلیم در طراحی فضاهای نیمه‌باز مانند بالکن‌ها را برجسته می‌کند [۷ - ۹].

یانگ و همکاران در پژوهش خود، به بررسی نقش بالکن در کاهش مصرف انرژی و مزایای زیست‌محیطی در اقلیم گرم و مرطوب تابستانی و سرد زمستانی چین پرداختند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی انرژی و تحلیل چرخه عمر، سناریوهای مختلف طراحی بالکن را از نظر صرفه‌جویی در انرژی سرمایشی، بازگشت سرمایه زیست‌محیطی و دوره بازگشت انتشار CO₂ ارزیابی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد افزودن بالکن می‌تواند بین ۶/۷ تا ۱۲/۳ درصد در مصرف انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع صرفه‌جویی ایجاد کند و دوره بازگشت زیست‌محیطی آن در برخی موارد کمتر از ۲۵ سال باشد. همچنین، عواملی مانند عمق بالکن، نسبت پنجره به دیوار، جهت‌گیری و نوع فضای متصل (اتاق خواب، نشیمن و...) در عملکرد انرژی و بازده زیست‌محیطی نقش مؤثری دارند. این مطالعه اهمیت توجه به طراحی بهینه بالکن را در ارتقای بهره‌وری انرژی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم‌های مشابه برجسته می‌سازد [۱۰].

شمس‌الدین در پژوهش خود به بررسی مفهومی قابلیت‌های طراحی بالکن‌ها برای حفظ پیوستگی عملکردهای زیست‌محیطی آن‌ها در مواجهه با شرایط متغیر اقلیمی و نیازهای متنوع کاربران پرداخت. وی با تحلیل طراحی‌های مختلف بالکن از منظر ویژگی‌های کالبدی همچون عمق، جهت‌گیری، ارتفاع نرده، نسبت پنجره به دیوار، مصالح و پوشش‌های گیاهی، پیشنهاد می‌دهد که با به کارگیری راه‌حل‌های طراحی انطباق‌پذیر و استفاده از عناصر متحرک یا طبیعی، می‌توان عملکردهایی همچون بهبود آسایش حرارتی، کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت بصری نما و افزایش کارایی فضای بالکن را به صورت هم‌زمان و پیوسته محقق ساخت [۱۱].

لی و همکاران در پژوهش خود با بررسی چهار متغیر بالکن مانند عایق حرارتی غیر شفاف، نسبت پنجره به دیوار، استفاده از درهای کشویی شیشه‌ای و استفاده از سایبان به بررسی تأثیر این متغیرها در مصرف انرژی پرداختند. در نتایج به دست آمده مشخص شد متغیرهای مورد بررسی بالکن، سطوح آسایش حرارتی را در داخل بنا حفظ می‌کند و میزان نور روز و عملکرد آن را بهبود می‌بخشد [۱۲].

یوان و همکاران در پژوهشی در اقلیم گرم شهر کینتاکیشو ژاپن، به بررسی تأثیر فرم‌های مختلف بالکن بر شرایط حرارتی داخلی و مصرف انرژی در فصل زمستان پرداختند. نتایج این مطالعه که بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شد، نشان داد طراحی بالکن بسته می‌تواند مصرف انرژی گرمایشی را نسبت به بالکن باز بین ۸ تا ۲۴ درصد کاهش دهد. این میزان با افزودن عایق حرارتی به بالکن بسته به ۱۴ تا ۳۶ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، بالکن‌های بسته رو به جنوب تأثیر مثبت‌تری بر بهبود شرایط حرارتی داخلی و عملکرد انرژی نسبت به بالکن‌های باز دارند. جالب آنکه حتی بالکن‌های بسته فاقد عایق نیز عملکرد بهتری نسبت به بالکن‌های باز مجهز به عایق حرارتی از خود نشان دادند که این موضوع اهمیت طراحی هدفمند بالکن بسته در فصل زمستان را برجسته می‌سازد [۱۳].

جی و همکاران در تحقیق خود با روش بهینه‌سازی چندهدفه به بررسی طراحی بالکن‌های فرورفته در خوابگاه‌های دانشگاه معماری شاندونگ در مناطق سردسیر پرداختند. در این پژوهش به ارزیابی ۲ متغیر عمق بالکن و نسبت پنجره به دیوار پرداخته و

تأثیر آن‌ها را در مصرف انرژی سالانه، آسایش حرارتی (PMV) و مقادیر نور روز (UDI) واحدهای خوابگاهی بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد عمق متفاوت بالکن‌ها و نسبت‌های پنجره به دیوار تأثیر قابل توجهی بر محیط فیزیکی داخلی و مصرف انرژی داشته است. همچنین، این متغیرها به صرفه‌جویی انرژی تا ۲/۵ درصد و افزایش آسایش حرارتی داخلی تا ۲۵ درصد در مقایسه با طرح اصلی شده‌اند، در حالی که مقادیر UDI روشنایی روز، بهبود قابل توجهی نداشته است [۱۴].

باتا پارچی و همکاران به ارزیابی انرژی و عملکرد حرارتی داخلی یک ساختمان مسکونی بلندمرتبه با نماها و بالکن‌های شیشه‌ای تحت شرایط اقلیمی شمال اروپا، از طریق یک مطالعه پارامتریک پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد ساختمان با بالکن‌های شیشه‌ای نسبت به ساختمان بدون بالکن‌های شیشه‌ای بهتر عمل می‌کند. همچنین، تغییر از شیشه تک‌جلداره به شیشه دوجداره و تغییر نسبت پنجره به دیوار به کاهش مصرف انرژی و گرمای بیش از حد منجر می‌شود [۱۵].

یگانه و قصبان به بررسی ترکیب فضاهای بسته و نیمه‌باز در یک ساختمان اداری میان‌مرتبه با هدف بهبود بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی با استفاده از فضاهای باز در تمامی طبقات و در جهات مختلف پرداختند. در این پژوهش با اختصاص بخشی از مساحت هر طبقه به فضای نیمه‌باز با دو پارامتر متفاوت یعنی فضای نیمه‌باز با بیشترین ارتباط با نما و فضای نیمه‌باز با کمترین ارتباط با نما، چارچوبی برای طراحی و جانمایی بهینه فضای نیمه‌باز در ساختمان‌های اداری ارائه دادند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد حجمی شامل فضاهای بسته و نیمه‌باز با نسبت تخلخل مناسب می‌تواند بهترین عملکرد را داشته باشد. به بیان دیگر، تغییر در تخلخل حجمی به طور قابل توجهی بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارد [۱۶].

در مطالعه‌ای دیگر با عنوان «بهینه‌یابی بالکن شیشه‌ای با پوشش‌های منتخب با توجه به تقاضای گرمایش و آسایش حرارتی در یک ساختمان چندطبقه»، به بررسی بالکن‌های شیشه‌ای در خصوص مصرف انرژی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد ترکیب شیشه با عبوردهی زیاد نور خورشید و عایق حرارتی در بالکن، نقش مؤثری در تبدیل بالکن به یک فضای واسط ایفا می‌کند و می‌تواند راه‌حلی بهینه باشد [۱۷].

بررسی منابع پیشین نشان می‌دهد اگرچه تأثیر بالکن‌ها بر مصرف انرژی، کفایت نور روز و شدت تابش سالیانه خورشید به صورت جداگانه در برخی مطالعات مورد توجه قرار گرفته، اما پژوهش‌هایی که به صورت کمی و هم‌زمان به تحلیل چند متغیر کالبدی بالکن در قالب یک چارچوب اقلیم‌محور و با در نظر گرفتن اهداف عملکردی متضاد بپردازند، بسیار محدود بوده‌اند. اغلب مطالعات موجود یا تنها یک یا دو متغیر ساده نظیر عمق یا وجود سایه‌بان را بررسی کرده‌اند یا فاقد رویکردهای کمی و تحلیلی بوده‌اند. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مانند الگوریتم ژنتیک در طراحی بالکن، به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک تهران، بسیار محدود بوده است. به طور کلی، می‌توان گفت که در مقایسه با مطالعاتی مانند پژوهش یانگ و همکاران که بدون بهره‌گیری از بهینه‌سازی چندهدفه، فقط به تحلیل متغیرهایی مانند عمق بالکن و نسبت بازشو در اقلیم خاص چین پرداخته‌اند و پژوهش لی و همکاران که بر بازسازی و مصالح تمرکز داشته و فاقد تحلیل پارامتریک چندمتغیره است، پژوهش حاضر با بررسی هم‌زمان متغیرهای متنوع کالبدی و تمرکز بر اقلیم گرم و خشک تهران، خلأ روش‌شناختی و محتوایی مهمی را در ادبیات موجود پوشش می‌دهد. همچنین، به خلاف مطالعاتی مانند ساباتل و گروژینسکا که فقط به نوع شیشه و پوشش‌های انتخابی در بالکن‌های شیشه‌ای و تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی پرداخته‌اند، پژوهش حاضر ابعاد، فرم و موقعیت بالکن را به عنوان یک سامانه کالبدی فعال و چندمتغیره، در چارچوبی پارامتریک و اقلیم‌محور تحلیل کرده و از این طریق، عملکرد آن را بر نور روز و تابش مستقیم نیز به صورت دقیق و هم‌زمان ارزیابی می‌کند.

از سوی دیگر، در حالی که برخی مطالعات مانند پژوهش شمس‌الدین فقط به مدل‌سازی‌های مفهومی و کیفی بسنده کرده‌اند، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از محیط پارامتریک راینو/گرسهپار، افزونه لیدی باگ تولز و الگوریتم ژنتیک چندهدفه والاسی، رویکردی عددی، کمی و دقیق را برای تحلیل و بهینه‌سازی هم‌زمان سه شاخص عملکردی شامل مصرف سالیانه انرژی، کفایت نور روز و شدت تابش مستقیم خورشید در فضای داخلی به کار گرفته است. این فرایند به استخراج ترکیب بهینه‌ای از متغیرهای طراحی منجر شده که توازنی میان دریافت تابش مفید زمستانی و کاهش تابش مزاحم تابستانی برقرار می‌سازد. در نتیجه، این پژوهش با تلفیق شبیه‌سازی انرژی و نور روز، بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل کالبدی جامع در اقلیم گرم و خشک،

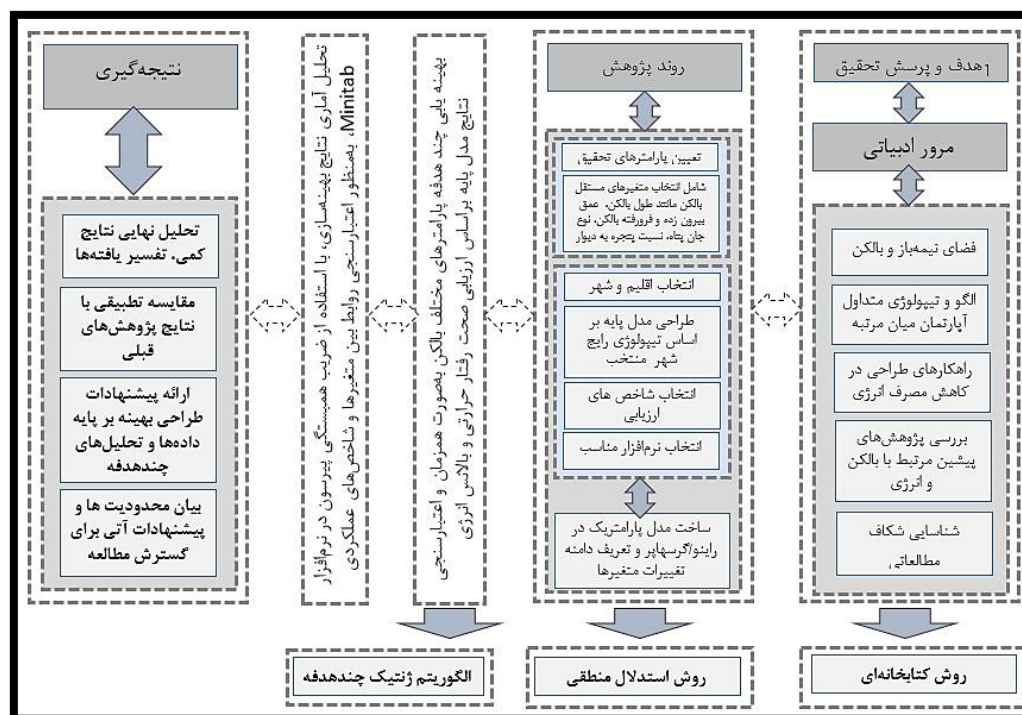
گامی نوآورانه در راستای طراحی علمی و اقلیم‌محور بالکن در آپارتمان‌های میان‌مرتبه برداشته و از منظر روش‌شناسی و کاربرد طراحی، خلأ موجود در ادبیات را به صورت معناداری پوشش می‌دهد. خلاصه مرور پژوهش‌های پیشین در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱. خلاصه مرور ادبیات

ردیف	نویسنده / سال	نوع پژوهش	متغیرهای بررسی شده	شاخص‌های عملکرد	کاستی در مقایسه با پژوهش حاضر
۱	Sabatell et al. (2023)	شبیه‌سازی انرژی	وجود داشتن یا نداشتن شیشه در بالکن، نوع شیشه	مصرف انرژی، آسایش حرارتی، دمای داخلی	بررسی فقط یک نوع خاص بالکن و اقلیم خاص (مدیترانه‌ای خشک)، عدم تحلیل چندمتغیره
۲	Yang et al. (2021)	شبیه‌سازی انرژی + تحلیل چرخه عمر	عمق بالکن، نسبت پنجره به دیوار، نوع فضا، جهت‌گیری	صرفه‌جویی انرژی، سرمایه‌ی، بازده زیست‌محیطی (ROI, AY)	عدم استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه، تمرکز بر اقلیم خاص چین (گرم - مرطوب تابستان/سرد زمستان)
۳	Shamseldin (2023)	مطالعه تحلیلی مفهومی	عمق بالکن، ارتفاع جان‌پناه، پوشش گیاهی، مصالح	مفهومی: آسایش، انرژی، تداوم عملکرد محیطی	فاقد تحلیل کمی و شبیه‌سازی عددی، بدون بررسی اقلیم خاص
۴	Li et al. (2023)	شبیه‌سازی انرژی	عایق حرارتی، نسبت پنجره به دیوار، استفاده از سایبان و در کشویی شیشه‌ای	بهبود مصرف انرژی، آسایش حرارتی، نور روز	تمرکز بر بازسازی ساختمان‌های قدیمی در پکن، فاقد تحلیل پارامتریک چندمتغیره
۵	Yuan et al. (2022)	میدانی + شبیه‌سازی انرژی	فرم بالکن، نوع عایق، ابعاد، نوع بالکن	مصرف انرژی، گرمایشی، دمای داخلی	تمرکز بر شرایط زمستانی در اقلیم گرم، عدم تحلیل نور روز یا بهینه‌سازی چندهدفه
۶	Ji et al. (2024)	بهینه‌سازی چندهدفه	عمق بالکن فرورفته، نسبت پنجره به دیوار	مصرف انرژی، PMV، مقادیر نور روز UDI	تمرکز بر اقلیم سرد (دانشگاه در شمال چین)، بدون سنجش عملکرد در اقلیم گرم‌وخشک
۷	Bhattacharjee et al. (2023)	شبیه‌سازی پارامتریک	نمای شیشه‌ای، نوع شیشه، طراحی بازشوها و بالکن شیشه‌ای	مصرف انرژی، آسایش	تمرکز بر اقلیم‌های سرد نوردیک، بررسی ساختمان‌های بلندمرتبه اداری
۸	Yeganeh & Ghasaban (2024)	مدل‌سازی طراحی حجمی	ترکیب فضای بسته و نیمه‌باز در نما	انرژی، آسایش حرارتی	تمرکز بر ساختمان اداری، فاقد تمرکز خاص بر بالکن و اقلیم گرم مسکونی
۹	Grudzińska (2023)	شبیه‌سازی انرژی	بالکن شیشه‌ای، نوع شیشه (با پوشش انتخابی طیفی)	مصرف انرژی، آسایش حرارتی	تمرکز بر بهینه‌سازی نوع شیشه، بدون تحلیل پارامتریک ابعاد و شکل بالکن

۳. روش تحقیق

این پژوهش از نظر روش‌شناسی، ترکیبی و از نظر هدف، توسعه‌ای - کاربردی است. در مراحل اولیه، از روش کیفی برای انجام مطالعات کتابخانه‌ای و توصیف ویژگی‌های طراحی بالکن استفاده شده است. در ادامه، از روش کمی شامل شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های پارامتریک برای ارزیابی و بهینه‌سازی متغیرهای کالبدی بالکن بهره گرفته شده است. این مرحله شامل شبیه‌سازی انرژی، تحلیل نور روز و بهینه‌سازی چندهدفه بر مبنای متغیرهای طراحی است. در پایان، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مقایسه تطبیقی مدل‌ها و روش‌های آماری تحلیل و تفسیر شده‌اند تا استنتاج نهایی پژوهش بر مبنای استدلالی منطقی و داده‌محور صورت گیرد. هدف اصلی این پژوهش، دستیابی هم‌زمان به کاهش مصرف انرژی، افزایش نور روز و کاهش تابش مستقیم سالیانه خورشید در آپارتمان‌های مسکونی میان‌مرتبه است. به منظور ارتقای شفافیت مراحل انجام پژوهش، شکل ۱، روند گام‌به‌گام از تعریف متغیرها تا تحلیل نهایی را نمایش می‌دهد. این فلوجارت بیانگر جریان منطقی فرایند پژوهش از مرور منابع و طراحی مدل پایه تا بهینه‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل نهایی است.



شکل ۱. فلوچارت گام‌به‌گام روش تحقیق

۳-۱. مشخصات اقلیمی و جغرافیایی

در این پژوهش، یک آپارتمان پنج‌طبقه واقع در منطقه مرکزی شهر تهران به عنوان مدل پایه انتخاب شده است. با توجه به تقسیم‌بندی اقلیمی ایران توسط دکتر گنجی، کشور به چهار گروه اقلیمی اصلی شامل اقلیم گرم و خشک، گرم و مرطوب (ساحلی)، سرد کوهستانی و معتدل و مرطوب تقسیم می‌شود که شهر تهران عمدتاً در دسته اقلیم گرم و خشک قرار می‌گیرد. در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی‌های انرژی و نور روز، از داده‌های اقلیمی ایستگاه فرودگاه مهرآباد تهران (فایل EPW مربوط به منطقه مرکزی شهر) استفاده شده که نماینده شرایط واقعی اقلیمی محل قرارگیری ساختمان نمونه است [۱۸].

شهر تهران تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سردی را تجربه می‌کند. ارتفاع تهران از سطح دریا حدود ۱۴۰۰ متر است و از شمال به کوه‌های البرز و از جنوب به دشت‌های نیمه‌خشک قم و ساوه محدود می‌شود. تهران در طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی قرار دارد. بادهای غالب از سمت غرب می‌وزند و تابش شدید خورشید در بهار و تابستان، به دلیل آسمان صاف و کمبود ابر، همراه با اختلاف دمای قابل توجه میان شب و روز، از ویژگی‌های برجسته اقلیم این شهر است. رطوبت نسبی پایین و وزش بادهای محدود نیز بر شرایط آب‌وهوایی شهر تأثیر گذاشته است. طراحی مناسب بالکن می‌تواند با ایجاد سایه، کاهش تابش مستقیم خورشید و بهبود تهویه طبیعی، نیاز به سرمایش در تابستان را کاهش دهد و در زمستان با کنترل ورود نور خورشید، مصرف انرژی برای گرمایش را بهینه کند [۱۹].

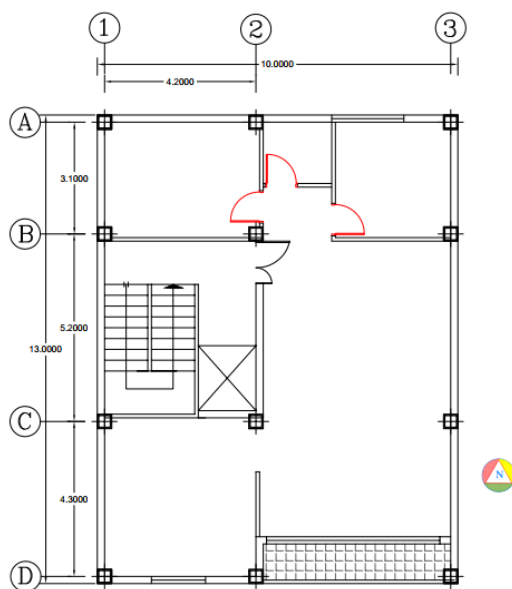
۳-۲. مدل پایه

برای انتخاب مدل پایه، از ترکیب روش‌های نمونه‌گیری هدفمند، تصادفی و خوشه‌ای استفاده شد. در مرحله نخست، مقالات علمی مرتبط با کلیدواژه‌هایی نظیر «آپارتمان مسکونی» و «مصرف انرژی» از پایگاه‌های داده معتبر گردآوری شدند. سپس، بر اساس تیپولوژی‌های شایع در این منابع و داده‌های آماری موجود، یک مدل تیپولوژی ترکیبی طراحی شد. در میان تیپ‌های بررسی‌شده، ساختمان‌های میان‌مرتبه پنج‌طبقه با یک واحد در هر طبقه بیشترین فراوانی را داشتند و به عنوان الگوی پایه انتخاب شدند. برای افزایش انطباق مدل با شرایط واقعی شهر تهران، یافته‌های پژوهش میدانی مهاجر میلانی و عینی‌فر نیز مد نظر قرار گرفت. در این مطالعه، با بررسی ۱۲۸ پلان آپارتمان‌های میان‌مرتبه در پنج منطقه شهری تهران، مشخص شد که شکل رایج

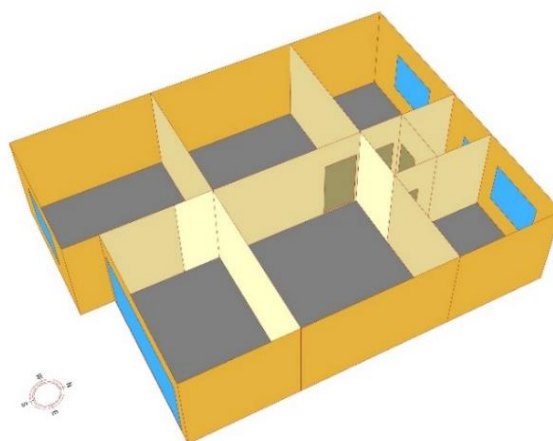
زمین‌ها مستطیل با بر حدود ۱۰ متر بوده، تعداد طبقات معمولاً بین ۴ تا ۶ طبقه و تعداد واحدها در هر طبقه یک یا دو واحد است. واحدها عمدتاً دوخوابه یا سه‌خوابه هستند و بالکن‌ها معمولاً به صورت مستطیل، فرورفته و از سه طرف محصور، در مجاورت فضای پذیرایی، آشپزخانه یا اتاق خواب قرار دارند [۲۰]. این ویژگی‌های تیپولوژی به عنوان الگوی اصلی برای طراحی پلان پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفتند.

همچنین، با توجه به آمارهای مرکز آمار ایران (۱۳۹۵)، میانگین بعد خانوار شهری برابر با سه نفر گزارش شده است. با در نظر گرفتن سرانه فضای بسته حدود ۳۳/۵ مترمربع به ازای هر نفر، زیربنای هر واحد مسکونی معادل ۱۰۵ مترمربع تعیین شد. زمین پروژه دارای ابعاد ۲۲×۱۰ متر و زیربنای هر طبقه برابر با ۱۳۰ مترمربع (۱۰×۱۳) در نظر گرفته شد.

در تصاویر ۲ و ۳، پلان و زون‌بندی واحد پایه نمایش داده شده است. در این مدل، فضاهای عمومی مانند نشیمن و پذیرایی در جبهه جنوبی و اتاق‌های خواب در جبهه شمالی قرار دارند. بالکنی به طول ۵/۵ متر (معادل عرض پذیرایی) و عمق ۱/۲۰ متر در امتداد فضای نشیمن تعبیه شده که طول ۵/۵ متر با هدف حداکثر بهره‌گیری از نور طبیعی، پوشش کامل پنجره اصلی و پیوستگی بصری میان فضای درون و بیرون انتخاب شد و عمق ۱/۲ متر با استناد به مطالعات پیشین (منابع ۲۰-۲۳) به عنوان ابعادی رایج و مؤثر در ارتقای آسایش و بهره‌وری انرژی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. پلان منتخب مدل پایه شکل



شکل ۳. زون‌بندی پلان طبقه سوم

بالکن به صورت فرورفته و با جان‌پناهی به ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متر مطابق مبحث چهارم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است. سطح شفاف مجاور بالکن دارای نسبت پنجره به دیوار ۷۰ درصد با ۵۰ درصد بازشوی عملکردی است. پنجره‌ها از نوع دوجداره انتخاب شده‌اند تا هم نور طبیعی تأمین شود و هم اتلاف انرژی به حداقل برسد. در این پژوهش، طبقه میانی به عنوان مدل مبنا برای شبیه‌سازی انتخاب شده است و سایر طبقات بر اساس آن تحلیل می‌شوند.

۳-۳. انتخاب متغیرها و شاخص‌ها

پس از مطالعه پژوهش‌های پیشین، پنج متغیر اصلی مرتبط با بالکن شامل طول بالکن، عمق بیرون‌زده بالکن، عمق فرورفته بالکن، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار انتخاب شده است. این متغیرها بر اساس بیشترین تأثیر بر مصرف انرژی در پژوهش‌های پیشین در نظر گرفته شدند. همچنین، در راستای محدود کردن ادبیات پژوهش متغیرهایی مانند جهت بالکن، مصالح و فضای مجاور بالکن به عنوان متغیر ثابت و بر اساس بیشترین فراوانی انتخاب شده‌اند. در جدول ۲ دسته‌بندی متغیرها و بازه تغییرات آن‌ها مشخص شده است:

جدول ۲. متغیرهای مستقل

عنوان متغیر	بازه تغییرات گام	تغییرات
طول بالکن (m)	از ۱ متر تا ۵ متر و ۵۰ س	در گام‌های ۰/۵ متری بررسی می‌شود
عمق بیرون‌زده بالکن (m)	از ۰ تا ۳ متر	در گام‌های ۰/۲ متری بررسی می‌شود
عنوان متغیر	بازه تغییرات	گام تغییرات
عمق فرورفته بالکن (m)	از ۰ تا ۲ متر و ۸۰ س	در گام‌های ۰/۴ متری بررسی می‌شود
نوع جان‌پناه	صلب - نرده‌ای	-
نسبت پنجره به دیوار (%)	از ۵۰ تا ۸۰ درصد	در گام‌های ۱۰ درصد

شاخص‌های ارزیابی ابزارهایی برای اندازه‌گیری متغیرهای وابسته در ساختمان‌ها هستند. در جدول ۳ شاخص‌های مورد نظر دسته‌بندی شده‌اند. در این پژوهش در بخش ارزیابی مصرف انرژی ساختمان، از شاخص انرژی اولیه^۱ استفاده می‌شود. این شاخص به مجموع انرژی مصرفی از منابع طبیعی و انرژی مورد نیاز برای استخراج، تولید و انتقال آن اشاره دارد و به بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها کمک می‌کند. از سوی دیگر، در بخش ارزیابی نور روز، از شاخص پویای نور روز، مانند کفایت نور روز^۲ که به ارزیابی نور طی سال و شرایط متغیر آسمان می‌پردازد و تأثیرات اقلیمی را در نظر می‌گیرند استفاده می‌شود [۲۱]. از آنجا که این تحقیق به تأثیرات متغیرهای اقلیمی بر نورگیری فضا طی سال می‌پردازد، انتخاب شاخص‌های پویای نور روز، به‌ویژه کفایت نور روز، برای تحلیل دقیق‌تر شرایط نور روز ضروری است. علاوه بر این، برای کنترل تابش مستقیم خورشید، از شاخص ASE^۳ استفاده شده است که ترکیب این دو شاخص در نهایت نتایج دقیق‌تری در تحلیل نور روز و تابش مستقیم سالیانه خورشید را ارائه می‌دهد [۲۲].

جدول ۳. دسته‌بندی شاخص‌های منتخب

نوع شاخص	واحد	شرح	محدوده مجاز
انرژی اولیه PE	کیلووات ساعت بر مترمربع	میزان انرژی اولیه، سهمی از انرژی که صرف استخراج، تبدیل به حالت‌های دیگر انرژی و انتقال انرژی تا محل مصرف می‌شود را در بر می‌گیرد.	مصرف انرژی اولیه بر اساس ضریب عملکرد برق و گاز: $PE = 3.6 \times (Q_c + E_l) + 1.0 \times Q_h$
کفایت نور روز (sDA)		درصدی از مساحت یک فضا که حداقل در ۵۰ درصد زمان اشغال نور طبیعی بیش از ۳۰۰ لوکس را دریافت کند	$5\% < sDA < 55\%$
میزان تابش مستقیم خورشیدی (ASE)		درصد مساحت فضای داخلی که طی ساعت‌های اشغال‌شده سالانه، بیش از ۲۵۰ ساعت در معرض تابش مستقیم خورشید با شدت بالاتر از ۱۰۰۰ لوکس قرار دارد	$ASE < 10\%$

1. Primary Energy (PE)

2. Spatial Daylight Autonomy (SDA)

3. Annual Sunlight Exposure (ASE)

۳-۴. نرم‌افزار شبیه‌سازی و فرایند شبیه‌سازی و بهینه‌یابی

در این پژوهش، برای طراحی پارامتریک و شبیه‌سازی مدل منتخب نرم‌افزار راینو ۸ و پلاگین گرس‌هاپر 2.0 انتخاب شده و پلاگین‌های لیدی باگ 1.5.0 و هانی‌بی^۱ 1.5.0 نیز برای تحلیل‌های اقلیمی و شبیه‌سازی عملکرد انرژی ساختمان به کار گرفته شده‌اند. این ابزارها با استفاده از موتورهای انرژی پلاس^۲، اپن استودیو^۳ و ریدینس^۴ امکان انجام تحلیل‌های دقیق در زمینه مصرف انرژی، نور روز را فراهم می‌کنند. قابلیت‌های این پلاگین‌ها بر اساس استانداردهای بین‌المللی مانند اشری^۵ 140-2007 اعتبارسنجی می‌شوند و دقت و اعتبار نتایج را تضمین می‌کنند. در بخش ورودی‌های شبیه‌سازی، با توجه به هدف پژوهش و تعریف متغیرهای مستقل، ورودی‌های نرم‌افزار شامل مشخصات مصالح جداره‌ها، برنامه کاربری و زمان‌بندی، مشخصات جداره نور گذر و دمای تنظیم سیستم تأسیسات، به منظور همگرا بودن نتایج با پژوهش‌های پیشین، از مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان استخراج شده و اطلاعات اقلیمی نیز از طریق فایل داده‌های آب‌وهوایی (EPW)^۶ به‌دست‌آمده از سایت کلایمت وان بیلدینگ^۷ وارد نرم‌افزار شده است. برای شبیه‌سازی آپارتمان پنج‌طبقه با واحدهای ۱۰۵ متری و ۳ نفر ساکن در هر واحد، مقاومت حرارتی دیوارها، سقف و کف به ترتیب ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۶۵ و پنجره‌ها دوجداره با ضریب انتقال حرارت ۳/۱ در نظر گرفته شده‌اند؛ و درنهایت متغیرهای پارامتریک بالکن در گرس‌هاپر تعریف و مصرف انرژی با پلاگین هانی‌بی تحلیل می‌شود.

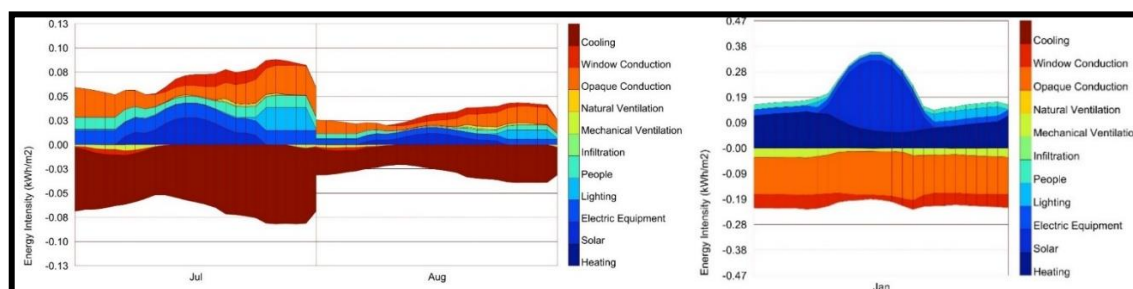
به منظور انجام بهینه‌سازی چندهدفه متغیرهای طراحی بالکن، از افزونه والاسی (نسخه ۲۶) در محیط گرس‌هاپر استفاده می‌شود. اندازه هر نسل برابر با ۳۰ و تعداد کل نسل‌ها ۴۰ در نظر گرفته می‌شود. اگرچه در منابع علمی نسبت معمول بین اندازه جمعیت و تعداد نسل‌ها تقریباً ۱ به ۲ است، اما با توجه به محدودیت‌های زمانی و پردازشی، نسبت متفاوتی (حدود ۱ به ۱/۳ بین اندازه نسل و کل جمعیت) انتخاب می‌شود و جمعیتی به اندازه ۱۲۰۰، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. احتمال ترکیب^۸ (نرخ تلفیق) برابر با ۰/۵ و شاخص‌های توزیع مرتبط با عملیات ترکیب و جهش^۹ هر دو برابر با ۵۰ تعیین می‌شود. روند همگرایی الگوریتم با تحلیل نمودارهای انحراف معیار و میانگین مقادیر توابع هدف رصد شده و پایداری نتایج در نسل‌های پایانی بررسی می‌شود. در پایان، نتایج بهینه‌سازی به صورت عددی و نموداری تحلیل و تفسیر می‌شود.

۳-۵. اعتبارسنجی

۳-۵-۱. اعتبارسنجی مدل پایه

به منظور اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد مدل پایه، فرایند اعتبارسنجی شامل کنترل ورودی‌های شبیه‌سازی، ارزیابی رفتار حرارتی زون‌ها و تحلیل بالانس انرژی اجرا شد. موتور انرژی پلاس که با استاندارد اشری ۱۴۰ اعتبارسنجی شده، از طریق رابط هانی‌بی در محیط راینو/گرس‌هاپر به کار گرفته شد. دمای داخلی فضاها در هفته‌های منتخب فصل‌های گرم و سرد بررسی و با ست پوینت‌ها مقایسه شد؛ نتایج نشان دادند رفتار حرارتی مدل با مقادیر مورد انتظار مطابقت دارد. تحلیل بالانس انرژی و بررسی نقش تهویه طبیعی نیز نشان داد الگوهای انتقال حرارت و مصرف انرژی از منطق فیزیکی برخوردارند. درمجموع، دقت ورودی‌ها، رفتار معقول خروجی‌ها و مطابقت با استانداردهای شبیه‌سازی، اعتبار نتایج مدل پایه را برای تحلیل‌های بعدی تأیید می‌کند. در شکل ۴ نمودار بالانس انرژی در شهر تهران را نشان می‌دهد:

1. Honeybee
2. EnergyPlus
3. OpenStudio
4. Radiance
5. ASHRAE
6. EnergyPlus Weather
7. Climate One Building
8. Crossover
9. Mutation



شکل ۴. بالانس حرارتی در یک هفته سرد سال و یک هفته گرم سال با در نظر گرفتن میانگین ۲۴ ساعت یک روز

۳-۵-۲. اعتبارسنجی نتایج حاصل از بهینه‌یابی

با توجه به ماهیت طراحی محور و سناریومحور این پژوهش که در مراحل ابتدایی طراحی معماری انجام شده است، امکان مقایسه مستقیم نتایج شبیه‌سازی با داده‌های واقعی بهره‌برداری ساختمان وجود ندارد. با این حال، تمامی شبیه‌سازی‌ها در محیط هانی‌بی و با استفاده از موتور انرژی پلاس انجام شده‌اند که پیش‌تر بر اساس استانداردهای بین‌المللی انرژی ۱۴۰ و آزمون بست‌تست اعتبارسنجی شده و در مطالعات معتبر متعدد به کار رفته است. علاوه بر این، نتایج بهینه‌سازی با مقایسه و تطبیق با نتایج پژوهش‌های پیشین (منابع ۲۰ تا ۲۳) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند تا صحت و اعتبار آن‌ها تأیید شود.

۳-۶. چالش‌های شبیه‌سازی

حجم زیاد متغیرها و گستردگی فضای جست‌وجو، بهینه‌سازی را زمان‌بر و پیچیده می‌کند. در این پژوهش، تعداد حالت‌ها از ۵۲۹۲۰۰ آغاز شد که ارزیابی دقیق آن‌ها با روش‌های بروس فورس^۱ یا اگرکرت متد^۲ به دلیل نیاز به بررسی تمامی حالت‌ها، غیرعملی بود و حتی استفاده از الگوریتم ژنتیک نیز حدود ۶ روز زمان نیاز داشت. با تعریف گام‌های تغییرات مناسب در متغیرهای منتخب بالکن، فضای جست‌وجو به ۱۰۲۴۰ حالت و زمان تحلیل به ۲ روز کاهش یافت. در مقایسه با روش‌های دقیق، روش‌های تکاملی با بهره‌گیری از جست‌وجوی هوشمندانه، امکان دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه را در زمان معقول و با منابع پردازشی محدود فراهم می‌سازند و از این‌رو، مزیتی قابل توجه در مسائل با فضای جست‌وجوی وسیع به شمار می‌روند.

۳-۷. تحلیل داده‌ها

تحلیل‌های اولیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل انجام شد که شامل رسم نمودارهای روند تغییرات متغیرهای طراحی بالکن و شاخص‌های عملکردی بود. این نمودارها، مانند نمودارهای پراکندگی و نمودارهای خطی، امکان بررسی بصری روابط و الگوهای تغییرات را فراهم کرده و مقدمات تحلیل‌های آماری دقیق‌تر را فراهم کردند. برای بررسی دقیق‌تر روابط میان متغیرهای طراحی بالکن شامل طول، عمق فرورفتگی و بیرون‌زدگی، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار و شاخص‌های عملکردی مانند مصرف انرژی سالیانه، کفایت نور روز و شدت روشنایی ناشی از تابش مستقیم خورشید، از تحلیل آماری همبستگی پیرسون استفاده شد. این روش ارزیابی حساسیت آماری، میزان و جهت رابطه خطی میان متغیرها را مشخص می‌کند. داده‌های حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از افزونه والاسی در نرم‌افزار مینی تب (نسخه ۲۲.۱) تحلیل شدند. سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) برای بررسی معناداری آماری روابط در نظر گرفته شد. این فرایند به عنوان بخشی مکمل در ارزیابی نتایج، به شفاف‌سازی تأثیر متغیرهای طراحی بر شاخص‌های عملکردی کمک کرده است. درنهایت، تجزیه و تحلیل داده‌ها با تکیه بر مقایسه تطبیقی مدل‌ها و بهره‌گیری از روش‌های آماری، به استنتاج منطقی و مستند از نتایج کمک کرده و نقش مکملی در ارزیابی تأثیر متغیرهای طراحی بر شاخص‌های عملکردی ایفا کرده است.

1. Brute force
2. Exact method

۴. یافته‌های پژوهش

این بخش به یافته‌های به‌دست‌آمده از فرایند شبیه‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای بالکن در مدل پایه می‌پردازد. در این بخش ابتدا، مصرف انرژی اولیه به همراه عملکرد نور روز و میزان تابش مستقیم خورشید در مدل پایه به دست می‌آید. سپس، بهینه‌سازی چندهدفه متغیرهای بالکن با پلاگین والاسی انجام شده و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیر غالب جبهه پارتو در مدل منتخب تعیین می‌شود. در ادامه این راه‌حل‌ها تحلیل و ارزیابی شده و بهترین گزینه‌ها برای بهبود عملکرد انرژی، نور روز و تابش مستقیم خورشید انتخاب می‌شوند. در نهایت، مدل بهینه به‌دست‌آمده از نظر مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته با مدل پایه مقایسه، بررسی و تحلیل می‌شود.

۴-۱. میزان مصرف انرژی نهایی و انرژی اولیه در مدل پایه

نتایج به‌دست‌آمده در خصوص مصرف انرژی مدل پایه، در جدول ۴ ارائه شده است. خروجی مرتبط با انرژی پلاس شامل محاسبه میزان انرژی اولیه با در نظر گرفتن ضریب عملکرد ۳/۶ برای برق و ۱ برای گاز، میزان نور روز و تابش مستقیم سالیانه خورشید است.

جدول ۴. میزان انرژی اولیه با در نظر گرفتن ضریب عملکرد سیستم گرمایشی و سرمایشی و میزان نور روز و خیرگی به تفکیک هر شهر

نام شهر	سرمایش (kWh/m^2)	گرمایش (kWh/m^2)	نور مصنوعی (kWh/m^2)	بازم الکتریکی (kWh/m^2)	انرژی گرم مصرفی (kWh/m^2)	مصرف انرژی کل (kWh/m^2)	انرژی اولیه (kWh/m^2)	نسبت sDA نور روز %	نسبت ASE تابش مستقیم خورشید %
تهران	۱۱	۵۷	۱۱.۹	۲۶.۶۵	۱۹.۱۵	۱۲۵.۷	۲۵۴.۵	۵۴	۴۰

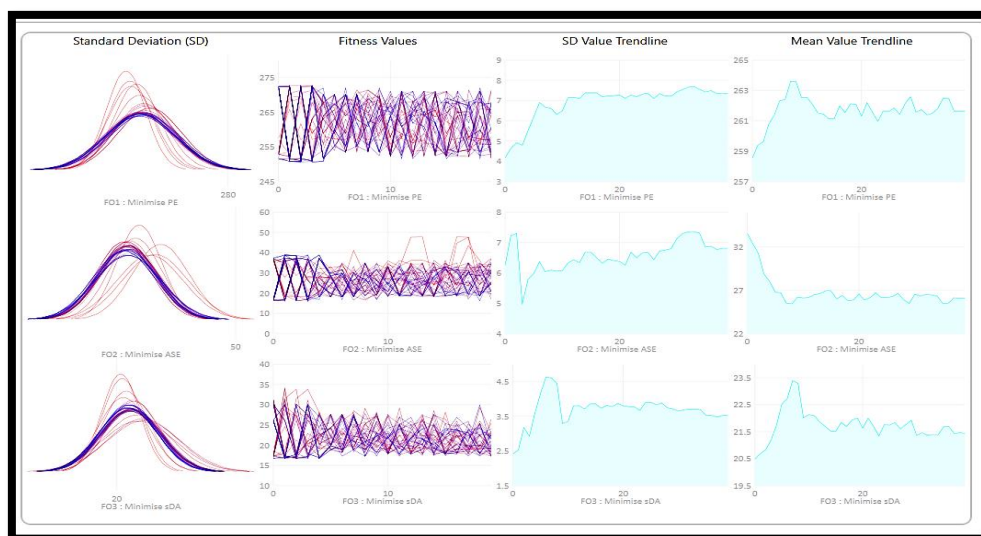
۴-۲. بهینه‌یابی

در طراحی ساختمان‌های انرژی کارا، دستیابی هم‌زمان به کاهش مصرف انرژی، افزایش نور روز و کاهش تابش مستقیم سالیانه خورشید نیازمند رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه است. این پژوهش با استفاده از افزونه والاسی و الگوریتم ژنتیک NSGA-II ، پس از تولید ۴۰ نسل و بیش از ۱۲۰۰ راه‌حل، ۴۹ راه‌حل پارتو را شناسایی کرد که تعادلی میان معیارهای مصرف انرژی، کفایت نور روز و کاهش تابش مستقیم سالیانه خورشید برقرار می‌کنند.

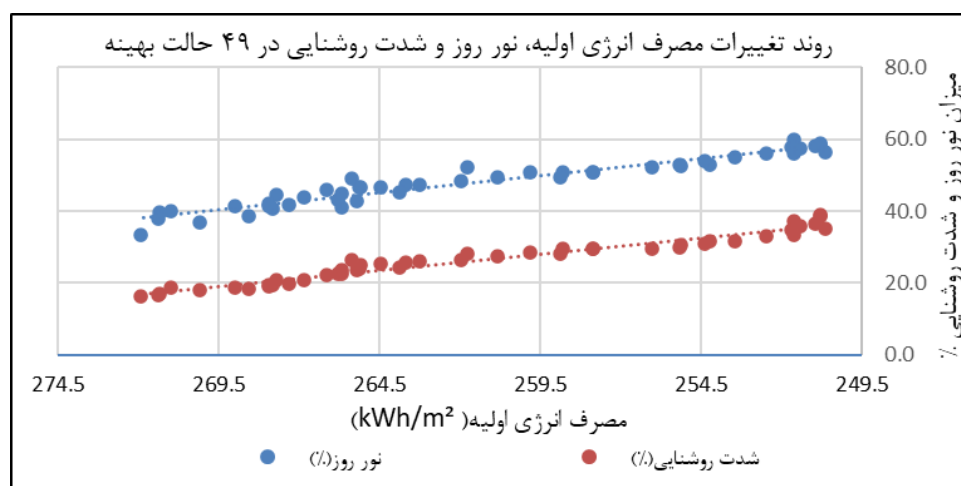
نمودارهای انحراف معیار به‌دست‌آمده از بهینه‌یابی، نشان‌دهنده فرایند همگرایی در الگوریتم بهینه‌سازی است که طی نسل‌های متوالی از پراکندگی گسترده در راه‌حل‌های اولیه (منحنی‌های قرمز) به سمت تمرکز و شناسایی راه‌حل‌های بهینه‌تر (منحنی‌های آبی) پیش می‌رود. در مراحل اولیه، الگوریتم با جست‌وجوی گسترده در فضای طراحی، تنوع راه‌حل‌ها را بررسی می‌کند، اما با افزایش تعداد نسل‌ها و شبیه‌سازی‌ها، مصرف انرژی کاهش، کفایت نور روز افزایش یافته و تابش مستقیم سالیانه خورشید کاهش می‌یابد. پس از حدود ۲۹ نسل، راه‌حل‌ها به یک ناحیه متمرکز و بهینه همگرا می‌شوند که نشان‌دهنده عملکرد بهتری از نظر اهداف مصرف انرژی، نور روز و تابش مستقیم سالیانه نور خورشید است. این روند تکاملی که در شکل ۵ نشان داده شده است بر اهمیت تکرار و بهبود مستمر برای دستیابی به راه‌حل‌های بهینه در مسائل چندهدفه تأکید دارد.

۴-۳. نتایج بهینه‌یابی شهر تهران

بر اساس نتایج حاصل از فرایند بهینه‌یابی، تعداد ۴۹ مدل مختلف از بالکن با تغییر در متغیرهایی نظیر طول، عمق بیرون‌زدگی، عمق فرورفتگی، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار، در اقلیم گرم و خشک شهر تهران به عنوان مدل‌های بهینه معرفی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این تحلیل، عملکرد هر یک از مدل‌ها بر اساس سه شاخص کلیدی شامل مصرف انرژی اولیه (kWh/m^2)، کفایت روشنایی روز و تابش مستقیم سالانه خورشید، با یکدیگر و همچنین، با مدل پایه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۶ روند این تغییرات قابل مشاهده است.



شکل ۵. نمودار انحراف معیار سه تابع هدف و تغییرات مقادیر آن‌ها طی فرایند بهینه‌یابی

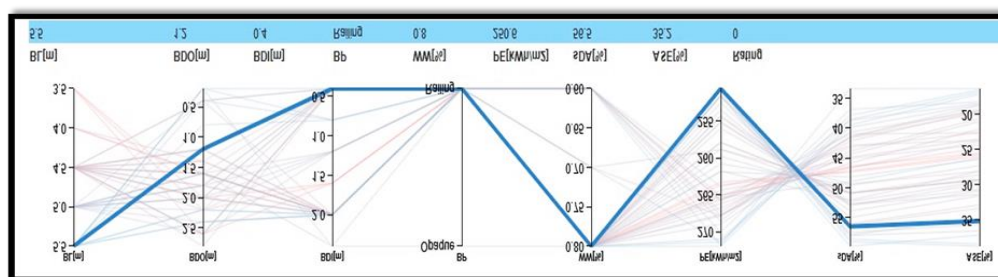


شکل ۶. روند تغییرات مصرف انرژی اولیه، نور روز و شدت روشنایی در ۴۹ حالت بهینه

پس از انجام بهینه‌یابی چندهدفه با پلاگین والاسی از بین ۴۹ نتایج بهینه به‌دست‌آمده ۵ راه‌حل برتر که پایین‌ترین مصرف انرژی، بالاترین میزان نور روز را دارند انتخاب شدند. نتایج جدول ۵ شامل مجموعه‌ای از بهینه‌های به‌دست‌آمده به همراه مقادیر متغیرها است. همچنین، در شکل ۷ روند تغییر متغیرها در مدل بهینه ۱ مشخص شده است.

جدول ۵. راه‌حل‌های غیر غالب منتخب از جبهه پارتو و مقادیر متغیرهای وابسته و مستقل آن

متغیرها	طول بالکن (m)	عمق بیرون زدگی بالکن (m)	عمق فرورفتگی بالکن (m)	نوع جان پناه	نسبت پنجره به دیوار %	مصرف انرژی اولیه PE (kWh/m ²)	میزان نور روز sDA %	میزان تابش مستقیم ASE %	
								راه حل ها	میزان تابش مستقیم ASE %
مدل پایه	۵.۵	۰	۱.۲	صلب	70	۲۵۴.۵	۵۴	۴۰	
مدل بهینه ۱	۵.۵	۱.۲	۰.۴	نرده‌ای	۸۰	250.6	56.۷	35.2	
مدل بهینه ۲	۵.۵	۰.۴	۰.۸	نرده‌ای	۸۰	250.8	58.6	38.5	
مدل بهینه ۳	۵.۵	۰.۲	۰.۸	نرده‌ای	۸۰	250.8	5۹.0	38.8	
مدل بهینه ۴	۵	۰.۴	۰.۴	نرده‌ای	۸۰	251.0	58.0	36.6	
مدل بهینه ۵	۴.۵	۰.۴	۰.۴	نرده‌ای	۸۰	251.4	57.5	35.7	



شکل ۷. روند تغییر مقادیر متغیرها در مدل بهینه ۱

فونتایپ بالکن‌های بهینه همراه با میزان توابع هدف برای مقایسه با مدل پایه در جدول ۶ مشخص شده است:

جدول ۶. مشخصات مجموعه راه‌حل‌های بهینه منتخب

شماره راه‌حل / شماره نسل	PE (kWh/m ²)	sDA%	ASE%	نوع	مدل بالکن
مدل پایه	-	۲۵۴۵	۵۴.۷	۴۰	
مدل بهینه ۱	(۳۸,۲)	۲۵۰۶	۵۶.۷	۳۵.۲	
مدل بهینه ۲	(۳۰,۲)	۲۵۰.۸	۵۸.۶	۳۸.۵	
مدل بهینه ۳	(۲۹,۳)	۲۵۰.۸	۵۸	۳۸.۸	
مدل بهینه ۴	(۲۴,۳)	۲۵۱	۵۸	۳۶.۶	
مدل بهینه ۵	(۱۱,۲)	۲۵۱.۴	۵۷.۵	۳۵.۷	

مدل پایه که شامل بالکنی با طول ۵/۵ متر، بدون بیرون‌زدگی، عمق فرورفتگی ۱/۲ متر، جان‌پناه صلب و نسبت پنجره به دیوار معادل ۷۰ درصد بوده مصرف انرژی اولیه‌ای برابر با ۲۵۴/۵ کیلو وات‌ساعت بر مترمربع، کفایت نور روز معادل ۵۴/۷ درصد و شدت روشنایی سالانه برابر با ۴۰ درصد را ارائه داد. نتایج حاصل از مقایسه این مدل با مدل‌های بهینه‌شده نشان داد بسیاری از پیکربندی‌های بهینه توانسته‌اند به عملکرد به مراتب مطلوب‌تری در هر سه شاخص دست یابند.

مصرف انرژی اولیه در میان ۴۹ مدل بهینه، در بازه‌ای بین ۲۵۰/۶ تا ۲۷۲ کیلو وات‌ساعت بر مترمربع قرار داشت. مدل‌های بهینه ۱ تا ۵، با مصرفی حدود ۲۵۰/۶ تا ۲۵۱/۴ کیلو وات‌ساعت، نسبت به مدل پایه در میزان مصرف انرژی کاهش داشتند. این کاهش عمدتاً به تنظیم بهینه عمق بالکن و نسبت پنجره به دیوار و نوع جان‌پناه به صورت هم‌زمان بازمی‌گردد که تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف انرژی فضای داخلی دارد. این یافته با نتایج پژوهش یانگ و همکاران که کاهش ۶/۷ تا ۱۲/۳ درصدی مصرف انرژی سیستم‌های سرمایشی را گزارش کردند، هم‌راستا است.

از نظر روشنایی طبیعی، مقدار کفایت نور روز در مدل‌های بهینه در بازه‌ای بین ۴۰ درصد تا ۵۹/۸ درصد قرار گرفت؛ عواملی نظیر افزایش نسبت پنجره به دیوار و کاهش عمق فرورفتگی بالکن از جمله عوامل مؤثر در افزایش کفایت نور روز بودند. همچنین، درصد تابش مستقیم سالیانه خورشید در مدل‌های برتر تا ۱۶/۸ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش احتمال بروز خیرگی ناشی از تابش مستقیم، در کنار تأمین نور کافی و مصرف انرژی پایین است. این نتایج مشابه یافته‌های جی و لوچه و همکاران است که تأثیر نسبت پنجره به دیوار و عمق بالکن را بر بهبود نور طبیعی تأیید کرده‌اند. در تحلیل دقیق‌تر تأثیر متغیرهای طراحی، ۴ الگوی اصلی قابل شناسایی است:

✓ عمق بیرون‌زدگی بالکن: افزایش بیش از ۲ متر به کاهش نور طبیعی و افزایش مصرف انرژی منجر شده‌اند. در مقابل، بیرون‌زدگی‌های محدود (۰/۲ تا ۰/۴ متر) تعادل مطلوب‌تری میان نور و انرژی برقرار کرده‌اند. با این‌حال، در برخی مدل‌ها مانند مدل بهینه ۱، بیرون‌زدگی بیشتر (۱/۲ متر) نیز به دلیل کنترل بهتر تابش مستقیم خورشید، عملکرد انرژی مناسبی نشان داده است.

✓ عمق فرورفتگی بالکن: فرورفتگی‌های عمیق‌تر (بیش از ۱/۶ متر) معمولاً به کاهش دریافت نور روز و افزایش بار گرمایشی منجر شده‌اند و مقادیر میانی عمق فرورفتگی بالکن (۰/۴ تا ۰/۸ متر) عملکرد بهینه‌تری داشته‌اند.

✓ نسبت پنجره به دیوار: نسبت‌های بالا حدود ۸۰ درصد، به افزایش کفایت نور روز منجر شدند. با اینکه در برخی موارد افزایش اندکی در مصرف انرژی مشاهده شد، اما در مجموع عملکرد نوری مطلوبی حاصل شده است. کاهش این نسبت، با کاهش شدید نور روز و افزایش مصرف انرژی همراه بوده است.

✓ نوع جان‌پناه: جان‌پناه‌های نرده‌ای در مقایسه با نوع صلب، به طور قابل توجهی باعث بهبود نور طبیعی شدند. این موضوع در عملکرد ضعیف‌تر مدل پایه نیز مشهود است. این یافته مطابق با نتایج پژوهش‌های باقری، نیک‌قدم، اسکندری و ریبرو است که نقش فرم و نوع جان‌پناه را در بهبود عملکرد حرارتی و نوری برجسته کرده‌اند.

در نتیجه، ترکیبی از طول بالکن ۵۵ متر، عمق فرورفتگی میانی (۰/۴ تا ۰/۸ متر)، جان‌پناه نرده‌ای و نسبت بالای پنجره به دیوار (۸۰ درصد) می‌تواند به عنوان پیکربندی مؤثر برای دستیابی به عملکرد بهینه در شاخص‌های انرژی و کفایت نور روز پیشنهاد شود. اگرچه اغلب مدل‌های دارای بیرون‌زدگی محدود (۰/۲ تا ۰/۴ متر) عملکرد بهینه‌ای از خود نشان داده‌اند، اما وجود نمونه‌هایی مانند مدل بهینه ۱ با بیرون‌زدگی ۱/۲ متر و عمق نهایی ۱/۶ متر نشان می‌دهد راهکارهای مؤثر، بسته به ترکیب سایر عوامل طراحی، می‌توانند متنوع باشند. در مقابل، ترکیب‌هایی با بیرون‌زدگی و فرورفتگی زیاد، عمق نهایی بالا، جان‌پناه صلب و درصد پایین بازشو، در تمامی شاخص‌های عملکردی (انرژی، نور روز، تابش مستقیم) عملکرد نامطلوبی داشته‌اند. این روند کلی با نتایج پژوهش ساباتل و همکاران (۲۰۱۷) در اقلیم خشک مدیترانه‌ای که اثر مثبت بالکن را در کاهش مصرف انرژی گزارش کرده‌اند، همسو است.

۴-۴. تحلیل همبستگی بین متغیرهای طراحی و شاخص‌های عملکردی

بر اساس نتایج تحلیل همبستگی پیرسون، عمق فرورفتگی بالکن (BDI) بیشترین همبستگی مثبت را با مصرف انرژی سالیانه ($r = 0.899$) دارد و در عین حال، با کفایت نور روز (sDA) و تابش مستقیم خورشید (ASE) رابطه منفی قوی نشان می‌دهد (به ترتیب $r = -0.810$ و $r = -0.832$). این روابط بیانگر آن است که با افزایش عمق فرورفتگی، میزان نور طبیعی کاهش یافته و در نتیجه وابستگی به منابع نوری مصنوعی افزایش می‌یابد. همچنین، عمق بیرون‌زدگی بالکن (BDO) نیز با مصرف انرژی رابطه مثبت ($r = 0.445$) و با شاخص‌های نوری رابطه منفی متوسط دارد که نشان می‌دهد سایه‌اندازی حاصل از بیرون‌زدگی، گرچه

تابش مستقیم سالانه خورشید را کاهش می‌دهد، اما مصرف انرژی را نیز بالا می‌برد که می‌تواند ناشی از کاهش بهره‌گیری از نور روز باشد.

نسبت پنجره به دیوار (WWR) تأثیر دوسویه‌ای بر شاخص‌های عملکردی دارد؛ به گونه‌ای که افزایش آن باعث کاهش مصرف انرژی ($r = -0.456$) و افزایش کفایت نور روز ($r = 0.593$) و تابش مستقیم ($r = 0.488$) می‌شود. این یافته نشان می‌دهد افزایش بازشو می‌تواند کارایی روشنایی طبیعی را بالا ببرد، اما ممکن است موجب افزایش بروز خیرگی ناشی از تابش مستقیم شود. در مقابل، طول بالکن (BL) همبستگی معناداری با سایر متغیرها نداشته و تأثیر محسوسی بر عملکرد انرژی یا روشنایی طبیعی نشان نداده است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که طراحی دقیق ابعاد کالبدی بالکن می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی هم‌زمان مصرف انرژی، نور روز و کنترل تابش مزاحم ایفا کند. جزئیات کامل ضرایب همبستگی، بازه اطمینان ۹۵ درصد و معناداری آماری در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷. ماتریس همبستگی پیرسان بین متغیرهای طراحی بالکن و شاخص‌های عملکرد انرژی و روشنایی (BL, BDO, BDI, WWR, PE, sDA, ASE)

Correlations

	BL[m]	BDO[m]	BDI[m]	WWR	PE[kWh/m ²]	sDA[%]
BDO[m]	-0.272					
BDI[m]	-0.061	0.054				
WWR	-0.054	-0.223	-0.376			
PE[kWh/m ²]	-0.067	0.445	0.899	-0.456		
sDA[%]	0.042	-0.544	-0.810	0.593	-0.966	
ASE[%]	0.074	-0.528	-0.832	0.488	-0.978	0.979

همچنین در این تحلیل، برای هر زوج متغیر، ضریب همبستگی پیرسون همراه با بازه اطمینان ۹۵ درصد و مقدار P-Value گزارش شده است. ضریب همبستگی مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم و ضریب منفی بیانگر رابطه معکوس میان دو متغیر است. همچنین، مقادیر P-Value کمتر از ۰/۰۵ بیانگر معناداری آماری رابطه و قابلیت اتکای نتایج در سطح اطمینان ۹۵ درصد هستند.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی پارامتریک ویژگی‌های هندسی بالکن در ساختمان‌های مسکونی میان‌مرتبه در اقلیم گرم و خشک تهران، از طریق شبیه‌سازی‌های انرژی و نور روز و بهینه‌سازی چندهدفه انجام شد. نتایج نشان دادند طراحی دقیق مؤلفه‌هایی همچون عمق فرورفتگی، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی سالانه و ارتقای کیفیت روشنایی طبیعی فضای داخلی داشته باشد.

مدل‌های بهینه با عمق فرورفتگی میانی (۰/۴ تا ۰/۸ متر)، جان‌پناه نرده‌ای و نسبت پنجره به دیوار معادل ۸۰ درصد توانستند مصرف انرژی سالانه را تا ۳/۹ kWh/m² نسبت به مدل پایه کاهش دهند. همچنین، در این ترکیب‌ها شاخص کفایت نور روز (sDA) تا ۵۹/۸ درصد افزایش یافت. این یافته‌ها با نتایج پژوهش یانگ و همکاران در چین که کاهش ۶/۷ تا ۱۲/۳ درصدی در مصرف انرژی سرمایشی در نتیجه طراحی بهینه بالکن را گزارش کرده‌اند و نیز مطالعات جی، لوچه و دیگران که بر نقش مؤلفه‌های هندسی بالکن در بهبود نور روز تأکید کرده‌اند، همخوانی دارد.

از سوی دیگر، تحلیل نتایج نشان داد فرورفتگی زیاد همراه با جان‌پناه صلب، تأثیر منفی بر هر دو شاخص مصرف انرژی و روشنایی طبیعی داشته است. این نتیجه نیز با یافته‌های پژوهش‌های باقری، نیک قدم، اسکندری و روبرو هم‌راستا است که به نقش منفی فرم‌های نامناسب بالکن در اقلیم گرم اشاره داشته‌اند. با وجود تفاوت در اقلیم و نوع ساختمان، نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های ساباتل و همکاران در اقلیم خشک مدیترانه‌ای اسپانیا نیز همسوست که بالکن را به عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش انرژی مصرفی معرفی کرده‌اند. در ادامه، جدول تطبیقی یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین ارائه شده است:

جدول ۸. تطبیقی یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات پیشین

مؤلفه/متغیر	یافته پژوهش حاضر (تهران)	مطالعه مرتبط	هم‌راستایی یافته‌ها
عمق فرورفتگی (۰۰۸-۰۰۴ متر)	کاهش مصرف انرژی تا ۳/۹ kWh/m ²	یانگ و همکاران (چین)	طراحی بهینه‌ی بالکن باعث کاهش ۶/۷ - ۱۲/۳ درصد در مصرف انرژی سرمایه‌ی شد.
نسبت پنجره به دیوار (۸۰ درصد)	افزایش کفایت نور روز تا ۵۹/۸ درصد	جی و همکاران (چین)، لوجه و همکاران	نسبت پنجره بالا و عمق مناسب بالکن موجب بهبود نور طبیعی شده است.
جان‌پناه نرده‌ای (باز)	عملکرد بهتر در نور و انرژی نسبت به جان‌پناه صلب	باقری، نیک‌قدم، اسکندری؛ ریبرو	تأکید بر نقش فرم جان‌پناه و باز بودن آن در بهبود تهویه و نور.
فرورفتگی زیاد + جان‌پناه صلب	اثر منفی بر نور روز و مصرف انرژی	همان منابع فوق	تأثیر منفی فرم نامناسب بالکن در اقلیم گرم.
مقایسه اقلیم‌ها	کاهش مصرف انرژی در اقلیم گرم و خشک تهران	ساباتل و همکاران (اسپانیا - اقلیم خشک مدیترانه‌ای)	تأیید اثر مثبت کلی بالکن به عنوان راهکار غیرفعال کاهش مصرف انرژی در اقلیم خشک.
نتیجه‌گیری کلی	بهینه‌سازی عمق بالکن، نوع جان‌پناه و بازشو؛ بهبود عملکرد انرژی در اقلیم گرم	تمام مطالعات اشاره‌شده	همخوانی کلی با روند نتایج مطالعات قبلی در زمینه تأثیر بالکن بر انرژی و نور در اقلیم‌های گرم و معتدل خشک

درمجموع، نتایج پژوهش نشان دادند هیچ ترکیب بهینه‌ای به صورت مطلق در تمامی شاخص‌های عملکردی برتر نیست. برای مثال، مدل با عمق بیرون‌زدگی ۱/۲ متر و عمق فرورفتگی ۰/۴ متر بیشترین کاهش مصرف انرژی را ایجاد می‌کند، اما مدل دیگری با عمق کمتر در شاخص sDA عملکرد بهتری دارد. این موضوع ضرورت رویکرد تعادلی در تصمیم‌گیری طراحی و تطبیق راهکارها با اهداف اولویت‌دار پروژه را برجسته می‌سازد. یافته‌ها همچنین اهمیت نوع جان‌پناه را نشان می‌دهند؛ جان‌پناه نرده‌ای نسبت به نوع صلب، در شاخص‌های انرژی و نور روز عملکرد بهتری دارد. با این حال، اجرای این راهکارها در پروژه‌های واقعی ممکن است با چالش‌هایی مانند الزامات ایمنی یا مقررات شهری (به‌خصوص در طبقات بالا) مواجه شود که نیازمند بررسی‌های بیشتر در مطالعات آتی است.

مزیت اصلی این پژوهش، بهره‌گیری از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه پارامتریک است که امکان ارزیابی هم‌زمان تأثیرات عمق فرورفتگی، نوع جان‌پناه و نسبت پنجره به دیوار بر مصرف انرژی و روشنایی طبیعی را فراهم می‌کند. این رویکرد فراتر از مطالعات تک‌هدفه معمول بوده و به درک تعادل‌های طراحی کمک می‌کند که در عمل می‌تواند بهینه‌ترین عملکرد محیطی را برای ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک تهران و مناطق مشابه به ارمغان آورد. همچنین، مقایسه تطبیقی گسترده با پژوهش‌های معتبر بین‌المللی و تأکید بر کاربردپذیری نتایج در طراحی معماری، ارزش افزوده مهمی برای دانش طراحی اقلیمی و بهبود کیفیت زیست‌محیطی ساختمان‌ها فراهم آورده است.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به تمرکز بر مدل تیپیک آپارتمان در اقلیم خاص تهران، استفاده از مصالح ثابت، عدم بررسی تأثیر متغیرهایی همچون فضای سبز، سایبان‌های متحرک و انعکاس نور محیط و همچنین نبود اعتبارسنجی میدانی اشاره کرد. این موارد دامنه تعمیم‌پذیری نتایج را محدود می‌کنند؛ بنابراین، توصیه می‌شود در تحقیقات آینده دامنه متغیرهای طراحی توسعه یابد و از ابزارهای ترکیبی شامل شبیه‌سازی، تحلیل میدانی و مدل‌های رفتاری کاربران برای تحلیل جامع‌تر عملکرد بالکن استفاده شود.

درنهایت، این پژوهش نشان داد بهره‌گیری از روش‌های تحلیل پارامتریک و بهینه‌سازی چندهدفه در مراحل ابتدایی طراحی معماری می‌تواند به بهبود عملکرد انرژی و روشنایی طبیعی کمک کند و نقشی کلیدی در تحقق اهداف معماری پایدار ایفا کند. تلفیق این رویکرد با تحلیل‌های اجرایی، اقتصادی و زیست‌محیطی، امکان دستیابی به راهکارهایی واقع‌بینانه و قابل اجرا برای ارتقای کیفیت کالبدی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم‌های گرم و خشک را فراهم می‌سازد.

منابع

- [1] Nasrollahi F. Energy-efficient office buildings: architectural design for energy performance. 2015. [In Persian]
- [2] Saqafi M. Forgotten Spaces: Optimization of contemporary urban residential open and semi-open spaces. Isfahan: Jihad Daneshgahi Press; 2021. [In Persian]
- [3] Karimimoshaver M, Sadathosseini M, Aram F, Ahmadi J, Mosavi A. The effect of geometry and location of balconies on single-sided natural ventilation in high-rise buildings. *Energy Rep.* 2023;10:2174–93.
- [4] Ebrahimi Asl H, Kalantar R, Haji Valili A. The balcony element and its climatic efficiency in residential buildings of Tabriz based on Iran's National Building Code. *Environ Sci Technol Q.* 2017;2(19). [In Persian]
- [5] Buys L, Summerville J, Bell L, Kennedy R, editors. Exploring the social impacts of high-density living in a sub-tropical environment. In: *Proceedings of Subtropical Cities 2008 Conference: From fault-lines to sight-lines*; 2008. Brisbane: Centre for Subtropical Design, Queensland University of Technology.
- [6] Bagheri SM, Kordjamshidi M, Pirasteh SH. Evaluation of the effect of verandas in residential buildings on annual energy consumption optimization. 2016. [In Persian]
- [7] Nikghadam N. Typology of semi-open spaces in vernacular houses of Dezful, Bushehr, and Bandar Lengeh in relation to local climate components. *Fine Arts - Archit Urban.* 2014;18(3):69–80. [In Persian]
- [8] Safaei P, Eskandari H. The role of balconies and ventilation in mid-rise housing for energy efficiency (with a prototype design in a hot-humid climate using DesignBuilder software). In: *4th National Conference on Sustainable Architecture and City*; 2018. [In Persian]
- [9] Sabatell-Canales S, Pérez-Carramiñana C, González-Avilés ÁB, Galiano-Garrigós A. Influence of balcony glazing on energy efficiency and thermal comfort of dwellings in a dry Mediterranean climate within a warm semi-arid climate. *Buildings.* 2023;13(7):1741.
- [10] Yang Q, Li N, Chen Y. Energy saving potential and environmental benefit analysis of application of balcony for residence in the hot summer and cold winter area of China. *Sustain Energy Technol Assess.* 2021;43:100972.
- [11] Shamseldin A. Adaptation opportunities for balconies to achieve continuity of their environmental functions. *Alex Eng J.* 2023;67:287–99.
- [12] Li N, Miao X, Geng W, Li Z, Li L. Comprehensive renovation and optimization design of balconies in old residential buildings in Beijing: A study. *Energy Build.* 2023;295:113296.
- [13] Yuan X, Ryu Y, Sekartaji D. Effect of balcony forms difference on indoor thermal environment and energy saving performance of multiple-dwelling house. *Front Energy Res.* 2022;10:891946.
- [14] Ji W, Sun J, Wang H, Yu Q, Liu C. Research on the design of recessed balconies in university dormitories in cold regions based on multi-objective optimization. *Buildings.* 2024;14(5):1446.
- [15] Bhattacharjee S, Lidelöw S, Shadram F. Energy and indoor thermal performance analysis of a glazed façade high-rise building under various Nordic climatic conditions. *Energy Rep.* 2023;10:3039–53.
- [16] Yeganeh M, Ghasaban M. A designerly approach to a novel method for combining closed and semi-open spaces in a mid-rise office building envelope to improve energy efficiency and thermal comfort. *Energy Build.* 2024:114619.
- [17] Grudzińska M. Optimization of balcony's glazed enclosure with spectrally selective coatings regarding heating demand and thermal comfort in a multifamily building. *Int J Energy Environ Eng.* 2023;14(3):257–72.
- [18] Vakilinezhad R, Mofidi Shamirani SM, Mahdizadeh Seraj F. A proposed method for climate zoning of Iran based on natural ventilation potential (case study: Yazd city). *Clim Res J.* 2012;12:13–22. [In Persian]
- [19] Mofidi SM, Majid S, Hosseini Bagher S, Medi. Climatic performance analysis of internal lightwells in office buildings (case study: buildings in Tehran climate zone). *J Iran Archit Urban.* 2010;1(1). [In Persian]

- [20] Mohajer Milani A, Aeinifar A. Recognition of the common internal arrangement of Tehran's residential buildings. Journal of Fine Arts: Architecture & Urban Planning. 2019;24(1):45–56.
- [21] IESVE. Spatial Daylight Autonomy (sDA). 2021 [cited 2025 May 29]. Available from: https://help.iesve.com/ve2021/2_2_4_3_spatial_daylight_autonomy_sda_.htm
- [22] IESVE. Annual Sunlight Exposure (ASE). 2021 [cited 2025 May 29]. Available from: https://help.iesve.com/ve2021/2_2_4_4_annual_sunlight_exposure_ase_.htm