https://doi.org/10.22034/jrenew.2026.239862

سال سیزدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1405، ص ص 104- 112

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 1404/01/30

تاریخ پذیرش: 404/09/19

بهینه‌سازی بازشوهای ساختمان‌های مسکونی برای بهره‌مندی از نور مفید روز و تهویه مطلوب (نمونه مطالعاتی: شهرک مسکونی امید تهران)

نیما تختی[1]، سیدعباس یزدانفر[2] و سعید نوروزیان ملکی[3*]

1- کارشناس‌ارشد، معماری مسکن، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

2- دانشیار، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

3- دانشیار، گروه معماری منظر، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، 1983969411، s_norouzian@sbu.ac.ir

چکیده

براساس آمار رسمی آژانس بین‌المللی انرژی، ساختمان‌ها حدود چهل درصد از انرژی جهان را مصرف می‌کنند. با توجه به بحران‌های انرژی و اثرات مخرب آن بر محیط‌زیست و انسان، پیدا کردن راه‌حل و ایده‌ای نوین برای صرفه‌جویی ساختمان‌ها در مصرف انرژی وظیفه معماران است. به‌منظور ذخیره انرژی برای بهره‌وری مطلوب از نور مفید روز و تهویه، استفاده از راهکارهای غیرفعال برای تنظیم شرایط محیطی داخل ضرورت دارد. از سوی دیگر نور روز در تأمین سلامت ساکنان نیز نقش به‌سزایی دارد. از این رو، با بررسی منابع موجود در زمینه کاهش مصرف انرژی و استخراج شاخص‌ها و سیستم‌های استفاده شده در آن‌ها، روش شبیه‌سازی با پلاگین لیدی‌باگ بر بستر نرم‌افزار گرس‌هاپر انتخاب شد. با بهینه‌سازی نسبت مساحت پنجره به دیوار، نتایج دو عامل روشنایی مفید روز و تهویه ساختمان بهینه‌سازی شد. در فرایند بهینه‌سازی، 100 نسل تولید شد و جواب بهینه در بین نسل‌های تولید شده یافت شد. براساس نتایج، نسبت بهینه مساحت پنجره به دیوار برای نور مفید روز در جبهه شمالی 40 درصد و در جبهه جنوبی 20 درصد تعیین شد و برای بخش تهویه و انرژی ساختمان در جبهه شمالی 15 درصد و برای جبهه جنوبی 40 درصد مشخص گردید.

کلیدواژگان: نور روز، بهینه‌سازی بازشوها، روشنایی مفید روز، سیستم‌های تهویه ساختمان‌های مسکونی

Optimization of openings in residential buildings for using daylight and ventilation (Case study: Omid residential complex, Tehran)

Nima Takhti[1], Seyed-Abbas Yazdanfar[2] and Saeid Norouzian-Maleki[3*]

1. MSc., Department of Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Architecture, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Department of Landscape Architecture, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1983969411 Tehran, Iran, s_norouzian@sbu.ac.ir

Received: 19 April 2025 Accepted: 10 December 2025

Abstract

According to the official statistics of the International Energy Agency, about forty percent of the world's energy is consumed by buildings. Considering the energy crisis and the destructive effects on the environment and humans, finding new solutions and ideas in energy consumption is the duty of today's architects. To save energy for the proper use of useful daylight and ventilation, the implementation of passive solutions to regulate the indoor environment and on the other hand daylight plays a significant role in ensuring the health of residents. Therefore, by examining the available resources in the field of energy consumption reduction and extracting the indicators and systems used in them, the

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

simulation method with the Ladybug tools v1.6 plugin on the Grasshopper software platform was selected. By optimizing the ratio of window to wall area (WWR), the results of two factors of useful day lighting and building ventilation were improved. 100 generations were produced in the optimization process. The optimal solution has been produced among the generations that the optimal ratio of WWR for useful daylight is set at 40% on the north face and 20% on the south face, and 15% on the north face and 40% on the south face for the ventilation and energy sector of the building.

Keywords: Daylight; Optimization of openings; Useful lighting; Residential buildings' ventilation systems

1- مقدمه

بر اساس گزارش منابع انرژی جهانی (۲۰۱۲)، ساختمان‌ها ۴۰٪ از مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص می‌دهند که بخش عمده‌ای از آن به سیستم‌های روشنایی و تهویه مصنوعی مرتبط است. از این رو، بهینه‌سازی بازشوها برای تأمین نور طبیعی و تهویه کارآمد، به‌عنوان یک راهکار غیرفعال می‌تواند تا ۵۰٪ از این مصرف بکاهد [1].

سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی احتمالاً منافع بلندمدت بیشتری برای محیط‌زیست و اقتصاد خواهد داشت. افزایش بهره‌گیری از انرژی خورشیدی موجب کاهش تقاضا برای سوخت‌های فسیلی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود و در نهایت به تحقق نظام انرژی پاک‌تر و پایدارتر در آینده منجر خواهد شد [2]. با وجود اینکه منابع سوخت‌های فسیلی موجود، توان پاسخگویی به انرژی موردنیاز را تا چند دهه آینده خواهند داشت، نباید پیامدهای استفاده غیرمدبرانه از آن‌ها مورد غفلت قرار گیرد. سوخت‌های فسیلی بزرگترین منبع انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند. صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌تواند از روش‌های مختلف انجام شود، اما یکی از موثرترین آن‌ها طراحی مطلوب محیط‌های شهری و ساختمان‌ها بر اساس مقررات و استانداردهای تبیین شده هر منطقه با در نظر گرفتن الگوی مصرف انرژی است؛ به بیان دیگر بهره‌مندی از منابع تجدیدپذیر و پاک گامی اساسی به سوی توسعه پایدار خواهد بود [3].

بخش قابل‌ملاحظه‌ای از مصرف انرژی در بخش ساختمان برای سرمایش، گرمایش و تهویه صورت می‌گیرد؛ از این رو، استفاده از راهکارهای مطلوب به منظور کاهش مصرف انرژی به ویژه در ساختمان‌هایی با استفاده مداوم به حفظ منابع موجود کمک قابل‌توجهی می‌کند [4]. عموماً پذیرفته شده است که بهره‌گیری از نور روز و امکان دید به بیرون، نقش موثری در ارتقای سلامت آسایش و ایجاد محیط کاری سالم برای کاربران ایفا می‌کند؛ بنابراین توجه به این عوامل در طراحی فضاهای داخلی ضروری است. در عین حال، به همان اندازه قابل درک است که کنترل تهویه، کاهش ناراحتی‌های بصری و جلوگیری از پدیده خیرگی برای کاربران فضاهای بهره‌مند از نور روز امری لازم و اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود [5].

نور روز، به دلیل تنوع، شدت و مولفه حرارتی، در صورت عدم‌کنترل می‌تواند مشکلات جدی ایجاد نماید. این شرایط می‌تواند منجر به ایجاد سطوح نامطلوب تابش خیره‌کننده شود. همچنین، ورود بیش از حد یا ناکافی تابش خورشیدی به فضای داخلی ساختمان، نیاز به مصرف قابل‌توجه انرژی برای تأمین سرمایش یا گرمایش را افزایش می‌دهد [6]. به دنبال این مشکلات کاربر فضای مسکونی مجبور به دخالت در تمامی سیستم‌های نور و تهویه می‌شود و می‌تواند با نصب سیستم‌های تهویه گران‌قیمت موجب مصرف انرژی بالای ساختمان شده و یا با مسدودکننده‌های بازشوها، نور طبیعی روز را از دست بدهد و در عمل، هیچ کدام از تفکرات معمار سازنده با وجود نهایی شدن پروژه، قابل استفاده نمی‌شود.

1-1- هدف پژوهش

از اهداف اصلی این پژوهش می‌توان به ارائه معیار و برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی بازشوها به منظور احیای شرایط تهویه طبیعی مطلوب واحد مسکونی در شهر تهران با بهره‌وری از روشنایی مفید روز اشاره کرد. به عبارتی دیگر، هدف از طراحی مجتمع مسکونی با این رویکرد، دستیابی به ابعاد بهینه برای بازشوها، بهبود کیفیت نوردهی در داخل ساختمان و کاهش نیاز به نور مصنوعی است. این هدف می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش داده و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های ساختمان شود. بهینه‌سازی بازشوها نیز می‌تواند شرایط تهویه طبیعی مطلوب را فراهم کند و در جهت کنترل و مدیریت بهتر تابش نور طبیعی و حرارت مستقیم خورشید در داخل فضاهای مسکونی صورت گیرد. بازشوها می‌توانند به‌طور اتوماتیک یا دستی تنظیم شوند تا تعادل مناسبی بین نفوذ نور طبیعی و کاهش اثرات آن مانند افزایش دما و تابش مستقیم خورشید را فراهم کنند. با کنترل دقیق بازشوها و بهینه‌سازی استفاده از نور طبیعی روز، می‌توان مصرف انرژی مرتبط با نور مصنوعی را کاهش داده و در نتیجه بهره‌وری انرژی افزایش یابد تا به محافظت از منابع طبیعی کمک کند.

2- سابقه پژوهشی

نور یکی از اولویت‌های طراحی ساختمان است. نور طبیعی می‌تواند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را کاهش دهد. سطوح زیبایی‌شناختی اساس مفهوم برنامه‌ریزی است، اما برای تحقق بخشیدن به طراحی ساختمان با مصرف انرژی باید به مفهوم استفاده از نور طبیعی توجه شود [7]. بزرگترین چالش در طراحی ساختمان، بهینه‌سازی استفاده از انرژی طبیعی برای تامین آسایش انسان و مصرف انرژی کمتر است [8]. رضایت هم‌زمان از آسایش حرارتی، بصری و تهویه در ساختمان‌ها ممکن است یک کار چالش برانگیز باشد. آسایش حرارتی داخل ساختمان و دسترسی به نور روز دو دغدغه اصلی ساکنان ساختمان است، زیرا حدود 80 تا 90 درصد از زمان را صرف فعالیت‌های داخل ساختمان می‌کنند [9]. بنابراین، یک مصالحه معقول بین آسایش بصری، حرارتی و همچنین مصرف انرژی به موضوع اصلی برای طراحی دیافراگم بهینه انرژی در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، در شهری همانند تهران تبدیل می‌شود [10]. مصرف انرژی در کشور ایران به طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از استانداردهای جهانی بوده و مهم‌ترین دلیل آن، وضعیت نامطلوب ساختمان‌ها از دید مصرف انرژی است. یکی از عناصری که تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی دارد، بازشوها و پنجره‌ها هستند. در هر خانه حدود

یک سوم تلفات حرارتی از پنجره‌ها صورت می‌گیرد. همچنین بیشترین نفوذ هوا و تهویه فضای داخل از طریق پنجره‌ها انجام می‌شود [11].

استفاده از نور طبیعی می‌تواند به حفظ سلامتی، درمان برخی از بیماری‌های پزشکی و کاهش غم و اندوه روانی مربوط به اختلال عاطفی فصلی کمک کند. در مقایسه با نور مصنوعی، نور روز شرایط بهتری را برای دیدن فراهم می‌کند، زیرا دارای تغییرات مداوم در شدت، جهت و ترکیب طیفی است؛ بنابراین، از نظر بیولوژیکی و فیزیولوژیکی پیامدهای مثبتی را برای همه موجودات زنده روی زمین به ارمغان می‌آورد. مزایای بهره‌گیری از نور روز در محیط ساخته شده در برخی از مطالعات مستند شده است [12 و 13]. استفاده بهینه از نور روز و تهویه، وسیله اصلی برای کنترل خطرات بهداشتی ناشی از گرمای زیاد، رطوبت و آلودگی در فضاهای مسکونی شهری است. تهویه طبیعی به کاهش استفاده از انرژی و کربن در فرآیند تهویه مکانیکی کمک می‌کند، اما وجود تراکم بالا در شهرها و گرم شدن کره زمین همچنان یک چالش است. در این زمینه، پژوهش‌های گسترده‌ای توسط پژوهشگران صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، چزاری و همکاران [14] و لیانگ و همکاران [15] با بررسی نسبت مساحت پنجره به دیوار تأثیر استفاده از پنجره‌های عریض‌تر با شیشه‌های مناسب و استراتژی کنترل روشنایی وابسته به نور روز را موردتأکید قرار دادند. بر اساس پژوهش فیاض [16]، ابعاد و جایگاه پنجره‌ها در نما نقش تعیین‌کننده‌ای در موازنه انرژی ساختمان داشته و نسبت‌های نادرست بازشو به دیوار می‌تواند موجب افزایش مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی شود. همچنین در پژوهش او، شبیه‌سازی با نرم‌افزارهایی نظیر انرژی پلاس[1] و اکوتکت[2] به عنوان ابزاری مؤثر برای تحلیل عملکرد انرژی ساختمان و تعیین نسبت بهینه‌ی بازشو به دیوار معرفی شده است.

در پژوهشی دیگر، رزمی و همکاران [17] ابتدا طرح را به صورت پارامتریک به عنوان مطالعه موردی مدل‌سازی کردند. در مرحله بعد، یک مدل مصنوعی ارائه شد که امکان حل مسائل مرتبط با مطالعات موردی پیچیده‌تر و کاربردی در ساختمان‌های چندعملکردی را به‌صورت ساده، یکپارچه و دقیق فراهم می‌سازد. در مرحله سوم نیز، مسئله چندهدفه مطرح‌شده در این پژوهش برطرف شد. همچنین صبری و همکاران [18] با تعریف طرح‌های صفحات خورشیدی، آسایش بصری و مصرف انرژی در محیط‌های بیابانی مسکونی را بررسی کردند. در پژوهشی [19]، راهکارهای بهینه از نظر هزینه و در عین حال حداکثر کارایی انرژی برای طراحی نما، شامل ویژگی‌های پنجره، عایق‌کاری دیوارهای خارجی، نسبت پنجره به دیوار و سایه‌انداز خارجی، با استفاده از شبیه‌سازی‌های انرژی و نور روز در اقلیم سرد تعیین شده است. در پژوهشی دیگر، قدمیان و همکاران [20] دریافتند که با افزایش نسبت مساحت پنجره به دیوار[3]، نیاز به سرمایش افزایش می‌یابد؛ مگر آن‌که سایه‌انداز مناسبی وجود داشته باشد. حماد و همکارش [21] نتیجه گرفتند که بازشوهای جنوبی در اقلیم‌های خشک باید ۲۰±۲٪ باشند تا هم نور کافی فراهم شود و هم از گرمایش غیرضروری جلوگیری شود. در مطالعه‌ای دیگر [22]، با ترکیبی از شبیه‌سازی روشنایی روز، بهینه‌سازی تعاملی و استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مختلف نما به گونه‌ای تنظیم شده است که حداکثر بهره‌وری نوری در فضای داخلی ساختمان حاصل شود. دوی و همکاران [23] به بررسی تأثیر نسبت پنجره به دیوار و ضرایب سایه به‌عنوان استراتژی‌های طراحی غیرفعال برای بهینه‌سازی نور روز در نمای دو پوسته آجری مات پرداختند. در مطالعه‌ای دیگر صیادی و همکاران [24] نسبت بهینه سطح پنجره به دیوار در اقلیم‌های مختلف را با هدف کاهش مصرف کل انرژی سالانه ساختمان از طریق شبیه‌سازی بررسی کردند. همچنین لی و وانگ [25] روشنایی روز را به‌عنوان یک راهبرد طراحی بالقوه برای صرفه‌جویی در انرژی در ساختمان‌ها در نظر گرفتند و با استفاده از نرم‌افزار انرژی‌پلاس نور مفید روز، سایه‌اندازی‌ها و تأثیر آن بر مصرف انرژی را بهینه‌سازی کردند. کارلسن و همکاران [26] در مطالعه‌ای به توسعه استراتژی‌های کنترل سایه‌اندازی پرداختند و با بهینه‌سازی بازشوها نشان دادند که چگونه باید در طراحی ساختمان با سایه‌اندازها برخورد کرد.

بهادری و همکاران [27] توضیح می‌دهند که چگونه نمونه‌های سنتی همراه با بهینه‌سازی از طریق استفاده از منابع بادی تجدیدپذیر برای خنک کردن ساختمان‌ها، تهویه طبیعی و تأسیسات ذخیره‌سازی آب، کاهش قابل‌توجهی در مصرف انرژی ایجاد می‌کنند. محمدی و همکاران [28] مطالعه‌ای با هدف به حداقل رساندن کل ساعات ناراحتی سالانه و افزایش گرمای تابشی خورشید از پنجره‌های خارجی در حین استفاده از تهویه طبیعی، در یک ساختمان مسکونی در آب و هوای گرم و مرطوب انجام دادند که مشخص شد پوسته و پنجره‌های ساختمان نقش مهمی در تبادل گرما، بارهای سرمایشی، تقاضای انرژی و آسایش حرارتی ساکنان دارند. در پژوهشی دیگر، باقری و همکاران [29] نشان دادند که نسبت مساحت پنجره به دیوار، یکی از عوامل اصلی در طراحی ساختمان‌های مسکونی با توجه به مصرف انرژی و آسایش حرارتی است. مطالعه‌های مختلف بر اساس اقلیم و جهت‌گیری نما، توصیه‌هایی برای بهینه‌سازی این نسبت ارائه داده‌اند که به کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌برداری از نور طبیعی کمک می‌کند. آن‌ها دریافتند برای نمای شمالی، بهترین نسبت پنجره بین 26٪ تا 33٪ است و برای نمای جنوبی، بهترین نسبت بین 21٪ تا 25٪ است که مصرف انرژی، پایین‌ترین مقدار در حدود ۲۱۰۲ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال را ایجاد می‌کند. همچنین نشان دادند که بین مصرف انرژی و نسبت پنجره به دیوار در نمای جنوبی همبستگی بسیار قوی معادل ۹۷٪ وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که تغییرات در نسبت پنجره به دیوار تأثیر قابل‌توجهی بر میزان مصرف انرژی دارد. این همبستگی در نماهای شمالی، شرقی و غربی نیز مشاهده شد، اما شدت آن به‌مراتب کمتر گزارش گردید.

در زمینه طراحی بازشوها برای تهویه طبیعی، استانداردهای معتبری همچون استاندارد اشری[4] [30] حداقل نرخ تهویه موردنیاز بر اساس تعداد کاربران و مساحت فضا را تعیین می‌کنند. اگرچه این استاندارد به صورت مستقیم اندازه بهینه بازشوها را مشخص نمی‌کند، اما بر تأمین هوای تازه کافی و کنترل آلاینده‌ها تأکید دارد. در تحقیقی دیگر [31]، با انجام مطالعاتی، مصرف انرژی، تأمین نور روز و آسایش بصری بهینه شده است. همچنین فریور و تیمورتاش [32]، پنج حالت رایج پنجره در دو موقعیت مختلف در دیوار جنوبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پنجره‌های مربع شکل در موقعیت مرکزی دیوار، بالاترین میزان نورگیری طبیعی را ارائه می‌دهند و با

[1] Energy plus
[2] Ecotect Analysis
[3] WWR: Window Wall Ratio
[4] ASHRAE 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality

استانداردهای لید[1] سازگار هستند. پژوهش آن‌ها در سه شهر مشهد، اصفهان و بندرعباس انجام شده است که شرایط اقلیمی متفاوتی دارند و برای تحلیل‌ها از نرم‌افزار گرس‌هاپر[2] و ابزارهای لیدی‌باگ[3] و هانی‌بی[4] استفاده شد. همچنین در مطالعات اخیر، تأثیر سایه‌اندازهای دینامیک بر تعادل نور روز و مصرف انرژی در اقلیم‌های گرم و خشک بررسی شده است. برای مثال، هومایدان و همکاران [33] با شبیه‌سازی نشان دادند که استفاده از سایه‌اندازهای خارجی خودکار می‌توانند مصرف انرژی سرمایشی را تا 32٪ کاهش دهند و نور مفید روز را در بیش از 68٪ ساعات بهره‌برداری حفظ کنند. همچنین، جیانگ و همکاران [34] بر استراتژی‌های فتوولتائیک دینامیک تمرکز کرده و صرفه‌جویی انرژی را تا ۵0٪ گزارش کرده‌اند.

پژوهش حاضر این سوالات را مطرح می‌کند که چگونه تغییر نسبت سطح بازشو به دیوار در جهت‌های مختلف ساختمان‌های مسکونی بر شاخص‌های روشنایی مفید روز و کارایی تهویه طبیعی تأثیر می‌گذارد؟ چه نسبت بهینه‌ای از مساحت پنجره به دیوار می‌تواند تعادلی میان تأمین نور طبیعی مفید روز و عملکرد مطلوب تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی ایجاد کند؟

3- روش تحقیق

با توجه به شرایط فعلی طراحی ساختمان، ارتقای صرفه‌جویی در انرژی عملیاتی برای دستیابی به ساخت و ساز پایدار، بسیار مهم است. از آن‌جایی که روشنایی الکتریکی بین 15 تا 30 درصد از مصرف انرژی عملیاتی در ساختمان‌ها را نشان می‌دهد [35]، استفاده مناسب از نور طبیعی باید رعایت شود [36-38]. تهویه طبیعی و روشنایی روز می‌توانند به‌عنوان استراتژی‌های طراحی غیرفعال موثر برای کاهش مصرف انرژی عمل کنند. پژوهش حاضر با هدف ارائه معیاری برای بهره‌وری از نور طبیعی روز و بهینه‌سازی بازشوها برای شهرک مسکونی امید در شهر تهران انجام شد. هدف این پژوهش، تحلیل و بررسی میزان تاثیرگذاری شاخص نسبت مساحت پنجره به مساحت دیوار بر بهره‌وری از نور مفید روز و همچنین تهویه است. متغیرهای مستقلی که مورد مطالعه قرار گرفت، شامل نوع بازشو و درصد بازشوندگی مؤثر، عمق، نسبت ابعاد و موقعیت هر فضا، ویژگی‌های شیشه و نسبت مساحت پنجره به دیوار است. به همین علت شاخص‌ها و معیارهای دیگر بازشوها مانند نوع شیشه، تناسبات، محل قرارگیری و نحوه توزیع آن در سطح نما، مصالح مختلف و وجود سایبان یا تابش‌بند در ساختمان به‌عنوان عامل مداخله‌گر در روند پژوهش لحاظ شد. در اولین مرحله، تحقیقات موردنظر در شهر تهران انجام شد و تمامی عوامل و معیارهای مؤثر استخراج گردید. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار راینو همهٔ پلان‌ها وارد نرم‌افزار شد و مدل‌سازی سه بعدی با هدف معرفی به پلاگین‌های تحلیل‌گر لیدی‌باگ نسخه 1.6 انجام پذیرفت.

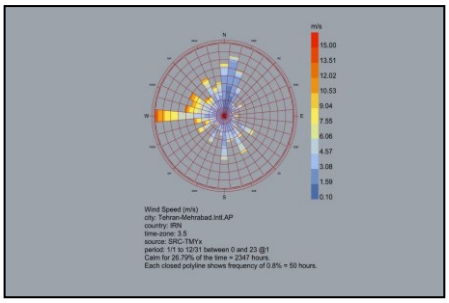
3-1- اقلیم تهران

برای انجام این پژوهش، ابتدا اطلاعات اقلیمی شهر تهران در نرم‌افزار وارد شد. برای شروع تحلیل و شبیه‌سازی وضعیت سالیانه داده‌های آب و هوایی شهر تهران با فرمت ای.پی. دبلیو[5] از پایگاه اطلاعاتی لیدی باگ دریافت شد که مربوط به سال‌های 2009 الی 2023 برگرفته از ایستگاه هواشناسی فرودگاه مهرآباد تهران است.

جدول 1 اطلاعات اقلیمی شهر تهران

ارتفاع از سطح دریا (m)	متوسط حداقل دمای سالانه (°C)	متوسط دمای سالانه (°C)	متوسط حداکثر دمای سالانه (°C)	متوسط رطوبت نسبی سالانه (%)	تابش جهانی سالانه (kWh/m^2)
1191	11.4	17	22.5	41	۲200~1900

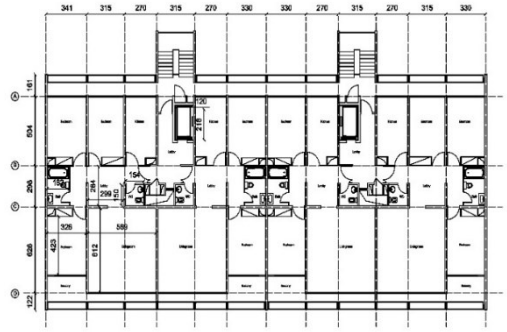
با توجه به بررسی اقلیم تهران، دمای هوا از میانه اردیبهشت تا پایان اردیبهشت گرم است و تنها در ماه‌های فروردین و مهر دارای آسایش حرارتی است. نیاز به گرمایش در این شهر در ماه‌های آبان تا اسفند حس می‌شود.



شکل 1 نمودار سالانه گلباد استان تهران براساس داده‌های آب و هوایی در سال‌های 1402-1388

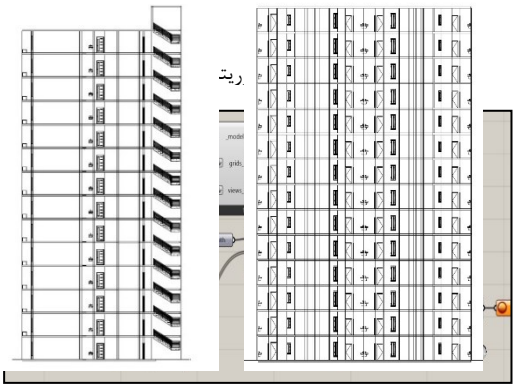
3-2- شهرک مسکونی امید

شهرک امید یکی از شهرک‌های مسکونی در منطقه چهار تهران بوده که در شمال شرقی این شهر در میان جنگل لویزان و بوستان جنگلی یاس واقع شده است. این شهرک شامل ۱۹۴۶ واحد مسکونی در ۱۸ برج و ۵۴ خانه ویلایی است که برج‌های هجده‌گانه آن، چهارده، شانزده و هجده طبقه هستند. از دلایل اصلی انتخاب این شهرک به‌عنوان نمونه مطالعاتی می‌توان به طراحی معماری و عدم تطابق بازشوها با شرایط اقلیمی منطقه اشاره کرد.



[1] LEED: Leadership in Energy and Environmental Design
[2] Grasshopper
[3] Ladybug
[4] Honeybee
[5] EPW: EnergyPlus Weather file

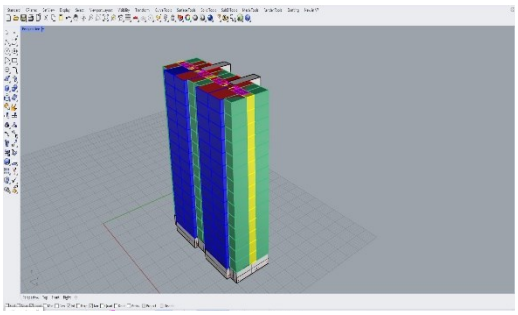
شکل 2 پلان موردمطالعه در شهرک امید



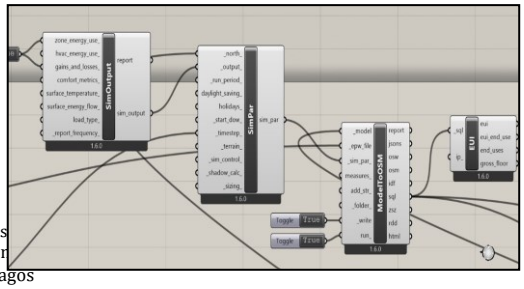
شکل 3 مقاطع از بلوک‌های مسکونی در شهرک مسکونی امید

3-3- فرایند شبیه‌سازی

برای انجام آزمایشات نورگیری و تابش، نیاز به شبکه‌ای از حسگرهاست که بتوانند نور ورودی از بازشوها را تشخیص و مورد بررسی قرار دهند. از این رو، شبکه‌ای از نقاط یک در یک با فاصله استاندارد 80 سانتی‌متری از سطح کف طبقه ایجاد شد و چینش حسگرها در همه فضاهای منتخب کنترل شد. هر چقدر تعداد حسگرها در شبکه بیشتر و فواصل بین آن‌ها نیز کمتر باشد، تحلیل با سرعت پایین‌تر اما با دقت بالاتر انجام می‌شود. از میان خروجی‌های شبیه‌سازی، اطلاعات حاصل از نور مفید روز مدنظر قرار گرفت که بین بازه 100 تا 2000 لوکس است و برای هر حسگر توسط شبیه‌ساز تعیین شد. برای تحلیل نورگیری مفید روز و دست‌یابی به یودی‌آی[1] کلی هر فضای تعریف شده برای شبیه‌ساز، میانگین یودی‌آی برای همه حسگرهای تعریف شده، محاسبه شد. برای شروع بهینه‌سازی نتایج تحلیل موتور رادیانس[2] از ابزار گالاپاگوس[3] در نرم‌افزار راینو[4] مورداستفاده قرار گرفت.



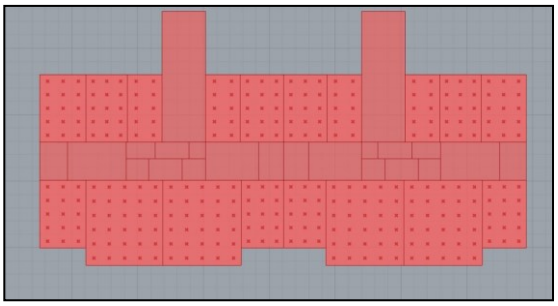
شکل 4 مدل‌سازی بلوک شهرک مسکونی امید در نرم‌افزار راینو



[1] UDI: Us
[2] Radian
[3] Galapagos

شکل 6 بخشی از الگوریتم اصلی در شبیه‌سازی برای نور مفید روز

در ادامه برای انجام آزمایش‌ها و بهینه‌سازی تهویه ساختمان، از الگوریتمی که پیش‌تر برای نورگیری ایجاد شده بود، برای معرفی فضاها به پلاگین لیدی‌باگ استفاده شد. پارامترهای فشار هوا و مصالح مصرفی در ساختمان به‌عنوان عامل مداخله‌گر در روند پژوهش در نظر گرفته شدند. با تعریف جریان طبیعی هوا بر سطح ساختمان و تعیین پارامترهای مدنظر از جمله دمای حداکثر و حداقل برای داخل و خارج ساختمان به شبیه‌ساز، ابتدا مدل تعریف شده در هانی‌بی به مدل اپن استودیو[5] تبدیل گردید. همانند بخش‌های قبل، از فایل ای.پی.دبلیو که از پایگاه اطلاعاتی دریافت شده بود، استفاده شد. دستورات اعمال‌شده در فرایند تحلیل، در قسمت خروجی‌ها تأثیر مستقیم دارند. شبیه‌ساز به بررسی و تحلیل نسبت مساحت پنجره به دیوار برای عامل تهویه ساختمان پرداخت. برای سنجش عامل تهویه، از رصد انرژی یعنی سرمایش و گرمایش هر فضا و میزان انرژی لازم برای هر فضایی که به شبیه‌ساز معرفی شده بود، استفاده شد.



شکل 7 شبکه‌بندی نقاط حسگر برای فرایند نورگیری

4- نتایج و بحث

4-1- سطح بهینه پنجره در تهران برای عامل نورگیری

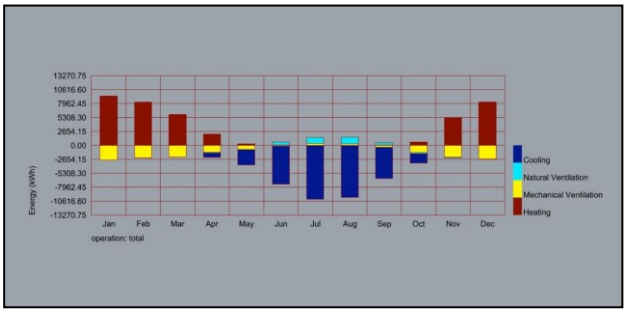
مجموعه عملیات بهینه‌سازی برای متغیر مستقل نسبت مساحت پنجره به دیوار برای مدل معرفی‌شده انجام پذیرفت. در این فرایند، برای هر یک از آن‌ها، 50 نسل تولید شد و همچنین جواب بهینه در بین نسل‌ها پیدا شد. با توجه به روند همگرایی نمودار بهینه‌ساز، از اعتبار نتیجه اطمینان حاصل و پاسخ بهینه مشخص شد. براساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی، سطح زیر خط همگرایی

[4] Rhinoceros
[5] Open Studio

مربوط به نسل‌هایی است که نتایج آن‌ها پایین‌تر از حد مطلوب و سطح بالای نمودار همگرایی مربوط به نسل‌هایی است که نتایج آن‌ها بالاتر از حد مطلوب قرار دارد. در پاسخ بهینه برای بخش نورگیری نسبت مساحت پنجره به دیوار در جبهه جنوبی 20 درصد و در جبهه شمالی 40 درصد مشخص شد. در اقلیم تهران، جبهه جنوبی با تابش مستقیم و شدید خورشید، به‌ویژه در فصل تابستان، مواجه است. این امر سبب می‌شود که حتی با نسبت مساحت پنجره به دیوار پایین (حدود 20٪)، نور طبیعی کافی به داخل ساختمان وارد شود. تابش مستقیم خورشید، در صورت استفاده از نسبت مساحت پنجره به دیوار بالا، می‌تواند موجب گرم شدن بیش از حد فضا شده و نیاز به سیستم‌های سرمایشی افزایش یابد. نیاز به نسبت مساحت پنجره به دیوار بالاتر (حدود 40٪) در جبهه شمالی به این دلیل است که جبهه شمالی فاقد تابش مستقیم خورشید است و تنها نور پراکنده و کم‌شدت از آسمان وارد ساختمان می‌شود. این شرایط باعث می‌شود که به منظور تأمین حداقل روشنایی مورد نیاز (بین 200 تا 300 لوکس) برای فضاهای داخلی، استفاده از نسبت مساحت پنجره به دیوار بالاتر ضروری باشد.

4-2- سطح بهینه پنجره در تهران برای عامل تهویه

برای بخش تهویه نیز عملیات بهینه‌سازی برای متغیر مدنظر انجام شد و براساس نتایج به دست آمده، پاسخ بهینه نسبت مساحت پنجره به دیوار برای جبهه جنوبی 40 درصد و برای جبهه شمالی 15 درصد مشخص گردید. به دلیل نور مزاحم غرب، هیچ معیار سنجشی برای نسبت مساحت پنجره به دیوار در جبهه غربی مشخص نگردید و در نتیجه پنجره‌ای نیز در جبهه غربی طراحی نشد. در جبهه جنوبی، بازشوهای بزرگتر (حدود 40٪) برای تهویه طبیعی ضروری است. این میزان بازشو به دلیل جریان هوای گرم صعودی در تابستان و نیاز به تخلیه سریع‌تر هوای گرم ایجاد می‌شود. همچنین، اختلاف دمای ایجاد شده میان جبهه‌های مختلف ساختمان، اثر مکشی ایجاد کرده که به بهبود جریان هوا و تهویه کمک می‌کند. در جبهه شمالی، با توجه به جهت مخالف بادهای غالب در تهران (غرب-شمال غرب)، بازشوهای کوچک‌تر (حدود 15٪) برای جلوگیری از اتلاف حرارت در فصل زمستان و کاهش نفوذ هوای سرد از شمال پیشنهاد می‌شود. این اقدام همچنین به حفظ دمای مطلوب در فضای داخلی در فصل‌های سرد کمک خواهد کرد.



شکل 8 نمودار تعادل انرژی بر حسب کیلووات ساعت

نمودار انرژی تعادل چهار نوع مصرف انرژی را در طول یک سال نشان می‌دهد:

1- خنک‌سازی (آبی تیره): مربوط به مصرف انرژی برای خنک‌سازی است که عمدتاً در ماه‌های گرم‌تر سال (ژوئن تا سپتامبر) رخ می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین مصرف خنک‌سازی در ماه‌های جولای و آگوست اتفاق می‌افتد که طبیعی است، زیرا این ماه‌ها معمولاً گرم‌ترین ماه‌ها هستند.

2- تهویه طبیعی (زرد): تهویه طبیعی در طول سال تقریباً ثابت است، اگرچه در برخی ماه‌ها مانند ژانویه و دسامبر کمتر است. تهویه طبیعی به معنی استفاده از جریان هوای طبیعی به جای سیستم‌های مکانیکی برای تهویه است.

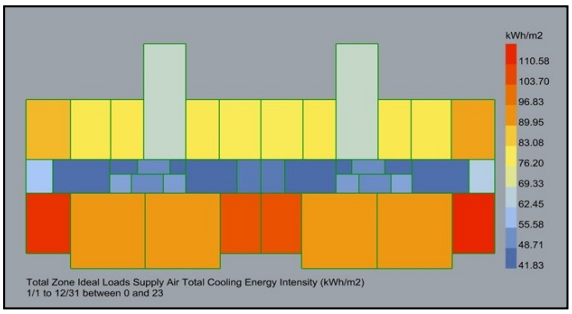
3- تهویه مکانیکی (آبی روشن): این مصرف انرژی نیز در ماه‌های گرم مانند جولای و آگوست مشاهده می‌شود، اما میزان آن نسبت به خنک‌سازی کم‌تر است.

4- گرمایش (قرمز): گرمایش بیشترین مصرف انرژی را در ماه‌های سردتر (مانند ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر) دارد. این مسئله معمول است، چرا که در این ماه‌ها نیاز به گرمایش بیشتر احساس می‌شود.

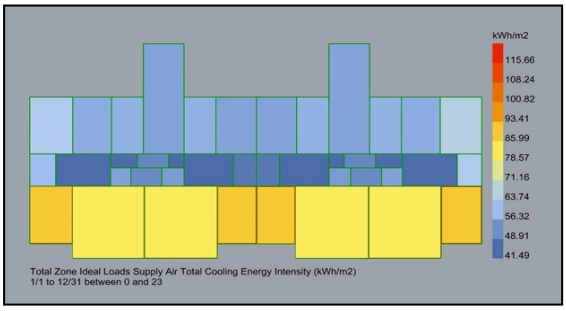
محدوده زمانی و بحرانی آزمون بیانگر این است که:

- ماه‌های زمستانی (ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر) بیشترین مصرف انرژی را برای گرمایش دارند.
- ماه‌های تابستانی (ژوئن تا آگوست) عمدتاً برای خنک‌سازی انرژی مصرف می‌شود.
- مصرف انرژی برای تهویه طبیعی و مکانیکی در طول سال کم و نسبتاً ثابت است.
- در ماه‌های بهاری و پاییزی (مارس، آوریل، سپتامبر و اکتبر) مصرف انرژی در پایین‌ترین سطح قرار دارد، زیرا نیاز کمتری به گرمایش و خنک‌سازی وجود دارد.

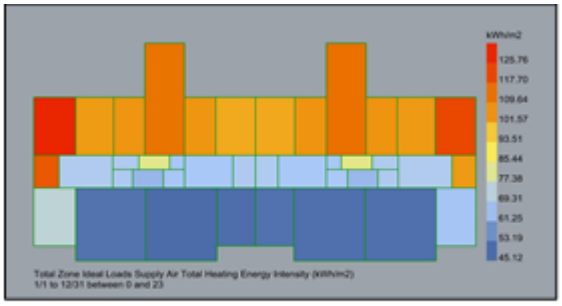
شکل 8 نشان‌دهنده تغییرات فصلی در مصرف انرژی ساختمان برای تنظیم دما است.



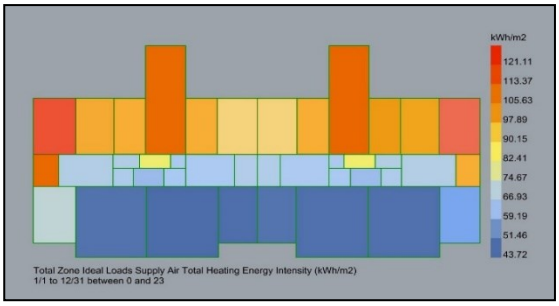
شکل 9 نمودار فرایند سرمایش قبل از بهینه‌سازی



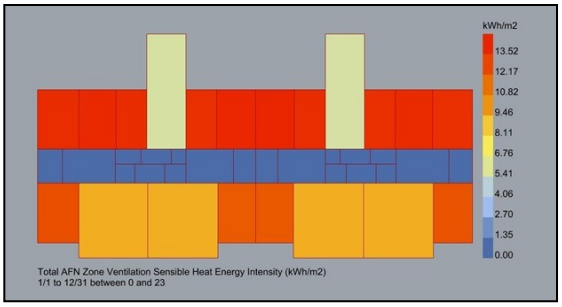
شکل 10 نمودار فرایند سرمایش بعد از بهینه‌سازی



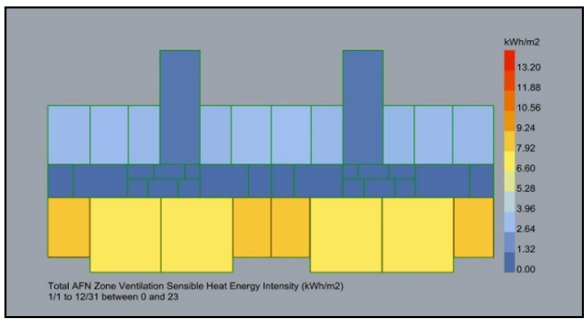
شکل 11 نمودار فرایند گرمایش قبل از بهینه‌سازی



شکل 12 نمودار فرایند گرمایش بعد از بهینه‌سازی



شکل 13 نمودار تاثیر فرایند تهویه قبل از بهینه‌سازی



شکل 14 نمودار تاثیر فرایند تهویه بعد از بهینه‌سازی

با توجه به نمودارهای ارائه شده توسط شبیه‌ساز، مشاهده می‌شود نیاز به سرمایش که عموماً در زمان‌های گرم سال حس می‌شود، به دلیل بهینه شدن بازشوها کاهش یافته است. در عین حال، در فرایند گرمایش که در فصول سرد موردنیاز است همچنان نیاز به انرژی گرمایی مشاهده می‌شود و براساس نتایج، فرایند تهویه طبیعی پس از بهینه‌سازی بازشوها به بهترین شکل نسبت به قبل از بهینه‌سازی صورت گرفته است.

5- نتیجه‌گیری

اصلی‌ترین هدف پژوهش حاضر، ارائه معیاری برای بهره‌وری از نور طبیعی روز و بهینه‌سازی بازشوها برای شهرک مسکونی امید تهران بوده است. در این راستا، با مرور نظام‌مند منابع و مطالعات پیشین، دو عامل کلیدی نورگیری و تهویه طبیعی به‌عنوان مؤلفه‌های مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. عامل بازشوها و نسبت مساحت پنجره به دیوار، پس از مطالعه مرور ادبیات و شناسایی همه مؤلفه‌ها بر اساس فراوانی انتخاب گردید. بازشوها به‌عنوان یک عامل اصلی برای ورود نور و تهویه فضای داخلی در نظر گرفته شدند. در مرحله بعد، انواع روش‌های انجام آزمایش شناسایی و عامل‌های بررسی شده در خصوص بازشوها، مورد تحلیل قرار گرفتند که از بین آن‌ها، روش مدل‌سازی حجم در نرم‌افزار راینو و گرس‌هاپر به‌عنوان بستر اصلی انتخاب گردید. از پلاگین‌های آزمایش نور روز و تهویه، لیدی‌باگ نسخه 1.6 با موتور رادیانس و اوپن استودیو و ابزار بهینه‌ساز بر مبنای الگوریتم ژنتیک استفاده شد. برای بهینه‌سازی نورگیری، شاخص نور مفید روز در نظرگرفته شد و برای بهینه‌سازی بخش تهویه نیز مجموع انرژی صرف شده در بخش سرمایش و گرمایش مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. پاسخ بهینه برای بخش نورگیری در جبهه جنوبی 20 درصد و در جبهه شمالی 40 درصد مشخص شد. همچنین در بخش تهویه، برای جبهه جنوبی 40 درصد و برای جبهه شمالی 15 درصد تعیین گردید. یافته‌های پژوهش حاضر به تفصیل با مطالعات مشابه مقایسه شد تا جایگاه آن در دانش موجود مشخص گردد.

الف) تحلیل مقایسه‌ای یافته‌های نورگیری:

جبهه جنوبی (نسبت مساحت پنجره به دیوار 20 درصد)

یافته‌های پژوهش حاضر در خصوص جبهه جنوبی، با نتایج مطالعات مختلف هم‌راستا است. مطالعات [20] و [22] برای اقلیم‌های گرم نیز پیشنهاد کرده‌اند که نسبت سطح بازشوها باید بین 15 تا 25 درصد باشد. همچنین، پژوهش [21] نیز بازه مشابهی (18-22٪) را برای نسبت مساحت پنجره به دیوار جبهه جنوبی گزارش کرده است. این نتایج بیان می‌کنند که جبهه جنوبی، به‌طور کلی، نیاز به بازشوهایی با درصد متوسط برای تامین نور طبیعی دارد. در مقابل، مطالعه لی و وانگ [25] که در هنگ‌کنگ انجام شده، نشان‌دهنده توصیه‌هایی با نسبت مساحت پنجره به دیوار بالاتر (30٪) است. این تفاوت به نوع کاربری ساختمان (مسکونی در مقابل اداری) مربوط می‌شود که در اقلیم‌های گرم و مرطوب، نیاز به سطح بازشو بیشتری برای بهره‌برداری از نور طبیعی و تهویه است.

جبهه شمالی (نسبت مساحت پنجره به دیوار 40 درصد)

نتایج به‌دست‌آمده در جبهه شمالی نیز با مطالعات پیشین هماهنگ است. در این زمینه، کارلسن و همکاران [26] در نروژ به نیاز به نسبت مساحت پنجره به دیوار بالاتر در جبهه‌های کم‌نور اشاره کرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های [19] و [23] نیز میزان مشابهی در حدود 40 درصد برای نسبت مساحت پنجره به دیوار جبهه شمالی یافته‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که جبهه شمالی نیاز به بازشوهای بزرگتر برای تأمین نور طبیعی دارد. در مقابل، برای اقلیم‌های سرد با آسمان غالباً ابری پیشنهاد شده است که درصد بازشوها می‌تواند به 50 درصد برسد [31]. این تفاوت نشان‌دهنده اهمیت تأثیر شرایط اقلیمی مختلف بر نسبت مساحت پنجره به دیوار است.

ب) تحلیل مقایسه‌ای یافته‌های تهویه

جبهه جنوبی (نسبت مساحت پنجره به دیوار 40 درصد)

در خصوص تهویه طبیعی، نتایج پژوهش حاضر مشابه با استاندارد اشری است که بازشوهای بزرگتر در جبهه‌های آفتاب‌گیر را توصیه می‌کند. همچنین این یافته‌ها مشابه با مطالعه فیاض [16] است که بیان می‌کند بازشوهای بزرگ‌تر تا حدود ۳۰–۴۰٪ می‌توانند به شرط استفاده از شیشه‌های با کنترل تابش[1] با جذب تابش زمستانی، بهره‌وری انرژی را بهبود دهند و در عین حال مشابه با پژوهش [27] است که پیشنهاد می‌کنند برای تهویه طبیعی جبهه جنوبی، نسبت مساحت پنجره به دیوار باید در حدود 38 درصد باشد؛ اما از طرفی، محمدی و همکاران [28] توصیه کرده‌اند که نسبت مساحت پنجره به دیوار کمتری (25-30٪) برای تهویه طبیعی کافی است. این تفاوت نشان‌دهنده تاثیرات خاص اقلیمی بر نیاز به تهویه طبیعی در جبهه‌های آفتاب‌گیر است.

جبهه شمالی (نسبت مساحت پنجره به دیوار 15 درصد)

در جبهه شمالی، مطابقت یافته‌های پژوهش حاضر با مطالعات قبلی همچون پژوهش باقری و همکاران [29] مشابهت دارد که نشان داده‌اند کاهش بازشوها در جبهه شمالی می‌تواند به صرفه‌جویی انرژی منجر شود. همچنین، مطالعه [24] نیز نشان داده است که نسبت بهینه‌ی پنجره به دیوار بسته به اقلیم و جهت متفاوت است و برای جهت‌های شمالی معمولاً حدود 20 الی 33 درصد بهینه است؛ افزایش بیش از این محدوده معمولاً منجر به افزایش مصرف انرژی کل می‌شود. همچنین یافته‌های پژوهش [16] نشان می‌دهد که در جهت‌های با تابش کمتر مانند شمال، افزایش نسبت سطح پنجره به دیوار بیش از حد بهینه ۱۵–۲۰٪ موجب اتلاف حرارت و افزایش مصرف انرژی می‌شود؛ ازاین‌رو توصیه می‌شود بازشوهای این جبهه با سطحی محدود و عایق مناسب طراحی شوند. این نکته مهم نشان می‌دهد که برای جبهه‌های شمالی که کمتر در معرض نور خورشید قرار دارند، استفاده از بازشوهای کوچک‌تر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی کمک کند.

ج) نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود که نسبت بهینه مساحت پنجره به دیوار در جبهه‌های شمالی و جنوبی برای دو معیار روشنایی مفید روز و مصرف انرژی تهویه متفاوت است. این تفاوت نشان‌دهنده تضاد عملکردی بین دو هدف کلیدی در طراحی پایدار است. افزایش نور روز نیازمند بازشوهای بزرگ‌تر است، در حالی که بهینه‌سازی انرژی تهویه در جبهه شمالی با کاهش نفوذ حرارتی و در جبهه جنوبی با بهره‌برداری از تهویه متقاطع و سایه طبیعی به‌دست می‌آید؛ بنابراین، انتخاب یک مقدار ثابت برای نسبت مساحت پنجره به دیوار در هر جبهه نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان هر دو هدف را برآورده کند. برای رفع این چالش، رویکرد طراحی انعطاف‌پذیر[2] پیشنهاد می‌شود که در آن نسبت مساحت پنجره به دیوار پایه در جبهه شمالی 25٪ و در جبهه جنوبی 30٪ (به‌عنوان میانگین وزنی دو هدف) تعیین شود و سیستم‌های سایه‌انداز پویا مانند سایه‌اندازهای متحرک افقی یا عمودی و شیشه‌های الکتروکرومیک و پرده‌های داخلی هوشمند به‌عنوان لایه‌های کنترلی فعال، در طول سال و ساعات مختلف، عملکرد سیستم را به سمت هدف بهینه نور یا انرژی هدایت کنند. مطالعات مشابه نشان داده‌اند که استفاده از سایه‌اندازهای دینامیک می‌تواند تعادل مناسبی بین این دو هدف ایجاد کند؛ پژوهش‌های مشابه [32] بیان می‌کنند که در اقلیم‌های گرم و خشک، سایه‌اندازهای خارجی خودکار می‌توانند مصرف انرژی سرمایش را تا 32٪ کاهش دهند، در حالی که نور مفید روز مناسب (۳۰۰۰-۳۰۰۰ لوکس) را در بیش از 68٪ ساعات استفاده حفظ کنند. همچنین مطالعه [33]، با استراتژی‌های ترکیبی سایه‌اندازهای فتوولتائیک دینامیک[3] صرفه‌جویی انرژی تا 50٪ را با بهبود نور مفید روز سالانه تا 3٪ به همراه داشته است و براساس تحقیقات پیشین [16]، به‌کارگیری شیشه‌های دوجداره و پنجره‌های با ضریب انتقال حرارتی پایین[4] باعث کاهش محسوس بار انرژی سالانه در مقایسه با پنجره‌های معمولی می‌شود.

یکی از برجسته‌ترین ویژگی‌های پژوهش حاضر، استفاده از روش‌های ترکیبی در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی است. این پژوهش با استفاده هم‌زمان از سه موتور شبیه‌سازی رادیانس، انرژی پلاس و اوپن استودیو، به تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تری پرداخته است. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه در این پژوهش، یک گام مهم برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تر در زمینه طراحی ساختمان‌های پایدار است. تحلیل حساسیت پارامترهای اقلیمی نیز باعث افزایش دقت و اعتبار نتایج شده است.

در این پژوهش، مقادیر مجزا برای هر جبهه (جنوبی و شمالی) در ارتباط با نورگیری و تهویه ارائه شده است. این تفکیک‌سازی به طراحان کمک می‌کند تا بر اساس نیازهای خاص هر جبهه، طراحی بهینه‌تری برای ساختمان‌های مسکونی انجام دهند. همچنین، این پژوهش به‌طور هم‌زمان به تحلیل عملکرد تابستانی و زمستانی پرداخته است که این نکته به‌ویژه در طراحی ساختمان‌ها در اقلیم‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور کلی، این پژوهش نه‌تنها بر اساس معیارهای نور و تهویه به بهینه‌سازی پرداخته، بلکه سهم هر یک از این عوامل را در فرآیند طراحی بیان کرده است. این نوآوری‌ها باعث می‌شود که نتایج حاصل از این پژوهش برای طراحان و معماران در اقلیم‌های مختلف به‌ویژه در مناطق با تغییرات اقلیمی متفاوت، قابل استفاده باشد.

د) پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی

به‌منظور دستیابی به راه‌حل‌های یکپارچه‌تر، توصیه می‌شود در مطالعات آینده، بهینه‌سازی هم‌زمان چند هدفه[5] برای روشنایی مفید روز و تهویه با استفاده از پلاگین‌های بهینه‌ساز پیشرفته مانند اوکتاپوس[6] و یا والسی[7] در محیط نرم‌افزار گرس‌هاپر و با یکپارچه‌سازی پلاگین‌های لیدی‌باگ و هانی‌بی انجام شود. این روش امکان تولید جبهه پارتو[8] را فراهم می‌کند و طراحان را قادر می‌سازد تا بر اساس اولویت‌های پروژه (نور، انرژی، هزینه یا آسایش)، بهترین ترکیب نسبت مساحت پنجره به دیوار و استراتژی‌های کنترلی را انتخاب کنند.

6- مراجع

[1] World Energy Council, *World Energy Resources: An Overview*, London, UK, 2012. [Online]. Available: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Resources-2012-Overview-Report.pdf

[1] Low SHGC
[2] Flexible
[3] PVSD
[4] Low Solar Heat Gain
[5] Multi-Objective Optimization
[6] Octopus
[7] Wallacei
[8] Pareto Front

[2] A. H. Ostadzad, Solar energy and sustainable economic development in Iran, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 11, No. 2, pp. 128–137, 2024. (in Persian)

[3] Z. Soltaninejad, M. Ghasemi, and M. Soltaninejad, Technical and environmental analysis of using a photovoltaic-thermal system to provide heating energy for a school building in Kerman, *Journal of Renewable and New Energy,* Vol. 11, No. 1, pp. 50–59, 2024. (in Persian)

[4] O. Rahaei, and A. Roasaei, Studying the Separating Walls Function in Administrative Spaces on Quality of Air Conditioning and Indoor Airflow Using CFD Method, *Journal of Architecture and Urban Planning,* Vol. 10, No. 19, pp. 61–76, 2017. (in Persian)

[5] J. A. Jakubiec, and C. F. Reinhart, Predicting visual comfort conditions in a large daylit space based on long-term occupant evaluations: A field study, in *Proceedings of the 13th International Building Performance Simulation Association Conference (IBPSA)*, Chambéry, France, Aug. 26–28, 2013.

[6] M. B. C. Aries, M. P. J. Aarts, and J. van Hoof, Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment, *Lighting Research & Technology*, Vol. 47, No. 1, pp. 6-27, 2013.

[7] N. Jamala, A. N. Wika, and A. Kusno, Analysis of Daylight Distribution on Building Height and Space Depth, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* Vol. 619, No. 1, 012044, 2019.

[8] T. Srisamranrungruang, and K. Hiyama, Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF), *Energy and Buildings,* Vol. 210, 109765, 2020.

[9] X. Chen, and H. Yang, Combined thermal and daylight analysis of a typical public rental housing development to fulfil green building guidance in Hong Kong, *Energy and Buildings*, Vol. 108, pp. 420–432, 2015.

[10] E. Sorooshnia, P. Rahnamayiezekavat, M. Rashidi, M. Sadeghi, and B. Samali, Curve Optimization for the Anidolic Daylight System Counterbalancing Energy Saving, Indoor Visual and Thermal Comfort for Sydney Dwellings, *Energies*, Vol. 16, No. 3, 1090, 2023.

[11] A. S. Ebrahimpour and B. Mohammad Kari, A new method to designing window based on energy consumption, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 11, No. 1, pp. 77–88, 2011. (in Persian)

[12] L. I. Wong, A review of daylighting design and implementation in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 74, pp. 959–968, 2017.

[13] S. Mohammadzadeh, S. A. Yazdanfar, and S. Norouzian-Maleki, Quantitative and qualitative efficiency of daylight using optical Fiber lighting systems in Housing, *Journal of Renewable and New Energy,* Vol. 9, No. 2, pp. 57-68, 2022. (in Persian)

[14] S. Cesari, P. Valdiserri, M. Coccagna, and S. Mazzacane, The energy saving potential of wide windows in hospital patient rooms, optimizing the type of glazing and lighting control strategy under different climatic conditions, *Energies,* Vol. 13, No. 8, 2116, 2020.

[15] R. Liang, Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson, and Y. Wu, Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China, *Energy and Buildings*, Vol. 176, pp. 216–231, 2018.

[16] R. Fayaz, Optimum Window Area for Residential Buildings in Ardabil and Tehran, *Journal of Architecture and Urban Planning,* Vol. 5, No. 10, pp. 105–119, 2013. (in Persian)

[17] A. Razmi, M. Rahbar, and M. Bemanian, PCA-ANN integrated NSGA-III framework for dormitory building design optimization: Energy efficiency, daylight, and thermal comfort, *Applied Energy,* Vol. 305, 117828, 2022.

[18] H. Sabry, A. Sherif, M. Gadelhak, and M. Aly, Balancing the daylighting and energy performance of solar screens in residential desert buildings: Examination of screen axial rotation and opening aspect ratio, *Solar Energy*, Vol. 103, pp.364–377, 2014.

[19] M. Thalfeldt, E. Pikas, J. Kurnitski, and H. Voll, Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate, *Energy and Buildings,* Vol. 67, pp. 309–321, 2013.

[20] H. Ghadamian, S. H. Mousavi, and A. R. Ghadi, Analytical solution for energy modeling of double skin façades building, *Energy and Buildings,* Vol. 49, pp. 251–260, 2012.

[21] F. Hammad and B. Abu-Hijleh, The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building, *Energy and Buildings,* Vol. 42, No. 10, pp. 1888–1895, 2010.

[22] J. Gagne and M. Andersen, A generative facade design method based on daylighting performance goals, *Energy and Buildings,* Vol. 5, No. 3, pp. 189-204, 2012

[23] O. C. Dewi, K. Rahmasari, T. A. Hanjani, A. D. Ismoyo, and A. M. Dugar, Window-to-Wall Ratio as a Mode of Daylight Optimization for an Educational Building with Opaque Double-Skin Façade, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering,* Vol. 30, No. 1, pp. 32–43, 2022.

[24] S. Sayadi, A. Hayati, and M. Salmanzadeh, Optimization of Window-to-Wall Ratio for Buildings Located in Different Climates: An IDA-Indoor Climate and Energy Simulation Study, *Energies,* Vol. 14, 1974, 2021.

[25] D. H. W. Li and S. L. Wong, Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings, *Applied Energy,* Vol. 84, No. 12, pp. 1199–1209, 2007.

[26] L. Karlsen, P. Heiselberg, and I. Bryn, Occupant satisfaction with two blind control strategies: Slats closed and slats in cut-off position, *Solar. Energy,* Vol. 115, pp. 166–179, 2015.

[27] M. N. Bahadori, A. R. Dehghani-sanij, and A. Sayigh, *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*, Switzerland: Springer Cham, 2014.

[28] M. Mohammadi, Z. Ghiabaklou, and H. Moztarzadeh, Determining the optimal dimensions and opening area for windows in residential buildings in the hot-humid climate of Asalouyeh city, *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning,* Vol. 28, No. 3, pp. 91–105, 2023. (in Persian)

[29] S. Bagheri, H. Moradinasab, and M. Yeganeh, The effect of window proportions in low-rise residential buildings on annual energy consumption in humid temperate climate (case study: Rasht city in Iran), *Frontiers in Energy Research,* 12:1463678, 2024.

[30] Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, ASHRAE Standard 62.1, 2022.

[31] Y. C. Chan and A. Tzempelikos, Efficient venetian blind control strategies considering daylight utilization and glare protection, *Solar Energy,* Vol. 98, Part C, pp. 241-254, 2013.

[32] S. Farivar and S. Teimourtash, Impact of window design on dynamic daylight performance in an office building in Iran, *Journal of Daylighting,* Vol. 10, No. 1, pp. 31-44, 2023.

[33] O. Humaidan, Khaled Almazam, F. M. Bashir, M. J. Alshayeb, Nedhal Al-Tamimi, and Yakubu Aminu Dodo, Comprehensive assessment of dynamic shading devices for daylighting and energy management in Saudi Arabian hot-arid buildings, *Energy and Buildings,* Vol. 346, 116180, 2025.

[34] Y. Jiang, Z. Qi, S. Ran, and Q. Ma, A Study on the Effect of Dynamic Photovoltaic Shading Devices on Energy Consumption and Daylighting of an Office Building, *Buildings,* Vol. 14, No. 3, 596, 2024.

[35] I. Acosta, M. Á. Campano, S. Domínguez-Amarillo, and J. Navarro Casas, Continuous Overcast Daylight Autonomy (DAo.con): A New Dynamic Metric for Sensor-Less Lighting Smart Controls, *LEUKOS,* Vol. 19, No. 4, pp. 343-367, 2023.

[36] T. Kristiansen, F. Jamil, I. A. Hameed, and M. Hamdy, Predicting annual illuminance and operative temperature in residential buildings using artificial neural networks, *Building and Environment,* Vol. 217, 109031, 2022.

[37] A. Kansal, and E. Rajasekar, A review on reduced order models for building and urban energy simulations, *Journal of Building Performance Simulation,* Vol. 18, No. 4, pp. 500-522, 2025.

[38] R. M. López-Lovillo, S. Domínguez-Amarillo, J. J. Sendra, and I. Acosta, How can a daylighting and user-oriented control system be configured? A state-of-the-art critical review, *Journal of Building Engineering,* Vol. 64, 105704, 2023.